

**METILMERCÚRIO EM
PESCADOS DA AMAZÔNIA
BRASILEIRA:
BIOMARCADORES DE
EXPOSIÇÃO,
NEUROTOXICIDADE E
RISCOS À SAÚDE DE
POPULAÇÕES
TRADICIONAIS**

**METHYLMERCURY IN FISH FROM THE BRAZILIAN AMAZON: EXPOSURE
BIOMARKERS, NEUROTOXICITY, AND HEALTH RISKS TO TRADITIONAL
POPULATIONS**

Ciências Biológicas, Ciências da Saúde • 12/10/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/791782067](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/791782067)

Jaqueline Assunção Vieira¹

Jhonatan Calel de Moura²

RESUMO

O consumo frequente de pescado na Amazônia brasileira constitui uma importante via de exposição ao metilmercúrio, especialmente entre populações ribeirinhas e indígenas. Este estudo teve como objetivo analisar a exposição ao metilmercúrio decorrente do consumo de pescados na Amazônia brasileira, com ênfase na neurotoxicidade, nos biomarcadores de exposição e nos impactos à saúde das populações tradicionais. Foi realizada uma revisão bibliográfica, de caráter descritivo e abordagem qualitativa, a partir de buscas nas bases PubMed/MEDLINE, SciELO, BVS e Google Acadêmico, complementadas por busca nas referências dos estudos selecionados. Foram analisadas 19 publicações, organizadas em três eixos: contaminação e biomagnificação do mercúrio em pescados; mecanismos de neurotoxicidade; e riscos à saúde associados à exposição. Os estudos evidenciaram maiores concentrações de mercúrio em espécies piscívoras e de níveis tróficos superiores, além de situações de exposição elevada associadas ao consumo frequente de pescado. Entre os efeitos relacionados à exposição, foram descritos estresse oxidativo, alterações neurológicas, comprometimento cognitivo e alterações do neurodesenvolvimento, com destaque para crianças e populações expostas durante a gestação. O cabelo foi o principal biomarcador utilizado nos estudos populacionais. Conclui-se que a exposição alimentar ao metilmercúrio constitui uma questão relevante de saúde pública na Amazônia, permanecendo necessárias pesquisas longitudinais, ampliação do monitoramento em áreas pouco estudadas e integração entre vigilância ambiental e atenção à saúde.

Palavras-chave: Metilmercúrio; Pescado; Neurotoxicidade; Amazônia; Saúde pública.

ABSTRACT

Frequent fish consumption in the Brazilian Amazon is an important route of methylmercury exposure, particularly among riverine and Indigenous populations. This study aimed to analyze methylmercury exposure associated with fish consumption in the Brazilian Amazon, focusing on neurotoxicity, exposure biomarkers, and health impacts on traditional populations. A descriptive qualitative bibliographic review was conducted using PubMed/MEDLINE, SciELO, BVS, and Google Scholar, complemented by reference screening of selected studies. Nineteen publications were analyzed and organized into three main areas: mercury contamination and biomagnification in fish; neurotoxic mechanisms; and health risks associated with exposure. The studies showed higher mercury concentrations in piscivorous and higher-trophic-level fish, as well as elevated exposure associated with frequent fish consumption. Reported effects included oxidative stress, neurological alterations, cognitive impairment, and neurodevelopmental changes, particularly among children and individuals exposed during pregnancy. Hair was the main biomarker used to assess exposure in population studies. It is concluded that dietary methylmercury exposure represents a relevant public health concern in the Amazon, highlighting the need for longitudinal studies, expanded monitoring in understudied areas, and integration between environmental surveillance and health care.

Keywords: Methylmercury; Fish; Neurotoxicity; Amazon; Public health.

1. INTRODUÇÃO

O mercúrio é um contaminante que pode estar presente naturalmente no ambiente, mas também pode ser liberado ou

redistribuído por atividades humanas, como o garimpo de ouro, o desmatamento e a construção de reservatórios. Quando chega aos ambientes aquáticos, parte desse mercúrio pode ser transformada por microrganismos em metilmercúrio, uma forma mais tóxica que pode ser absorvida pelos organismos e permanecer em seus tecidos. Ao longo da cadeia alimentar, o contaminante tende a se acumular, fazendo com que peixes maiores e que se alimentam de outros peixes apresentem concentrações mais elevadas de mercúrio (Castilho *et al.*, 2026).

Esse processo apresenta especial importância na Amazônia brasileira, onde o consumo de pescado faz parte da alimentação, da cultura e da subsistência de muitas populações ribeirinhas e indígenas. Para essas comunidades, o peixe representa uma importante fonte de proteína e está presente de forma frequente na alimentação. Assim, a presença de mercúrio nos pescados ultrapassa a dimensão ambiental e passa a representar uma preocupação relacionada à saúde humana. A ocorrência do contaminante em espécies consumidas pela população reforça a necessidade de compreender os riscos associados à exposição por meio da alimentação (Costa *et al.*, 2022).

