

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE BIOCÊNCIAS  
LICENCIATURA EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS

Renata Krüger Martins

**Divulgação Científica para a Conscientização Sobre a Exposição ao  
Mercúrio em Populações Indígenas e Ribeirinhas na Amazônia**

Porto Alegre

2022

Renata Krüger Martins

**Divulgação Científica para a Conscientização Sobre a Exposição ao  
Mercúrio em Populações Indígenas e Ribeirinhas na Amazônia**

Trabalho de Conclusão do Curso de Licenciatura em Ciências Biológicas do Instituto de Biociências, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do Título de Licenciada em Ciências Biológicas.

Orientador: Prof. Dr. Jose Claudio Fonseca Moreira

Porto Alegre  
2022

CIP - Catalogação na Publicação

Martins, Renata Krüger  
Divulgação Científica para a Conscientização Sobre  
a Exposição ao Mercúrio em Populações Indígenas e  
Ribeirinhas na Amazônia / Renata Krüger Martins. --  
2022.  
44 f.  
Orientador: Jose Claudio Fonseca Moreira.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto  
de Biociências, Licenciatura em Ciências Biológicas,  
Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Metilmercúrio. 2. Garimpo. 3. Amazônia. 4.  
Divulgação Científica. I. Fonseca Moreira, Jose  
Claudio, orient. II. Título.

## **RESUMO**

A partir de uma revisão bibliográfica sobre casos de exposição ao mercúrio em populações indígenas e ribeirinhas, este trabalho tem como objetivo, o desenvolvimento de um Kit Didático, abordando o tema da contaminação por mercúrio na Amazônia brasileira, sua origem a partir do uso do mercúrio para extração do ouro em garimpos, a metilação do mercúrio, a bioacumulação e biomagnificação trófica do metilmercúrio e o consumo de peixes contaminados como principal fonte de exposição crônica sofrida pelas populações indígenas e ribeirinhas. O Kit Didático foi produzido inspirado em materiais de divulgação científica presentes em plataformas como *Youtube* e redes sociais, de fácil entendimento para o público geral e o uso em sala de aula.

Palavras-chave: Metilmercúrio, Garimpo, Amazônia, Divulgação Científica.

## **ABSTRACT**

Based on a bibliographic review of cases of mercury exposure in indigenous and riverside populations, this work aims to develop a Didactic Kit addressing the topic of mercury contamination in the Brazilian Amazon. It will also approach the source of the contaminant from the use of mercury for gold extraction in mining, mercury methylation, bioaccumulation and biomagnification of methylmercury, as well as its consumption from contaminated fish as the main source of chronic exposure suffered by indigenous and riverine populations. The Didactic Kit was produced using scientific dissemination materials present on platforms such as Youtube and social networks as inspiration, in order to be easy to understand for the general public and applicable for use in the classroom.

Keywords: Methylmercury, Gold Mining, Amazon, Scientific Dissemination.

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	6
1.1 Mineração Artesanal em Pequena Escala .....	6
1.2 Bioacumulação do Metilmercúrio .....	8
1.3 Doença de Minamata .....	10
1.4 Abordagem de temas socialmente relevantes através da divulgação científica .....	10
2 OBJETIVO .....	14
3 METODOLOGIA .....	15
3.1 Revisão bibliográfica .....	15
3.2 Elaboração do Kit Didático e material de divulgação científica .....	15
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	16
4.1 Presença de Mercúrio em Peixes Coletados na Amazônia Brasileira .....	16
4.2 Exposição ao Mercúrio em Populações Indígenas e Ribeirinhas .....	17
4.3 Exposição ao Mercúrio em Populações Urbanas .....	18
4.4 Sintomas Neurológicos nas Populações Expostas ao Mercúrio .....	18
5 DISCUSSÃO .....	20
5.1 Alguns mecanismos bioquímicos envolvidos na exposição ao metilmercúrio .....	20
5.2 Fatores que influenciam a biodisponibilidade do metilmercúrio .....	21
5.3 Destino do ouro extraído na Amazônia .....	23
6 CONCLUSÃO .....	24
7 PERSPECTIVAS .....	25
8 REFERÊNCIAS .....	26
9 APÊNDICE – Kit didático .....	30
9.1 Cards informativos .....	30
9.2 Texto informativo .....	38
9.3 Vídeos .....	43

## 1 INTRODUÇÃO

A exploração dos recursos naturais da América Latina é contínua desde o desembarque de Colombo no Caribe até os dias de hoje. O desenvolvimento do mercantilismo, dependeu da extração de recursos das colônias, que enriqueceram suas metrópoles do outro lado do Atlântico. A conquista do Novo Mundo e das suas riquezas ocorreu às custas das populações autóctones, que foram reduzidas à uma fração do número original, pelo ferro das espadas e pelos patógenos trazidos da Europa. Nas colônias espanholas do século XVI e XVII, os indígenas andinos trabalhavam nas minas em um sistema de turnos, chamado “mita”, descrito por Galeano como “uma máquina de triturar índios”, onde eram expostos a jornadas exaustivas tendo de suportar altas temperaturas e respirando gases tóxicos no interior da montanha, carregando fardos de prata ou ouro para o exterior, onde eram expostos a mudanças bruscas de temperaturas, adoecendo e morrendo aos milhares (GALEANO, 1978).

No século XVII, durante a exploração dos depósitos de ouro e prata das colônias ibéricas na América Latina, já existiam leis e decretos, emitidos pelos juristas espanhóis, que determinavam a igualdade de direito entre os indígenas e os homens brancos para a exploração das minas do Novo Mundo. Existia uma legislação para o trabalho dos indígenas, declarados como “verdadeiros homens” na bula emitida pelo papa Paulo III em 1537. Porém, se a existência de uma lei não garante seu acato nos tempos atuais, tampouco garantiria durante os anos do domínio colonial (GALEANO, 1978). O ciclo de abusos enfrentados pelos povos indígenas, perpetrados pelas forças dominantes, continua enquanto a terra ainda possui riquezas para suprir a ganância daqueles que ditam a ordem na nossa sociedade.

Os métodos de exploração se renovam conforme as tecnologias mudam, embora a extração de depósitos auríferos aluviais continue ocorrendo de maneira semelhante aos séculos passados. Atualmente não há a pressão dos colonizadores sobre os mais pobres, para que esses se exponham a trabalhos arriscados a fim de extrair os metais pesados da terra, mas as flutuações do mercado que continuam valorizando o ouro, estimulando a perpetuação da exploração da terra e daqueles que dependem dela.

### *1.1 Mineração Artesanal em Pequena Escala*

A atividade de garimpo, que ocorre na Amazônia, é chamada de mineração artesanal em pequena escala (*artisanal and small-scale gold mining - ASGM*). Ela é descrita pelo Banco Mundial como “uma atividade impulsionada pela pobreza, praticada nas áreas rurais e mais

pobres de um país, por uma população, em grande parte, itinerante, de baixa escolaridade, com poucas oportunidades de emprego” (WHO, 2016).

O caráter itinerante da atividade garimpeira é evidenciado pelo caso da Serra Pelada, quando na década de 1980, a descoberta de depósitos de ouro em uma montanha no interior do estado do Pará, resultou em um intenso fluxo migratório de trabalhadores de todo Brasil buscando por um filão de ouro (ZONTA, 2013). Esses fluxos migratórios causam grande impacto social e na saúde dos moradores de determinadas regiões, introduzindo doenças e conflitos territoriais, mudando a dinâmica social da região e expondo as populações a novos riscos (RORATO *et al.*, 2020).

A atividade garimpeira é realizada principalmente por homens, embora mulheres participem do processamento do ouro, e de atividades de manutenção da vida doméstica das comunidades, ou, ainda, como trabalhadoras sexuais. Crianças e adolescentes podem participar dos garimpos, sendo especialmente vulneráveis aos danos causados pela toxicidade do mercúrio, utilizado no processo de extração do ouro, e pelos impactos das mudanças na dinâmica social trazida pela atividade extrativista, como o risco de exploração sexual (WHO, 2016). Muitos dos garimpeiros se encontram em situações de pobreza extrema, se expondo a uma atividade que impõe riscos à saúde individual e coletiva. Um dos principais riscos individuais à saúde ocorre pela exposição ao mercúrio, usado na extração do ouro.

As etapas do garimpo envolvem extração, processamento, concentração, amalgamação, queima e refinamento, com os danos ambientais associados à mineração do ouro ocorrendo em vários momentos. A extração, que geralmente é feita em depósitos aluviais, também depende da derrubada da vegetação para acessar o sedimento contendo partículas de ouro e outras substâncias. Os demais minerais presentes devem ser separados durante a etapa de processamento; a amalgamação é usada nessa etapa, com a formação de uma liga de mercúrio e ouro. A amálgama formada, contendo mercúrio e ouro, passa pelo processo de queima, onde ela é esquentada até o mercúrio vaporizar, restando apenas o “ouro esponja”, que deve passar por mais processos de refinamentos até gerar o produto final.

A etapa de amalgamação é a mais arriscada para a saúde dos trabalhadores devido a dispersão do mercúrio, que ocorre como resultado da sua vaporização. A quantidade de mercúrio usada nessa etapa do processamento depende do nível de fragmentação do minério. Duas técnicas podem ser empregadas nesse momento: com a amálgama do minério inteiro, na

qual o mercúrio elemental é adicionado ao minério que passou por pouca ou nenhuma fragmentação, exigindo, portanto, maiores quantidades de mercúrio nessa técnica. Enquanto a amálgama do concentrado utiliza menores quantidades de mercúrio, pois o minério usado foi fragmentado, permitindo, nesse caso, a sua recuperação (WHO, 2016).

O garimpo em pequena escala é responsável pela expansão recente da devastação do bioma amazônico. Entre 2017 e 2020 houve um aumento de mais de 90% na taxa de desmatamento relacionado à mineração ilegal (SIQUEIRA-GAY; SÁNCHEZ, 2021). Embora ocorra em pequena escala, essa modalidade de garimpo representa um grande risco à integridade da floresta e dos povos que vivem e dependem dela, pois é executada de maneira clandestina, não sendo sujeitada a regulamentações, como a mineração industrial, que depende de autorizações e do comprometimento com estratégias de reabilitação das áreas degradadas.

Parte do garimpo clandestino já ocorre em terras indígenas demarcadas, que são objeto de interesse para a regulamentação pelo projeto de lei (PL 191/2020) que visa autorizar a mineração em terras indígenas. Os territórios indígenas são estabelecidos pela jurisdição federal para garantia dos direitos territoriais dos povos originários. Atualmente há 383 territórios indígenas na Amazônia legal brasileira, cobrindo uma área de mais de 1.160.000 km<sup>2</sup>, abrigando mais de 355 mil pessoas de mais de 150 etnias, cuja autonomia é posta em risco pela ocupação de madeireiros, fazendeiros, posseiros e garimpeiros. Atualmente a atividade mineradora no Brasil depende de processos de licenciamento pela Agência Nacional de Mineração (ANM). Um estudo comparou requerimentos para licença de mineração ainda não aprovados e constatou uma grande porção de solicitações para exploração mineral em terras indígenas, alguns territórios como Cajueiro (RR), Araçá (RR), Boqueirão (RR) e Aningal (RR) tendo até 98% do território visado pela atividade mineradora (RORATO *et al.*, 2020).

### *1.2 Bioacumulação do Metilmercúrio*

A inalação do vapor mercúrio inorgânico, durante a queima da amálgama com ouro, é a principal rota de exposição ocupacional aos efeitos tóxicos de mercúrio. Porém, a espécie mais perigosa de mercúrio é o metilmercúrio (MeHg), cuja principal forma de exposição é o consumo de pescado contaminado. O mercúrio volatilizado durante a queima da amálgama é liberado no meio ambiente, ele pode ser transformado parcialmente em mercúrio inorgânico (Hg<sup>2+</sup>) na atmosfera, sendo transportado pela chuva até o solo e os rios, onde pode entrar em contato com bactérias metanogênicas que catalisam reações de metilação do mercúrio em metilmercúrio (CH<sub>3</sub>Hg)(CRESPO-LOPEZ *et al.*, 2021).

O metilmercúrio (MeHg) é mais perigoso comparado às demais espécies de mercúrio pois é mais estável e possui meia-vida biológica aumentada pela capacidade de atravessar membranas biológicas. O metilmercúrio produzido por bactérias metanogênicas é absorvido pelo fitoplâncton ou zooplâncton, que servem de alimento para os pequenos peixes e artrópodes que respectivamente são consumidos pelos animais que ocupam posições superiores na cadeia alimentar. O metilmercúrio fica retido nos tecidos dos animais que o consomem, causando a bioacumulação, pois a taxa de eliminação é menor que a de absorção. Logo, existe uma concentração maior do contaminante nos tecidos dos animais em comparação ao meio, constituindo a bioconcentração. Consequentemente, há um aumento na concentração de mercúrio nos tecidos de animais pertencentes a níveis tróficos superiores, o que configura a biomagnificação trófica. A transferência através da cadeia alimentar, partindo dos organismos primários até os carnívoros superiores pode levar a um aumento de até 10 mil vezes da concentração do contaminante entre o organismo e o meio (SISINNO; OLIVEIRA-FILHO, 2013).

A capacidade de metilação do mercúrio inorgânico pelas bactérias metanogênicas possivelmente surgiu como um mecanismo de defesa, durante as fases iniciais da evolução, contra as altas concentrações do vapor de mercúrio, proveniente da atividade vulcânica, presente na atmosfera primitiva. A metilação do mercúrio auxiliou as células existentes a lidar com o mercúrio iônico carregado pela chuva, e a alta toxicidade do metilmercúrio ao sistema nervoso central não foi um problema naquele momento da evolução (CLARKSON, 1995).

A capacidade de uma substância sofrer bioacumulação e biomagnificação trófica depende de algumas propriedades, como lipofilicidade, estabilidade química e metabólica e baixa toxicidade aos organismos intermediários das cadeias tróficas (CLARKSON, 1995). O mercúrio tem todas as características citadas, sendo passível de sofrer bioacumulação, bioconcentração e biomagnificação trófica após sofrer reações de metilação e ser transformado em metilmercúrio.

As concentrações encontradas de metilmercúrio são significativamente maiores em peixes piscívoros, com valores entre 0,36 – 0,66 µg/g de músculo ou ppm, devido ao processo de biomagnificação trófica, enquanto espécies não-piscívoras possuem aproximadamente 0,03 ppm de metilmercúrio (RODRÍGUEZ MARTÍN-DOIMEADIOS *et al.*, 2014). A presença do mercúrio bioacumulado nos tecidos dos organismos aquáticos constitui um grande risco para

as populações cujas dietas tem como principal fonte de proteína o pescado, como os indígenas e ribeirinhos (VEGA *et al.*, 2018).

### *1.3 Doença de Minamata*

Os primeiros relatos de intoxicação por mercúrio adquirida pelo consumo de peixes ou frutos do mar contaminados ocorreram no Japão, entre os anos de 1953 e 1956, após o despejo de rejeitos químicos contendo mercúrio na baía de Minamata, na cidade de Kumamoto, no Japão. Outro caso de intoxicações em massa, pelo mesmo motivo, ocorreu entre 1964 e 1965, desta vez no rio Agano, na cidade de Niigata, também no Japão. Os primeiros casos de intoxicação humana fetal por metilmercúrio foram descritas após os incidentes, que ocorreram sem precedentes na história, e a análise dos casos, que acumulam aproximadamente 1700 vítimas fatais, levando à identificação de uma série de sintomas decorrentes da exposição ao metilmercúrio, que permitiram a caracterização e diagnóstico da Doença de Minamata (ETO, 2000).

Em resposta à emergência ambiental e de saúde pública ocasionada pelas contaminações por metilmercúrio decorrentes do garimpo artesanal, foi estabelecida em outubro de 2013 a Convenção de Minamata, que atraiu a atenção mundial para a determinação de um plano de contenção das emissões antropogênicas de mercúrio pela responsabilização dos governos e reparação das vítimas pelos danos causados pelo uso do mercúrio (WHO, 2016). Até hoje, 128 países aderiram à Convenção de Minamata, porém, nos anos seguintes, pôde-se observar uma tendência à negligência aos planos estabelecidos para contenção da exposição ao mercúrio, que afeta majoritariamente populações pobres e vulneráveis. Nos últimos anos houve o aumento dos relatos do uso de mercúrio no garimpo no México e na Indonésia (THE LANCET, 2017) e a tentativa do governo Trump nos EUA de enfraquecer a legislação para o controle do uso de produtos químicos tóxicos, incluindo o mercúrio (FRIEDMAN; DAVENPORT, 2020).

### *1.4 Abordagem de temas socialmente relevantes através da divulgação científica*

A divulgação científica pode ser descrita como a atividade de comunicar e tornar ciente a sociedade, o público geral ou leigo, sobre o que se faz no meio científico. Ela é muitas vezes tratada como um instrumento educativo (VIEIRA OLIVEIRA *et al.*, 2012), mas pode ocorrer em meios que pouco tem em comum com a escola. Na esfera política, por exemplo, por meio do desenvolvimento de novas tecnologias, eletrônicas ou farmacológicas, que devem ter sua utilidade justificada para aqueles que são dotados do poder de decisão, mas ainda assim, leigos para assuntos técnicos e científicos.

Diálogos sobre temas científicos entre interlocutores especializados e não especializados ocorrem em diversos cenários, com múltiplas tensões decorrentes dos interesses envolvidos. Portanto, a interlocução entre as esferas científica, pública e política provoca diferentes discursos que são lidos e assimilados de variadas formas, dependendo das posições dos envolvidos. Deve-se pontuar que dentro da esfera científica, dado o nível de especialização, cientistas de outras áreas também são potenciais leitores de trabalhos de divulgação científica, pois um pesquisador pode ser considerado leigo em qualquer área não relacionada com seu próprio trabalho (SILVA, 2006).

Considerando a divulgação científica no sentido da popularização da informação sobre quais descobertas são feitas no meio acadêmico, a transmissão desses conhecimentos ocorre junto de acomodações do discurso (VENEU; AMORIM; MASSARANI, 2008). Tais adaptações podem ocorrer pelo emprego de metáforas. O uso de uma metáfora pode ocorrer de maneira tão decorrente, e por um longo período, fazendo com que ela se transforme em um termo amplamente aceito para nomear um conceito, por exemplo, chamar nossa galáxia de via láctea. Outro tipo, são as metáforas convencionais, que são amplamente difundidas, embora não tenham sido incorporadas como os termos para os assuntos que tratam, não são percebidas como metáforas pela frequência na qual são empregadas para um conceito específico, como o “código” genético.

Metáforas ativas são usadas como justaposições ou comparações, no intuito de levar à percepção sobre um assunto através de um estranhamento semântico. Por exemplo, um artigo publicado na *Nature*, sobre como o Coronavírus infecta as células compara os lisossomos com lixeiras, para exemplificar sua função (SCUDELLARI, 2021).

A escrita de textos sobre ciência em meios de comunicações não científicos pode ser feita por pessoas não aprofundadas nas áreas tratadas, portanto, o emprego de metáforas pode revelar as pré-disposições dos indivíduos leigos às diferentes áreas da ciência e tecnologia, bem como, reforçar estereótipos e visões já presentes. A análise dos tipos de metáforas usadas nos textos avaliados revela a percepção que o público tem da ciência e da tecnologia, às vezes, consideradas construções humanas, outras vezes, como processos sobrenaturais, e, quase sempre, acompanhadas de expectativas e de anseios. De modo geral, as metáforas servem como dispositivos de facilitação e assimilação de conceitos, que no público leigo são somados a uma rede de noções fragmentadas, adquiridas a partir de diferentes meios, que podem ou não

fornecer uma representação confiável do que é e como é feita a ciência (CHRISTIDOU; DIMOPOULOS; KOULAUDIS, 2004).