A principal preocupação relacionada ao consumo de peixes contaminados está nos efeitos que o metilmercúrio pode provocar no sistema nervoso. Após ser ingerido, o composto pode passar do sistema digestório para o sangue e alcançar diferentes tecidos do organismo, inclusive o cérebro. Nesse local, pode interferir no funcionamento das células nervosas, favorecer o estresse oxidativo, prejudicar a produção de energia e comprometer mecanismos envolvidos na comunicação entre os neurônios. Esses efeitos podem ser especialmente preocupantes durante a gestação e a infância,

períodos em que o sistema nervoso está em intenso processo de formação e desenvolvimento.

Diante desse cenário, surge a seguinte questão norteadora: quais são os principais mecanismos pelos quais o metilmercúrio pode causar danos ao sistema nervoso em pessoas expostas pelo consumo de pescado na Amazônia brasileira e quais são os possíveis impactos dessa exposição sobre a saúde das populações tradicionais?

A realização desta pesquisa se justifica pela importância do pescado para a alimentação, a cultura e a subsistência de diferentes populações amazônicas. A retirada desse alimento não constitui uma solução simples, considerando suas implicações nutricionais, econômicas e culturais. Assim, torna-se necessário compreender a contaminação, os efeitos do metilmercúrio e os grupos mais vulneráveis, contribuindo para a discussão sobre os riscos à saúde pública.

Para tanto, este estudo tem como objetivo geral analisar a exposição ao metilmercúrio decorrente do consumo de pescados na Amazônia brasileira, com ênfase na neurotoxicidade, nos biomarcadores de exposição e nos impactos à saúde das populações tradicionais. Especificamente, busca-se investigar a ocorrência do contaminante nos pescados e os processos de bioacumulação e biomagnificação; analisar os mecanismos relacionados aos danos ao sistema nervoso; e avaliar os riscos à saúde, considerando os biomarcadores de exposição e os grupos mais vulneráveis.

Quanto aos procedimentos metodológicos, trata-se de uma pesquisa de natureza teórico-bibliográfica e abordagem qualitativa,

desenvolvida a partir do levantamento, seleção e análise de produções científicas relacionadas ao metilmercúrio, à contaminação de pescados, à neurotoxicidade, aos biomarcadores de exposição e aos impactos à saúde das populações tradicionais da Amazônia brasileira. A análise das publicações selecionadas busca reunir evidências sobre a ocorrência do contaminante nos pescados, os mecanismos envolvidos nos danos ao sistema nervoso e os principais riscos associados à exposição humana.

O presente trabalho está organizado em cinco seções, além das referências. A primeira corresponde a esta introdução, na qual são apresentados o tema, a problematização, a justificativa, os objetivos, a metodologia e a organização do estudo. A segunda seção apresenta o referencial teórico, abordando a presença do mercúrio na Amazônia, a contaminação dos pescados, os processos de bioacumulação e biomagnificação, os mecanismos de neurotoxicidade e os biomarcadores relacionados à exposição. A terceira seção apresenta os procedimentos metodológicos utilizados na realização da pesquisa. A quarta seção reúne os resultados e a discussão, relacionando as evidências encontradas na literatura aos três principais eixos do estudo: contaminação e exposição, efeitos neurotóxicos e riscos à saúde das populações tradicionais. Por fim, a quinta seção apresenta as considerações finais, retomando os principais achados da pesquisa e suas implicações para a saúde pública e para a realidade das populações amazônicas.

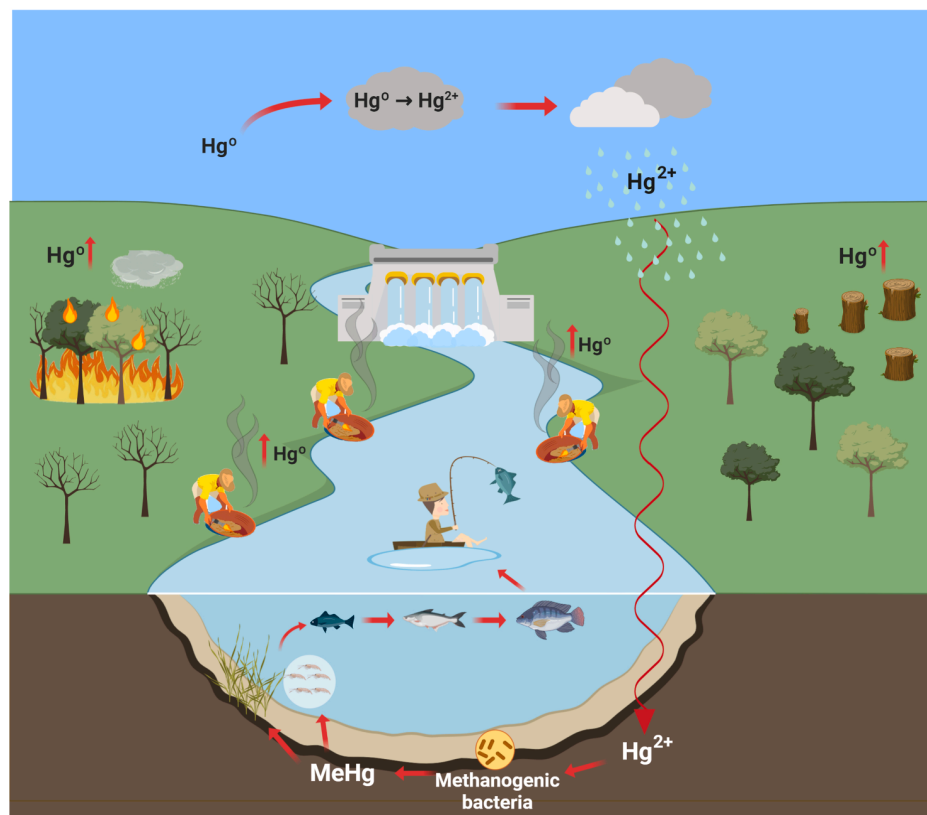
2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Metilmercúrio na Amazônia: Fontes, Bioacumulação e Biomagnificação