A transformação de descobertas científicas em notícias, pela mídia, pode ocorrer em veículos de comunicação tradicionais, que geralmente possuem consultores científicos especializados para orientar a elaboração das matérias (VENEU; AMORIM; MASSARANI, 2008). A análise da cobertura midiática de publicações relacionadas ao uso de organismos geneticamente modificados demonstrou que questões científicas são, geralmente, pouco noticiadas pela mídia tradicional, com exceção aos momentos em que ocorrem casos potencialmente controversos, como a descoberta de fatores de risco que podem afetar os consumidores.

Até a ocorrência de questões polêmicas noticiáveis, o grande público tem pouca ou nenhuma referência sobre os assuntos tratados, formando sua opinião a partir da representação especulativa feita pela mídia, que inevitavelmente faz concessões e omissões entre a publicação original e a matéria fornecida ao público leigo. Tais modificações na linguagem são necessárias, mas podem afetar o significado.

Como consequência, a percepção do público é enviesada pelas omissões e generalizações feitas pelos veículos midiáticos, que pode tratar resultados preliminares como conclusões sólidas, pela falta de compreensão da maneira como o trabalho científico é conduzido e como interpretar seus dados. O público geral é heterogêneo, com um conhecimento teórico e cultural variado, que influencia a percepção, muitas vezes levando para uma visão alarmista ou romantizada, distante da mensagem original (MCINERNEY; BIRD; NUCCI, 2004).

A presença dos temas científicos nos canais midiáticos tradicionais restrita aos momentos de tensão, controvérsia ou risco generalizado para a população, foram evidentes durante a pandemia do COVID-19. O uso da hidroxicloroquina para o tratamento da COVID-19, promovido politicamente, foi um exemplo da interpretação de dados preliminares como verdades irrefutáveis. Portanto, a promoção do letramento científico e a divulgação de conhecimento baseado em evidências, impacta diretamente na saúde individual e coletiva (VIEIRA OLIVEIRA *et al.*, 2012).

Os riscos associados à presença do garimpo na Amazônia brasileira se estendem da devastação ecológica ao impacto na saúde coletiva, vitimando as populações mais vulneráveis.

Por ocorrer a pelo menos cinco décadas, talvez, para a mídia tradicional não desperte o senso de emergência para a notificação generalizada, mas a sobrevivência dos povos originários depende de ações concretas que começam com o conhecimento dos abusos sofridos pelos povos indígenas. O bastião do conhecimento da fauna e da flora amazônica é ameaçado, portanto, a remediação do impacto ambiental, de forma generalizada, depende da manutenção das variadas culturas e modos de vida que possuem visões de mundo diversas e opostas ao modelo ocidental e consumista que estamos inseridos.

## **2 OBJETIVO**

O objetivo desse trabalho é desenvolver um kit didático, composto por vídeos, cards informativos e um texto abordando o tema da exposição ao mercúrio em populações indígenas e ribeirinhas da Amazônia brasileira. O material didático criado foi inspirado pelo modelo de divulgação científica on-line, disseminado durante a pandemia para a exposição de temas científicos de maneira acessível ao grande público e potencial aplicação em sala de aula.

O material desenvolvido abrange conteúdos a nível de ensino médio. O uso em sala de aula é sugerido como material complementar durante as aulas de biologia, possibilitando abordagem de conceitos relacionados à ecologia e interseções entre as disciplinas biologia e química. Pretende-se, com o desenvolvimento e divulgação do material, promover a conscientização sobre os impactos ecológicos ocasionados pelo uso do mercúrio no garimpo do ouro, abordando algumas questões bioquímicas que envolvem os sintomas neurológicos provocados pela toxicidade mercurial.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Revisão bibliográfica

Foi feita a busca, através da plataforma *Web of Science*, pelos termos “*mercury*” ou “*mercury exposition*”, “*indigenous*”, “*riverine*”, “*gold mining*” e “*brazilian Amazon*”. A pesquisa apresentou 24 resultados. 5 artigos foram desconsiderados pela temática ser orientada à área geoquímica e outros 2 foram desconsiderados por serem centralizados em populações amazônicas não brasileiras. A pesquisa no banco dados resultou em 17 trabalhos publicados a partir de 1998, que foram utilizados para orientar a revisão bibliográfica sobre a exposição de populações indígenas e ribeirinhas ao mercúrio proveniente do garimpo.

#### 3.2 Elaboração do Kit Didático e material de divulgação científica

O material desenvolvido consiste em *cards*, para divulgação na rede social *Instagram*, elaborados pela plataforma *Canva*. Os vídeos, para a publicação no *Youtube*, foram feitos através do aplicativo *Movavi Video Editor*. *Cards*, vídeos e o texto informativo foram elaborados de acordo com as informações obtidas na revisão bibliográfica, e serão disponibilizados para a publicação na revista *A ciência como ela é*.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 Presença de Mercúrio em Peixes Coletados na Amazônia Brasileira

O consumo de peixes é parte fundamental da dieta das populações indígenas. Pesquisadores avaliaram, em 1999, os hábitos alimentares da comunidade indígena de Sai Cinza, na reserva Munduruku, confirmando a importância do pescado na dieta, consumido pelo menos três vezes ao dia. Esse estudo também listou as espécies mais consumidas e avaliou os níveis de mercúrio no tecido muscular dos peixes; os resultados confirmaram a ocorrência de biomagnificação trófica, com as espécies piscívoras apresentando uma concentração média de mercúrio no tecido muscular (0,293 µg/g) superior às não piscívoras (0,112 µg/g) (BRABO *et al.*, 1999).

Em 2019 outro estudo também avaliou os níveis de mercúrio presentes em peixes coletados em comunidades indígenas da etnia Munduruku, dessa vez no território de Sawré Muybu, no Pará. Foi feita a avaliação do risco para o consumo dos peixes, baseada nos hábitos alimentares, e considerando dois cenários possíveis: o consumo atual e um cenário crítico, considerando 95º percentil das concentrações observadas de mercúrio nos peixes. Utilizando dados sobre a população e seu consumo foi estabelecida uma razão de risco, que se igual ou superior a 1 indica o risco de desenvolvimento de doenças relacionadas à exposição ao mercúrio. Os resultados demonstraram que o consumo diário de metilmercúrio excedeu os valores limite de referência em todos os cenários considerados. Mulheres em idade reprodutiva, representam a população mais vulnerável à intoxicação por mercúrio, e apresentaram um nível de ingestão 7 vezes maior que as doses de referência recomendadas pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) (DE VASCONCELLOS *et al.*, 2021).

Foi feita a coleta e avaliação dos níveis de mercúrio em peixes presentes em rios localizados em territórios protegidos no Amapá, próximos a depósitos minerais, onde há ocorrências de garimpo clandestino. Nesse estudo, foi estabelecido um coeficiente de risco baseado em dados demográficos e nos níveis de metilmercúrio nos peixes analisados, considerando o cenário atual de consumo e um cenário crítico de insegurança alimentar, no qual o pescado é a única fonte proteica disponível. Os resultados indicaram maior risco de exposição ao metilmercúrio consumindo peixes carnívoros ou onívoros e pescados no interior do continente, em comparação à região costeira (HACON *et al.*, 2020).

Na Reserva indígena Rio Branco, onde vivem os indígenas da etnia Tupari, foi feito um estudo avaliando os níveis de mercúrio total nos peixes e nos animais caçados e consumidos

pelo povoado. Não há relatos de garimpo nessa região, porém ela está sob influência de sete pequenas centrais hidrelétricas estabelecidas na bacia do Rio Branco. Os níveis de mercúrio foram comparados com os valores máximos recomendados como seguros pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), 0,5 mg T-Hg kg<sup>-1</sup> para peixes não carnívoros e 1 mg T-Hg kg<sup>-1</sup> para espécies piscívoras, e pela OMS, respectivamente 0,3 mg T-Hg kg<sup>-1</sup> e 0,5 mg T-Hg kg<sup>-1</sup>. 42,1% dos peixes apresentaram níveis superiores ao recomendado pela OMS, superando o nível de mercúrio presente nos animais de caça (DE OLIVEIRA, *et al.*, 2021).

#### 4.2 Exposição ao Mercúrio em Populações Indígenas e Ribeirinhas

O isolamento geográfico das populações amazônicas as põe em uma situação de maior vulnerabilidade devido à ineficácia do sistema de saúde pública para atingir toda sua demanda. Existe uma lacuna nos registros de informação de saúde referentes aos estados do Amazonas, Pará, Roraima, Amapá, Maranhão e Rondônia sobre casos de intoxicação por mercúrio. Dos 220 casos reportados ao SINAN (Sistema de Informação de Agravos de Notificação) entre 2006 e 2014, a maioria vinha dos Estados de São Paulo e Paraná. É notável a ausência de registros de intoxicação por mercúrio advindos da região amazônica, onde ocorre parte considerável do garimpo de ouro, com registros dos níveis de mercúrio capilar acima de 6 µg.g<sup>-1</sup> nos moradores da região (DE CASTRO; LIMA, 2021).

A quantificação da presença de mercúrio no cabelo serve como um bom biomarcador da exposição crônica ao contaminante, que pode indicar a intensidade da contaminação ao longo prazo, pois o metilmercúrio é incorporado no cabelo durante a sua formação, ainda no folículo, resultando em uma concentração que pode ser até 250 vezes maior do que nos demais tecidos (NABI, 2014). A Organização Mundial da Saúde (OMS) considera como nível máximo seguro de 1 a 2 µg/g e acima de 10 µg/g quando o consumo de peixe ocorre diariamente.

Estudos feitos entre os anos de 1996 e 2016, avaliando o nível de mercúrio capilar de moradores das margens dos rios Negro, Tapajós e Madeira, verificaram que todas as populações apresentaram níveis acima de 6 µg/g<sup>-1</sup>, com parte da população apresentando níveis acima de 10 µg/g<sup>-1</sup> (DE CASTRO; LIMA, 2018). Em 1991 o nível de mercúrio capilar de 311 ribeirinhos do Alto Madeira, em Rondônia, foi avaliado e 51% apresentaram níveis superiores a 10 ppm (BOISCHIO; BARBOSA, 1993).

Davi Kopenawa, escritor, líder político Yanomami e presidente da Hutukara Associação Yanomami solicitou um estudo que quantificou o nível de mercúrio capilar nos moradores das vilas Paapiu, Wailas Ye'Kuana e Waikas Aracaça. Nesse estudo o valor usado como indicador

de risco foi 6.0 ppm, com 92,3% dos moradores da vila Waikás Aracaça, com pontos de mineração presente, apresentaram níveis de mercúrio acima de 6 ppm (VEGA *et al.*, 2018).

#### 4.3 Exposição ao Mercúrio em Populações Urbanas

A maioria dos estudos avaliando contaminação por mercúrio na região amazônica são feitos em populações indígenas e ribeirinhas, devido a sua dificuldade de acesso ao sistema de saúde pública e dependência da pesca como fonte de proteína. Porém a exposição ao mercúrio também é um risco às populações urbanas, embora a exposição seja menor, comparados aos ribeirinhos, moradores do perímetro urbano também estão sujeitos ao consumo de peixes contaminados e aos níveis atmosféricos de mercúrio, atualmente 450% maiores que os naturais (UNEP, 2018). A avaliação dos níveis de mercúrio das populações ribeirinhas e urbanas próximas ao rio Tapajós mostrou 90% dos ribeirinhos e 57,1% dos moradores da área urbana com níveis superiores ao valor de referência estabelecido, de 10 µg/L. O mesmo estudo avaliou as concentrações de ureia e creatinina como marcadores de função renal, e alanina aminotransferase e aspartato aminotransferase como marcadores de função hepática. Foi evidenciada a prevalência de marcadores hepáticos e glicose nos moradores da região urbanizada e maiores níveis de marcadores renais nas populações ribeirinhas, com indivíduos com maiores níveis de mercúrio apresentando níveis elevados de ambos marcadores. Também foi encontrada associação positiva entre os níveis de mercúrio e hipertensão nas populações avaliadas (MENESES *et al.*, 2022).

Moradores das regiões urbanizadas geralmente sofrem menor exposição ambiental ao mercúrio pela disponibilidade de uma dieta mais variada e menor dependência da pesca. Um fator que pode contribuir com a contaminação no ambiente urbano é a presença de lojas de ouro. O refino do ouro, feito através da queima da amálgama de mercúrio, pode ocorrer e espaços sem circulação de ar e mecanismos de captação adequados para o vapor de mercúrio, induzindo um quadro de exposição ocupacional aguda. Indivíduos que sofreram esse tipo de exposição relataram sintomas como tontura, dor de cabeça, palpitações e tremores (BRANCHES *et al.*, 1993).

#### 4.4 Sintomas Neurológicos nas Populações Expostas ao Mercúrio

Segundo o *Food and Drug Administration* (FDA), o nível médio estimado de mercúrio capilar em indivíduos que nunca sofreram exposição é de 2 ppm (2 µg/g), enquanto a OMS considera que entre os adultos que apresentarem níveis de aproximadamente 50 ppm de mercúrio no cabelo, 5% deles terão alta probabilidade de exibir sintomas neurológicos resultantes da contaminação (WHEELER, 1996).

Um estudo realizado em indígenas adultos, da etnia Munduruku moradores de três vilas, Sawré Muybu, Poxo Muybu e Sawré Aboy, no Estado do Pará, avaliou o nível de mercúrio capilar e analisou a presença de manifestações neurológicas, como anormalidades somatossensoriais, motoras e cognitivas, associando a presença de possíveis déficits da função neurológica à exposição ao mercúrio. Foram encontradas evidências de associação entre a exposição ao mercúrio e prejuízo da função motora e dano cognitivo no sistema nervoso central. A maior parte dos acometidos pelos sintomas apresentaram níveis de mercúrio capilar superiores a 10 µg/g (OLIVEIRA *et al.*, 2021).

Os efeitos neurotóxicos do mercúrio também já foram evidenciados em uma população ribeirinha do Tapajós, que teve a função motora avaliada e comparada com os níveis de mercúrio no sangue e no cabelo. Foi demonstrada a correlação entre os níveis de mercúrio e o baixo desempenho nos testes de função motora, e feita a associação entre a exposição crônica a baixos níveis de mercúrio com manifestações neurocomportamentais (DOLBEC *et al.*, 2000).

A avaliação da função visual também pode servir como marcador da neurotoxicidade mercurial. Foi encontrada uma correlação linear entre o déficit na percepção de cores e o nível de mercúrio capilar em crianças que vivem na região do Tapajós, em uma comunidade ribeirinha próxima de pontos de garimpo (DOS SANTOS FREITAS *et al.*, 2018).

A suscetibilidade de um indivíduo à toxicidade mercurial pode ser influenciada por polimorfismos em genes codificantes para enzimas envolvidas no metabolismo de metais pesados. A enzima ácido delta aminolevulínico desidratase (ALAD) tem um papel importante na toxicocinética de metais, um polimorfismo no seu gene pode resultar em uma mutação *missense* que cria uma isozima com afinidade de ligação aos metais alterada. Pessoas que possuem o polimorfismo, em contextos de exposição ao mercúrio, podem apresentar níveis elevados na corrente sanguínea pelo aumento da meia-vida do contaminante. Duas crianças indígenas da etnia Munduruku foram identificadas como portadoras do polimorfismo, além do nível elevado de mercúrio sanguíneo, elas apresentaram sinais de dano neurológico correspondentes com a intoxicação por mercúrio (PERINI *et al.*, 2021)

## 5 DISCUSSÃO

### 5.1 Alguns mecanismos bioquímicos envolvidos na exposição ao metilmercúrio

Os principais grupos de risco para intoxicação por mercúrio são gestantes e crianças pequenas. Devido as propriedades lipofílica e de formação de complexos com as cisteínas, o mercúrio pode atravessar membranas biológicas, como a placenta e a barreira hematoencefálica. O sistema nervoso dos fetos e das crianças pequenas está em pleno desenvolvimento, sendo especialmente vulneráveis aos mecanismos de destruição neuronal do mercúrio, que envolvem inibição da síntese proteica, perda da função mitocondrial e de neurotransmissores, disfunções nos fluxos iônicos e perda da integridade do arcabouço estrutural dos neurônios (NABI, 2014).

O metilmercúrio absorvido se acumula no cérebro, podendo se associar com organelas membranosas, como a mitocôndria, o retículo endoplasmático, o complexo de Golgi, os lisossomos, ou a carioteca (CHANG, 1977). O local onde maiores concentrações de metilmercúrio são acumuladas nas fibras nervosas é a bainha de mielina, onde provoca desmielinização. O córtex cerebelar é a região mais afetada no cérebro, e as células granulosas são as mais suscetíveis à toxicidade mercurial (NABI, 2014).

Estima-se que a neurotoxicidade do mercúrio resulte de uma gama de efeitos, não necessariamente relacionados, devido à alta reatividade do mercúrio com diferentes estruturas, ocasionando a morte celular. Entre os efeitos há inibição da captação sináptica dos neurotransmissores dopamina, serotonina e norepinefrina, e alterações nas taxas de liberação da acetilcolina. A exposição prolongada ao mercúrio afeta a abundância de receptores muscarínicos colinérgicos no hipocampo e no cerebelo. Esses efeitos possivelmente decorrem da capacidade do mercúrio perturbar os mecanismos de regulação do cálcio intracelular e a permeabilidade da membrana plasmática ao íon cálcio (NABI, 2014).

Algumas alterações celulares causadas pelo metilmercúrio foram demonstradas através do seu efeito nos eritrócitos, que são usados como marcadores substitutos para avaliação do dano provocado pelo mercúrio no tecido neurológico. Na corrente sanguínea, o metilmercúrio causa a dissolução dos microtúbulos dos eritrócitos, o que pode ocorrer junto da perturbação do ciclo celular, ocasionando a apoptose. O efeito do metilmercúrio sob os microtúbulos, induzindo disfunção do ciclo celular, foi demonstrado em linhagens de células neuronais e não neuronais (MIURA *et al.*, 1999).

A presença de metilmercúrio pode prejudicar a função antioxidante, causando o acúmulo de espécies reativas e dano oxidativo, tais efeitos foram observados nos eritrócitos de trabalhadores expostos ao contaminante, que apresentaram níveis reduzidos de glutathiona (GSH) (DE SOUZA QUEIROZ *et al.*, 1998). O mercúrio pode provocar a depleção de glutathiona (GSH) pela ligação simultânea do mercúrio à duas moléculas de GSH, cujo complexo é excretado pela bile nas fezes. O mercúrio impede a síntese de novas moléculas de glutathiona, pela inibição da GSH sintetase, e induz a inibição da GSH redutase, necessária para a reciclagem da glutathiona oxidada, e retorno GSH reduzida para sua função antioxidante. Através da influência do mercúrio no *pool* de glutathiona, ele provoca o desequilíbrio dos mecanismos antioxidantes, favorecendo o estresse oxidativo. As enzimas  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Mg}^{++}$  ATPases dependem de compostos contendo grupos sulfidrilas, e a ação do mercúrio na glutathiona resulta em efeitos secundários nessas enzimas, prejudicando o funcionamento do sistema nervoso. A inibição das ATPases resulta na destruição dos astrócitos, que são responsáveis pela regulação da homeostase neuronal, envolvendo o controle de pH, Na/K e glutamato (NABI, 2014).

Os sintomas neurológicos ocasionados pela exposição ao mercúrio incluem ataxia (perda da coordenação motora), prejuízo da fala, constrição do campo visual, hipoestesia (perda ou diminuição da sensibilidade de determinada parte do corpo), disartria (fraqueza dos músculos usados na fala, resulta na fala arrastada), perda de audição e distúrbios sensoriais (NABI, 2014). O conjunto dos sintomas é denominado doença de Minamata, devido ao desastre ocorrido no Japão, durante a década de 1950, ocasionado pelo consumo de peixes contaminados por metilmercúrio. Alguns desses sintomas são observados nas populações indígenas e ribeirinhas avaliadas, como o prejuízo na função motora e cognitiva relatado entre os Munduruku adultos (OLIVEIRA, R. A. A. De *et al.*, 2021), o impacto na percepção visual das cores em crianças da região do Tapajós (DOS SANTOS FREITAS *et al.*, 2018) e déficits neurológicos em crianças Munduruku (PERINI *et al.*, 2021).

### *5.2 Fatores que influenciam a biodisponibilidade do metilmercúrio*

As emissões de mercúrio decorrentes do uso no garimpo não são o único fator responsável pela presença do contaminante na natureza. A derrubada das florestas, queimadas e construção de represas aumentam a biodisponibilidade do mercúrio de diferentes formas. A biomassa vegetal tem a capacidade de fixar o mercúrio elementar ( $\text{Hg}^0$ ) presente na atmosfera, diminuindo a disponibilidade do mercúrio para sofrer metilação e entrar na cadeia alimentar.

Porém, a queima da vegetação devolve o mercúrio captado para a atmosfera, e devido a ocorrência extensiva de queimadas na Amazônia, esta é a segunda principal causa de emissões antropogênicas na região (CRESPO-LOPEZ *et al.*, 2021).

A construção de represas para usinas hidrelétricas tem grande influência na mobilização de mercúrio no ambiente. As represas criam um ambiente favorável para a biotransformação do mercúrio, provendo condições físico-químicas ideais para a proliferação de bactérias metilantes. A abundância de bactérias metilantes promove a biotransformação de quantidades maiores de metilmercúrio, que somado ao ambiente isolado da represa, impede a migração dos peixes presentes, favorecendo a bioconcentração e biomagnificação do mercúrio *in loco* (CRESPO-LOPEZ *et al.*, 2021).

O caso da represa do Tucuruí exemplifica o impacto da construção de hidrelétricas na mobilização do mercúrio, pois é localizada em uma região de baixo impacto da atividade garimpeira, ainda assim, as populações próximas apresentam níveis de mercúrio no cabelo superiores ao recomendado pela OMS (ARRIFANO *et al.*, 2018). Atualmente existem mais de 400 hidrelétricas operacionais e mais de 300 em planejamento. O impacto desses empreendimentos deve ser conhecido e preponderado para a tomada de decisões na esfera pública, pois a construção de lagos artificiais pode tornar as taxas de metilação do mercúrio até sete vezes superior que os rios. A ocorrência concomitante do garimpo e da construção de represas na floresta amazônica tem um efeito sinérgico na exposição das populações humanas e da vida selvagem ao mercúrio (GERSON *et al.*, 2020).

A localização das populações afetadas tem influência nas concentrações de mercúrio identificados no cabelo, como foi demonstrado no extenso trabalho feito com as comunidades Munduruku. A avaliação de vários parâmetros relacionados à exposição dessas pessoas ao mercúrio, entre eles, a localização das três vilas estudadas em relação aos pontos de garimpo, demonstrou que os moradores da vila mais próxima ao garimpo tinham níveis significativamente superiores de mercúrio no cabelo (BASTA *et al.*, 2021). Ainda assim, outros estudos avaliando vilas distantes, sem registro de garimpo nas localidades, tem seus moradores com níveis de mercúrio capilar, ou seu pescado, com mercúrio muscular superior ao indicado como seguro pelas agências regulatórias.

O ciclo do mercúrio na natureza é dinâmico, e a existência de registros do uso de mercúrio para a extração de ouro ou prata em garimpos de diferentes regiões da América do

Sul, incluindo a Amazônia, datando desde o século XVI, influenciam na ubiquidade do mercúrio na região amazônica. A presença antiga do contaminante na natureza não pode ser considerada com conformismo, pois, soma-se aos muitos ataques que a floresta e seus moradores sofrem, desde a chegada dos portugueses, intensificado durante a ditadura militar (GALEANO, 1978), e novamente sob ataque de grileiros, posseiros e garimpeiros estimulados pela retórica do governo Bolsonaro (RORATO *et al.*, 2020).

O cenário ideal de enfrentamento e remediação dos danos causados pela presença do mercúrio requer o cessamento imediato de qualquer fonte de despejo de mercúrio na natureza, e a parada da derrubada e das queimadas da vegetação nativa, para estimular a captura do mercúrio atmosférico e a não liberação do mercúrio já fixado nas plantas de volta para o ciclo de metilação e absorção na cadeia alimentar. Mas essas medidas pouco têm efeito para as populações já afetadas, se não houver um esforço de expansão do sistema de saúde para o atendimento das populações mais isoladas, que já tiveram contato com o contaminante. Uma pesquisa realizada na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ainda não publicada, demonstra os efeitos da toxicidade mercurial são passados entre gerações através da herança epigenética. Através do modelo animal de exposição ao mercúrio, verificou-se que os filhos e os netos, que não sofreram exposição, apresentam o mesmo padrão de modificações epigenéticas que a matriarca exposta ao mercúrio.

### *5.3 Destino do ouro extraído na Amazônia*

O ouro extraído dos garimpos clandestinos usando mercúrio tem um destino mais abrangente do que a produção de joias. Recentemente foi noticiado que as grandes empresas de tecnologia, Google, Amazon, Apple e Microsoft usam ouro proveniente dos garimpos ilegais da Amazônia para a fabricação de circuitos de celulares e servidores (CAMARGOS, 2022). Existe pouca, senão nenhuma, alternativa aos serviços dessas quatro empresas, que são tão presentes no nosso cotidiano, quanto os celulares nos nossos bolsos. Portanto, é essencial a denúncia e a cobrança das corporações para o uso de materiais extraídos em condições éticas, que não provoquem a contaminação dos povos nativos, como na Amazônia, ou a geração de conflitos internos, como a extração do tântalo e do nióbio na República Democrática do Congo (KEAN, 2011).

## 6 CONCLUSÃO

As maiores vítimas da contaminação por mercúrio no Brasil são os povos indígenas da Amazônia. Os meios que levam ao despejo do metal tóxico ocorrem junto da ocupação irregular do território indígena por garimpeiros, que os expõem às violências mais bárbaras para a invasão dos sítios de extração do ouro. A tomada do território ocorre junto da perda da autonomia alimentar, com a contaminação do solo, dos rios e dos peixes. Os abusos sofridos pelos indígenas refletem a violência com que a sociedade branca, o mercado e o Estado, avança contra toda forma de subsistência que se oponha ao modelo capitalista de consumo. Esse modo de viver, típico das cidades, põe as pessoas em oposição à natureza.

Ailton Krenak, pensador e líder indígena denuncia em *Ideias para adiar o fim do mundo*, o modo de vida estimulado pelas corporações que transformam indivíduos em consumidores antes de qualquer outra característica, cuja subjetividade fica refém da mercadoria e dos bens de consumo. Esse processo é acompanhado por um modelo de progresso homogeneizante, que considera o nível de consumo como qualidade de vida, silenciando e relegando a marginalidade aqueles que possuem outras visões de mundo. Os modos de viver opostos a esse modelo de globalização pertencem às populações indígenas, quilombolas e aborígenes, que tentam manter sua conexão com a terra.

A alienação da humanidade do seu papel, como parte da natureza, resulta no tratamento dela como um recurso, visão oposta à que os indígenas da etnia Krenak tem do rio, por exemplo, que é considerado um parente, cuja existência é essencial para a sobrevivência do povo. O abuso da natureza tem suas consequências, que são tidas, pelos brancos, como o “fim do mundo”. Os indígenas sofrem com o contato com o homem branco desde a chegada dos europeus, que reduziram uma parcela população apenas pelas doenças que carregavam, para esses indígenas o fim do mundo ocorreu desde esse momento (KRENAK, 2020). A partir da visão de quem enfrenta o “fim do mundo” a gerações, Krenak nos convida para, diante da iminência da queda pelo colapso ambiental, que criemos paraquedas coloridos e pensemos alternativas para sobrevivermos e vivermos, mantendo a subjetividade humana e retornando o vínculo com a terra.

## **7 PERSPECTIVAS**

A Ciência Como Ela é é uma revista com foco na divulgação científica, desenvolvida como um projeto de extensão do Instituto de Ciências Básicas da Saúde (ICBS) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. A revista é publicada semestralmente e sua temática engloba diversas áreas da produção científica. O material de divulgação científica desenvolvido neste trabalho tem como perspectiva a publicação na revista A Ciência Como Ela é e em suas redes sociais, tornando disponível para o acesso e uso em sala de aula.

## 8 REFERÊNCIAS

- ARRIFANO, G. P. F. *et al.* Large-scale projects in the amazon and human exposure to mercury: The case-study of the Tucuruí Dam. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, [s. l.], v. 147, n. September 2017, p. 299–305, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.08.048>
- BASTA, P. C. *et al.* Mercury Exposure in Munduruku Indigenous Communities from Brazilian Amazon: Methodological Background and an Overview of the Principal Results. **International journal of environmental research and public health**, [s. l.], v. 18, n. 17, 2021. Available at: <https://doi.org/10.3390/ijerph18179222>
- BOISCHIO, A. A. P.; BARBOSA, A. Exposição ao mercúrio orgânico em populações Ribeirinhas do Alto Madeira, Rondônia, 1991: resultados preliminares TT - Exposure to organic mercury in riparian populations on the upper Madeira River, Rondonia, Brazil, 1991: preliminary results. **Cad Saude Publica**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 155–160, 1993. Available at: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-311X1993000200006&lng=en&nrm=iso&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-311X1993000200006&lng=en&nrm=iso&tlng=pt)
- BRABO, E. da S. *et al.* Níveis de mercúrio em peixes consumidos pela comunidade indígena de Sai Cinza na Reserva Munduruku, Município de Jacareacanga, Estado do Pará, Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, [s. l.], v. 15, n. 2, p. 325–332, 1999. Available at: <https://doi.org/10.1590/s0102-311x1999000200017>
- BRANCHES, F. J. P. *et al.* The price of gold: Mercury exposure in the amazonian rain Forest. **Clinical Toxicology**, [s. l.], v. 31, n. 2, p. 295–306, 1993. Available at: <https://doi.org/10.3109/15563659309000396>
- CAMARGOS, D. **Exclusivo: Apple, Google, Microsoft e Amazon usaram ouro ilegal de terras indígenas brasileiras**. [S. l.], 2022. Available at: <https://reporterbrasil.org.br/2022/07/exclusivo-apple-google-microsoft-e-amazon-usaram-ouro-ilegal-de-terras-indigenas-brasileiras/>. Acesso em: 24 ago. 2022.
- CHANG, L. W. Neurotoxic effects of mercury-A review. **Environmental Research**, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 329–373, 1977. Available at: [https://doi.org/10.1016/0013-9351\(77\)90044-5](https://doi.org/10.1016/0013-9351(77)90044-5)
- CHRISTIDOU, V.; DIMOPOULOS, K.; KOULALIDIS, V. Constructing social representations of science and technology: The role of metaphors in the press and the popular scientific magazines. **Public Understanding of Science**, [s. l.], v. 13, n. 4, p. 347–362, 2004. Available at: <https://doi.org/10.1177/0963662504044108>
- CLARKSON, T. W. Environmental contaminants in the food chain. **The American Journal of Clinical Nutrition**, [s. l.], v. 61, n. April, p. 682S-686S, 1995.
- CRESPO-LOPEZ, M. E. *et al.* Mercury: What can we learn from the Amazon? **Environment International**, [s. l.], v. 146, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106223>
- DE CASTRO, N. S. S.; LIMA, M. D. O. Hair as a biomarker of long term mercury exposure in brazilian amazon: A systematic review. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, [s. l.], v. 15, n. 3, p. 1–16, 2018. Available at: <https://doi.org/10.3390/ijerph15030500>
- DE CASTRO, N. S. S.; LIMA, M. de O. The disconnection between the Brazilian health information system and the cases of mercury exposure in Amazon. **Health Information**

**Management Journal**, [s. l.], v. 50, n. 1–2, p. 103–104, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1177/1833358319833063>

DE OLIVEIRA, D. F. *et al.* Mercury in wild animals and fish and health risk for indigenous Amazonians. **Food Additives and Contaminants: Part B Surveillance**, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 161–169, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1080/19393210.2020.1849410>

DE SOUZA QUEIROZ, M. L. *et al.* Abnormal antioxidant system in erythrocytes of mercury-exposed workers. **Human and Experimental Toxicology**, [s. l.], v. 17, n. 4, p. 225–230, 1998. Available at: <https://doi.org/10.1191/096032798678908567>

DE VASCONCELLOS, A. C. S. *et al.* Health risk assessment of mercury exposure from fish consumption in munduruku indigenous communities in the Brazilian Amazon. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, [s. l.], v. 18, n. 15, 2021. Available at: <https://doi.org/10.3390/ijerph18157940>

DOLBEC, J. *et al.* Methylmercury exposure affects motor performance of a riverine population of the Tapajos river, Brazilian Amazon. **International Archives of Occupational and Environmental Health**, [s. l.], v. 73, n. 3, p. 195–203, 2000. Available at: <https://doi.org/10.1007/s004200050027>

DOS SANTOS FREITAS, J. *et al.* Cross-sectional study to assess the association of color vision with mercury hair concentration in children from Brazilian Amazonian riverine communities. **NeuroToxicology**, [s. l.], v. 65, p. 60–67, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2018.02.006>

ETO, K. Minamata disease. **Neuropathology**, [s. l.], v. 20, n. s1, p. 14–19, 2000. Available at: <https://doi.org/10.1046/j.1440-1789.2000.00295.x>

FRIEDMAN, L.; DAVENPORT, C. **E.P.A. Weakens Controls on Mercury**. [S. l.], 2020. Available at: <https://www.nytimes.com/2020/04/16/climate/epa-mercury-coal.html>. Acesso em: 11 ago. 2022.

GALEANO, E. **As Veias Abertas da América Latina**. [S. l.]: L&PM, 1978.

GERSON, J. R. *et al.* Artificial lake expansion amplifies mercury pollution from gold mining. **Science Advances**, [s. l.], v. 6, n. 48, p. 1–8, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd4953>

HACON, S. de S. *et al.* Mercury exposure through fish consumption in traditional communities in the Brazilian Northern Amazon. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, [s. l.], v. 17, n. 15, p. 1–15, 2020. Available at: <https://doi.org/10.3390/ijerph17155269>

KEAN, S. **A colher que desaparece: E outras histórias reais de loucura, amor e morte a partir dos elementos químicos**. 1ª ed.ed. Rio de Janeiro: Zahar, 2011.

KRENAK, A. **Ideias para adiar o fim do mundo**. 2ª ed.ed. São Paulo - SP: Companhia das Letras, 2020.

MCINERNEY, C.; BIRD, N.; NUCCI, M. **The flow of scientific knowledge from lab to the lay public: The case of genetically modified food**. [S. l.: s. n.], 2004. ISSN 10755470.v. 26 Available at: <https://doi.org/10.1177/1075547004267024>

MENESES, H. do N. de M. *et al.* Mercury Contamination: A Growing Threat to Riverine and

Urban Communities in the Brazilian Amazon. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, [s. l.], v. 19, n. 5, p. 2816, 2022. Available at: <https://doi.org/10.3390/ijerph19052816>

MIURA, K. *et al.* The involvement of microtubular disruption in methylmercury-induced apoptosis in neuronal and nonneuronal cell lines. **Toxicology and Applied Pharmacology**, [s. l.], v. 160, n. 3, p. 279–288, 1999. Available at: <https://doi.org/10.1006/taap.1999.8781>

NABI, S. **Toxic Effects of Mercury**. [S. l.]: Springer, 2014.

OLIVEIRA, R. A. A. de *et al.* Neurological Impacts of Chronic Methylmercury Exposure in Munduruku Indigenous Adults: Somatosensory, Motor, and Cognitive Abnormalities. **International journal of environmental research and public health**, [s. l.], v. 18, n. 19, 2021. Available at: <https://doi.org/10.3390/ijerph181910270>

PERINI, J. A. *et al.* Genetic polymorphism of delta aminolevulinic acid dehydratase (Alad) gene and symptoms of chronic mercury exposure in munduruku indigenous children within the brazilian amazon. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, [s. l.], v. 18, n. 16, 2021. Available at: <https://doi.org/10.3390/ijerph18168746>

RODRÍGUEZ MARTÍN-DOIMEADIOS, R. C. *et al.* Comparative study of mercury speciation in commercial fishes of the Brazilian Amazon. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], v. 21, n. 12, p. 7466–7479, 2014. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2680-7>

RORATO, A. C. *et al.* Brazilian amazon indigenous peoples threatened by mining bill. **Environmental Research Letters**, [s. l.], v. 15, n. 10, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abb428>

SCUDELLARI, M. How the coronavirus infects our cells. **Nature**, [s. l.], v. 595, n. July, p. 640–644, 2021. Available at: <https://www.nature.com/articles/d41586-021-02039-y>

SILVA, H. C. O Que É Divulgação Científica? **Ciências & Ensino**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 53–59, 2006.

SIQUEIRA-GAY, J.; SÁNCHEZ, L. E. The outbreak of illegal gold mining in the Brazilian Amazon boosts deforestation. **Regional Environmental Change**, [s. l.], v. 21, n. 2, p. 1–5, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01761-7>

SISINNO, C. L. S.; OLIVEIRA-FILHO, E. C. **Princípios de Toxicologia Ambiental**. 1ª eded. [S. l.: s. n.], 2013.

THE LANCET. Minamata Convention on mercury: a contemporary reminder. **The Lancet**, [s. l.], v. 390, n. 10097, p. 822, 2017. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)32287-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)32287-0)

UNEP. **Global Mercury Assessment**. This report presents sources of mercury emissions to air and water. It presents estimates of anthropogenic emissions to air from various sources based on data from 2010 and estimates for releases to aquatic environment. The report also presents the latest information on atmospheric and aquatic chemistry, fate and transport. It is an overall summary report for the policy makers based on a technical background report. 2018.

VEGA, C. M. *et al.* Human mercury exposure in yanomami indigenous villages from the Brazilian Amazon. **International Journal of Environmental Research and Public Health**,

[s. l.], v. 15, n. 6, p. 1–13, 2018. Available at: <https://doi.org/10.3390/ijerph15061051>

VENEU, F.; AMORIM, L. H.; MASSARANI, L. Da fonte ao leitor : a acomodação do discurso científico em jornais da América Latina. **Science Communication**, [s. l.], v. 7, n. March, p. 1–9, 2008.

VIEIRA OLIVEIRA, M. *et al.* Uma Discussão Acerca Do Que É Fazer Ciência: Algumas Considerações Sobre Comunicação E Divulgação Científica Para a Promoção Da Saúde. [s. l.], v. 24, n. 2, p. 53–62, 2012.

WHEELER, M. Measuring mercury. **Environmental Health Perspectives**, [s. l.], v. 104, n. 8, p. 826–830, 1996. Available at: <https://doi.org/10.1289/ehp.96104826>

WHO. Artisanal and small-scale gold mining and health-Technical Paper #1: Environmental and Occupational Health Hazards Associated With Artisanal and Small-Scale Gold Mining. **Department of Public Health, Environmental and Social Determinants of Health (PHE), World Health Organization**, [s. l.], p. 1–36, 2016. Available at: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/247195>

ZONTA, M. **Serra Pelada: Sonhos, violência e miséria**. [S. l.], 2013. Available at: <https://mst.org.br/2013/12/04/serra-pelada-sonhos-violencia-e-miseria/>. Acesso em: 11 ago. 2022.

## 9 APÊNDICE – Kit didático

### 9.1 Cards informativos

Figura 1

**Você provavelmente sabe que o garimpo destrói a Floresta Amazônica, mas você já ouviu falar nos riscos do metilmercúrio?**



<https://www.brasildefato.com.br/2021/08/15/pedidos-de-autorizacao-para-garimpo-no-amazonas-dispara-342-em-2020>

Figura 2

O garimpo é a principal fonte de mercúrio na Amazônia.

O mercúrio é usado para auxiliar na extração do ouro, formando uma liga com ele. Para liberar o ouro do mercúrio, essa mistura é aquecida até o mercúrio evaporar para a atmosfera.



O mercúrio sofre uma série de reações após ser despejado na natureza, que culminam na sua incorporação na cadeia alimentar.

Figura 3

O mercúrio evaporado é liberado na atmosfera, onde reage com as nuvens e é despejado pela chuva no solo e nos rios.



Nos rios, o mercúrio entra em contato com bactérias metanogênicas, que provocam reações químicas que transformam o mercúrio em metilmercúrio.



O metilmercúrio é a forma mais perigosa do mercúrio.

Figura 4

A incorporação do metilmercúrio na cadeia alimentar começa quando ele se agrega ao fitoplâncton, que é consumido por pequenos peixes, que viram alimento dos peixes maiores.

Gradualmente o metilmercúrio atinge bioconcentrações maiores nos peixes, até eles serem pescados e consumidos por pessoas.

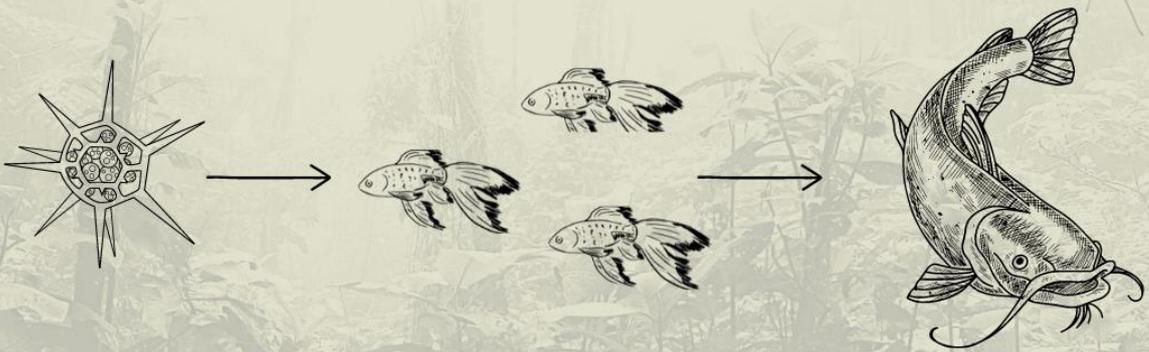
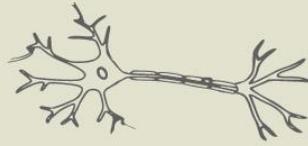


Figura 5



A ingestão de peixes contaminados por metilmercúrio representa um grande risco para as populações que dependem da pesca como principal fonte de alimentos.

O metilmercúrio é uma neurotoxina, pois tem afinidade com lipídios, e por isso, é capaz de cruzar membranas celulares, se depositando no cérebro e causando **problemas neurológicos**.

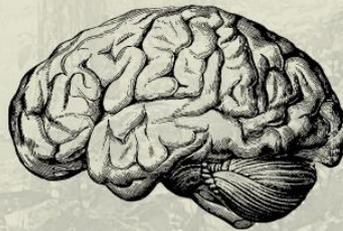


Figura 6



A capacidade de cruzar membranas biológicas permite que o metilmercúrio cruze a placenta e se deposite no sistema nervoso em desenvolvimento dos fetos, o que resulta em déficits cognitivos severos.

Por isso, gestantes e crianças pequenas são os principais grupos de risco para exposição por metilmercúrio.

Figura 7



**Brasil volta ao Mapa da Fome das Nações Unidas**

Um país entra no Mapa da Fome quando mais de 2,5% da população enfrentam falta crônica de alimentos. No Brasil, a fome crônica atingiu agora 4,1% e, pelo levantamento, a situação no país é mais grave do que a média global.

Por Jornal Nacional  
06/07/2022 21h37 · Atualizado há 2 meses

<https://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2022/07/06/brasil-volta-ao-mapa-da-fome-das-nacoes-unidas.ghtml>

A insegurança alimentar põe as populações indígenas e ribeirinhas em grande risco de exposição ao metilmercúrio, pela dependência da pesca para a alimentação.

Somada ao isolamento geográfico que dificulta o acesso aos serviços de saúde pública, essas populações se tornam mais vulneráveis à contaminação por mercúrio na Amazônia.

Figura 8

O Brasil possui mais de 300 etnias indígenas, muitas delas estão em risco pela contaminação por metilmercúrio na Amazônia.

Proteger nossos povos originários dos avanços do garimpo significa garantir a existência da Floresta Amazônica para as próximas gerações.



<https://pib.socioambiental.org/pt/Povo:Yanomami>

## 9.2 Texto informativo

# Os impactos do mercúrio: do garimpo até o prato

**Renata Krüger Martins**

## O mercúrio

Se você já teve febre provavelmente teve de medir sua temperatura com um termômetro. Hoje em dia existem termômetros digitais, mas até alguns anos atrás os termômetros de mercúrio eram a única opção. O mercúrio é um metal, mas diferente dos outros metais que só podem ser derretidos em altas temperaturas, ele ocorre no estado líquido em temperatura ambiente. Os termômetros antigos usavam capacidade de dilatação do mercúrio, em resposta ao aumento de temperatura, para medi-la. O mercúrio é um metal versátil, tem vários usos na indústria e serviu para muitas funções ao longo da história - nem todas com comprovação científica.

Aqui no Brasil, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) proibiu o uso do mercúrio em termômetros a partir de 2019, por isso eles foram substituídos pelos termômetros digitais. Isso foi feito porque o mercúrio é tóxico, e vem sendo alvo de diversas campanhas para reduzir e acabar com o seu uso pelo risco que representa para natureza e a saúde humana, **mas por que o mercúrio é perigoso?**

O mercúrio nos termômetros ocorre na forma metálica, que na química é chamada de inorgânica. Quando o mercúrio inorgânico é liberado na natureza, no solo ou na água dos rios, ele sofre reações provocadas pelas bactérias que vivem ali. As bactérias transformam o mercúrio inorgânico em orgânico, que é chamado de **metilmercúrio**. O metilmercúrio é a forma mais perigosa em que o mercúrio pode ser encontrado, isso por quê, essa forma do mercúrio é lipofílica, tem afinidade por moléculas lipídicas. As células, nas pessoas e nos animais, são envoltas por uma membrana lipídica, por isso, o metilmercúrio se acumula facilmente nelas.

Na natureza, o metilmercúrio, produzido pelas bactérias a partir do mercúrio inorgânico, pode ser absorvido por organismos minúsculos presentes em corpos d'água, os fitoplânctons. Esses microrganismos contendo metilmercúrio são consumidos pelos peixes e crustáceos pequeninos, que viram alimento dos maiores, e por aí vai... conforme a cadeia alimentar. Por ficar retido nas células, o metilmercúrio não volta para o ambiente, e passa a fazer parte da carne dos peixes. Chamamos de bioacumulação a acumulação de um contaminante nos tecidos, pele, gordura ou

músculos, dos animais. Conforme a cadeia alimentar, os animais carnívoros, organismos do topo da cadeia, acumulam quantidades maiores de mercúrio do que os herbívoros, esse fenômeno é chamado de biomagnificação trófica. A presença do metilmercúrio nos peixes torna eles perigosos para o consumo, sendo uma fonte de contaminação para quem comer.

### **Como o mercúrio vai parar nos rios?**

O mercúrio pode ser usado para muitas funções, uma delas é para facilitar a extração de ouro dos garimpos. No Brasil, existem muitos garimpos na floresta Amazônica, extraindo ouro da beira, ou do fundo dos rios. O ouro é tirado da terra em pedacinhos minúsculos, misturados com areia, barro e outras substâncias. Depois de separar a sujeira, o garimpeiro usa o mercúrio para juntar os pedacinhos de ouro em um pedaço maior, para isso ele mistura o mercúrio com o ouro. O mercúrio tem a capacidade de grudar no ouro, formando uma liga chamada de **amálgama**, que é esquentada, até o evaporar e só restar um pedaço valioso de ouro ali.

O uso do mercúrio no garimpo do ouro é uma das principais fontes de contaminação por metilmercúrio no Brasil. A queima da amálgama é feita sem mecanismos de recaptção do vapor, que é liberado na atmosfera, cai junto da chuva e vai parar nos rios, onde o mercúrio sofre metilação e bioacumulação na fauna aquática.

Portanto, o garimpo do ouro contribui diretamente com a contaminação dos peixes por metilmercúrio na Amazônia. Isso representa um grande risco para quem pesca para se alimentar nas regiões próximas aos pontos de garimpo. Alguns fatores tornam os povos indígenas e ribeirinhos especialmente vulneráveis à essa via de intoxicação, entre eles, a pobreza, que os torna dependentes da pesca como principal fonte de proteína para alimentação, e o isolamento geográfico, que dificulta o acesso ao sistema de saúde. Diversas pesquisas realizadas nas últimas décadas indicaram a presença do metilmercúrio em peixes pescados na Amazônia, apontando maiores concentrações em peixes carnívoros do que em herbívoros, confirmando a ocorrência da biomagnificação trófica do mercúrio.

Devido a existência de metilmercúrio nos peixes amazônicos, mais estudos foram feitos para avaliar a presença do mercúrio bioacumulado nas pessoas que consumiram os peixes contaminados. Uma forma de avaliar a presença do contaminante, em seres humanos, é através da análise de amostras de cabelo. O mercúrio é incorporado no cabelo enquanto ele é formado, isso o torna um bom biomarcador. A Organização Mundial da Saúde (OMS) estabelece níveis máximos considerados seguros de mercúrio no cabelo, que são ultrapassados em praticamente todas as aldeias cujos habitantes foram avaliados.

A contaminação por metilmercúrio tem consequências graves, pois ele é uma neurotoxina que reage com diferentes partes do sistema nervoso, prejudicando-o de variadas formas. Nosso cérebro é isolado da circulação do resto do corpo por uma estrutura chamada de barreira hematoencefálica, ela protege o cérebro de patógenos e contaminantes, mas o metilmercúrio por ser lipofílico, é capaz de atravessá-la. Outra barreira celular que o metilmercúrio pode transpor é a placenta, que controla a troca de substâncias entre a mãe e o feto.

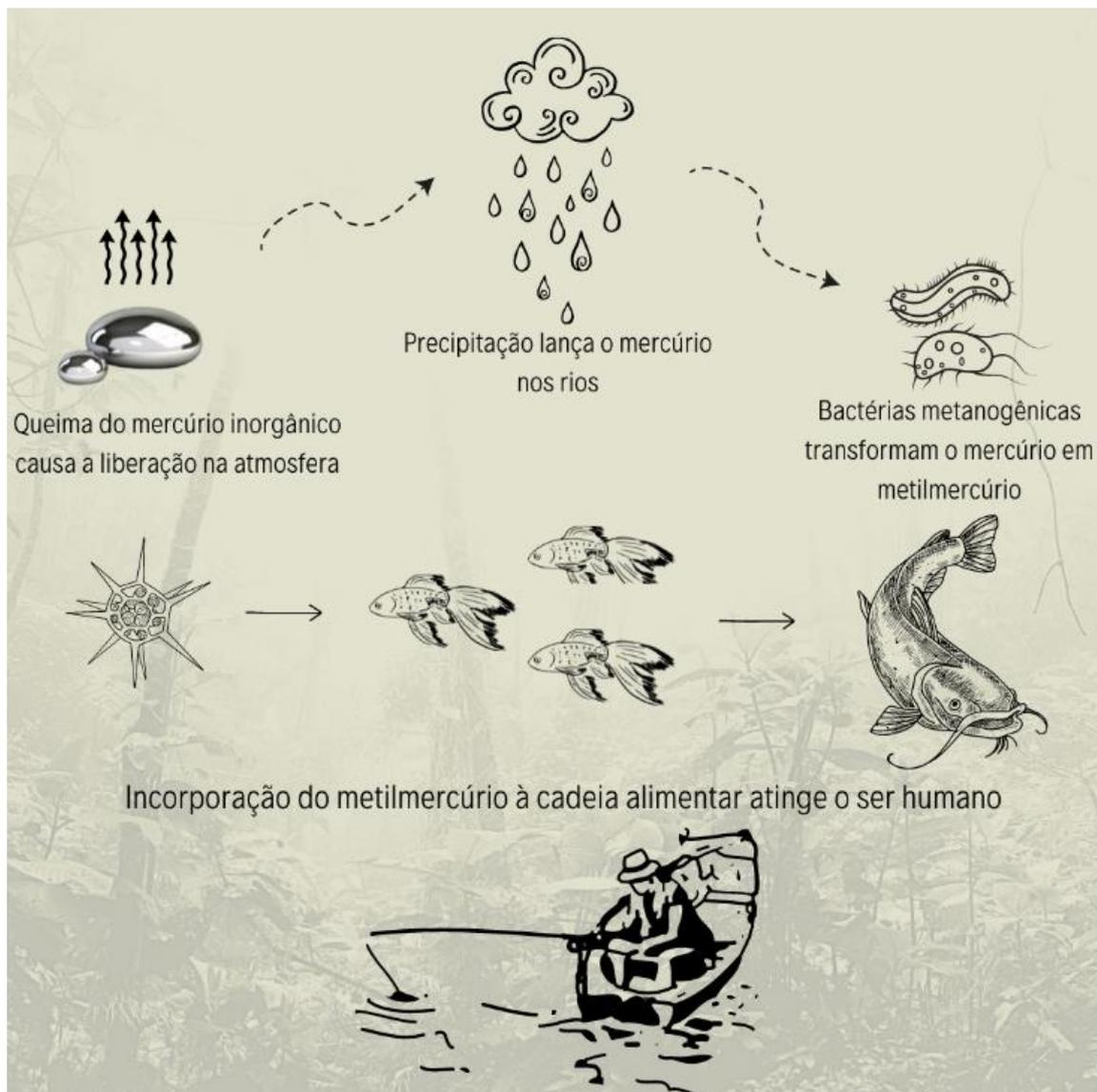
No sangue, o metilmercúrio se liga às proteínas que compõem os glóbulos vermelhos, e assim, pode viajar por todo corpo através da corrente sanguínea, atravessando a barreira hematoencefálica e se depositando no cérebro. Em contato com o cérebro, ele perturba a organização delicada que coordena muitas funções exercidas pelo sistema nervoso, afetando, entre outras coisas, as taxas de liberação e captação dos neurotransmissores, que controlam os sinais nervosos. Em adultos, isso afeta funções como a movimentação dos braços e pernas, a sensibilidade das mãos, e os sentidos como a visão, a audição e a capacidade de falar. Em fetos e crianças pequenas, cujo sistema nervoso ainda está em desenvolvimento, os efeitos da contaminação por mercúrio podem ser muito mais severos, com o prejuízo do desenvolvimento das estruturas do sistema nervoso causando deficiência intelectual grave.

Uma pesquisa em andamento, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, tem demonstrado que os efeitos do mercúrio podem não ser restritos às pessoas que sofreram a exposição. Através de um modelo animal, utilizando ratos, foi demonstrado que a contaminação pode causar modificações epigenéticas, que são passadas de geração em geração. A epigenética investiga como estímulos ambientais podem influenciar na expressão dos genes, o que influencia diretamente a saúde. Isso significa, que é possível que os filhos e netos das pessoas que sofreram com a exposição ao mercúrio podem também apresentar os sintomas da contaminação, mesmo sem nunca ter contato com o contaminante.

Além do uso no garimpo do ouro, existem outros fatores que afetam a disponibilidade do mercúrio na natureza. Por exemplo, as plantas são capazes de absorver o mercúrio atmosférico antes que ele atinja o solo e os rios e sofra metilação, retendo-o na matéria vegetal, por isso, as queimadas contribuem para devolver o mercúrio para atmosfera. A construção de represas para usinas hidrelétricas também afeta a dinâmica do mercúrio na natureza, pois, a inundação de regiões cria ambientes favoráveis para a metilação do mercúrio. A presença do mercúrio na Amazônia é inegável, e é de grande importância conhecer seus impactos para que se possa ir atrás de soluções eficazes que melhorem a qualidade de vida das populações que são mais vulneráveis aos efeitos da contaminação.

### **Usos do mercúrio ao longo da história**

Os primeiros relatos escritos do uso do mercúrio foram feitos por Aristóteles, que chama o composto de “prata fluida” – essa noção de que o mercúrio se parece com a prata, só que no estado líquido, é evidente quando vemos o nome do mercúrio na tabela periódica, com o símbolo Hg, originado da palavra *Hydragyrum*, que no Latim significa algo como “água de prata”. O cinábrio, um composto de mercúrio, era usado pelos homens das cavernas para fazer pinturas rupestres. Durante as expedições de desbravamento da costa oeste dos Estados Unidos, no século XIX, os exploradores carregavam pílulas que continham mercúrio. Os médicos, naquela época, acreditavam que o metal tinha capacidades medicinais expurgatórias, pois causava intensa diarreia em quem consumia os comprimidos. Atualmente se sabe que o mercúrio é tóxico e apesar de não ter melhorado a saúde de quem o consumiu, essas pílulas auxiliam o trabalho de arqueólogos, que puderam traçar as rotas da expedição a partir dos depósitos de mercúrio que existem até hoje, nos locais onde os viajantes cavaram suas latrinas.



### Referências

CRESPO-LOPEZ, M. E. et al. Mercury: What can we learn from the Amazon? *Environment International*, [s. l.], v. 146, 2021.

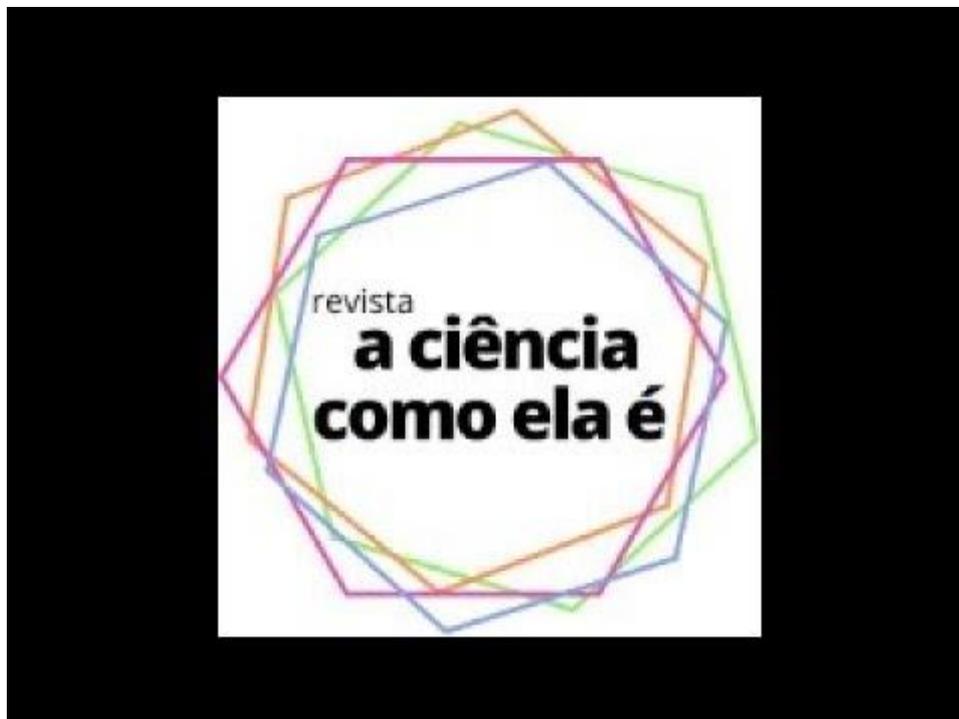
DAMAS, G. B.; BERTOLDO, B.; COSTA, L. T. Mercury: From antiquity to nowadays. *Revista Virtual de Química*, [s. l.], v. 6, n. 4, p. 1010–1020, 2014.

KEAN, S. *A colher que desaparece: E outras histórias reais de loucura, amor e morte a partir dos elementos químicos*. 1a ed.ed. Rio de Janeiro: Zahar, 2011.

### 9.3 Vídeos

Vídeo 1:

Impactos do Mercúrio na Saúde das Populações Indígenas e Ribeirinhas – Bioacumulação



<https://youtu.be/aG7spRpWOG0>

Vídeo 2:

Contaminação por Mercúrio em Indígenas e Ribeirinhos



<https://youtu.be/GCzFzcjRSW0>