O mercúrio amazônico tem duas origens que se sobrepõem no território, mas não se confundem em natureza. Parte do metal já está no solo, depositada por processos geoquímicos antigos, e é remobilizada para os rios pelo desmatamento, pela erosão e, de forma mais abrupta, pelo alagamento de grandes áreas para reservatórios hidrelétricos (Carvalho; Hacon, 2016). A outra fonte é direta: o garimpo de ouro, que ainda emprega mercúrio metálico na amalgamação do minério e o devolve ao ambiente pela água ou pelo ar, de onde ele retorna ao solo por deposição atmosférica (Jacques *et al.*, 2025).

É no sedimento dos rios e igarapés que esse mercúrio inorgânico muda de natureza. Bactérias sulforredutoras, favorecidas pela baixa oxigenação e pela matéria orgânica dos ambientes alagados, convertem-no em metilmercúrio. A forma orgânica entra rapidamente na base da cadeia alimentar aquática (fitoplâncton, perifíton, macroinvertebrados) e, dali, alcança os peixes.

Figura 1. Dinâmica do mercúrio na Amazônia: emissão por garimpo, queimadas e desmatamento, transporte atmosférico, deposição, metilação bacteriana e entrada na cadeia alimentar aquática



Fonte: Crespo-Lopez et al. (2021, p. 2).

Essa distinção entre mercúrio total e metilmercúrio merece atenção metodológica, porque a maior parte dos estudos ecotoxicológicos revisados nesta pesquisa não determina diretamente a fração orgânica do metal, e sim o mercúrio total (Hg-T) presente na amostra, por meio de espectrofotometria de absorção atômica de vapor frio. A equivalência entre as duas medidas é sustentada por evidência prévia de que mais de 90% do mercúrio presente no músculo de peixes se encontra na forma de metilmercúrio, o que permite tratar o Hg-T muscular como uma aproximação confiável da concentração de metilmercúrio, sem que as duas grandezas sejam, do ponto de vista analítico, idênticas. Essa aproximação, adotada explicitamente por Vasconcellos *et al.* (2022) e implicitamente pela maioria dos demais estudos ecotoxicológicos aqui reunidos, tende a ser mais robusta no tecido muscular do que em outras matrizes, como fígado e sedimento, nas quais a proporção de mercúrio inorgânico pode ser maior. Por essa razão, ao longo desta revisão o termo metilmercúrio é empregado para descrever a exposição

humana por via alimentar, ao passo que os valores relatados em estudos de biomonitoramento de peixe correspondem, majoritariamente, a determinações de mercúrio total, cuja conversão para metilmercúrio é uma inferência, e não uma medição direta.

O organismo não elimina o metilmercúrio com facilidade. Por isso ele se acumula tanto na vida de um único indivíduo, o que se chama bioacumulação, quanto entre os níveis de uma mesma cadeia trófica, fenômeno denominado biomagnificação. Um peixe piscívoro carrega, em regra, o mercúrio de todas as presas que consumiu ao longo da vida.

Essa lógica trófica aparece de forma recorrente nos estudos de campo. Costa *et al.* (2022) encontraram, na corvina do rio Machado, em Rondônia, concentrações musculares e hepáticas de mercúrio acima do limite da Organização Mundial da Saúde para consumo humano, resultado que já havia sido antecipado por Bastos *et al.* (2008) na mesma bacia. Castilho *et al.* (2026), em rio impactado por garimpo no Mato Grosso, chegaram a fatores de biomagnificação maiores justamente entre as espécies predadoras, e não entre as onívoras ou herbívoras da mesma comunidade aquática. Tucunarés, traíras e bagres de topo de cadeia repetem esse padrão em diferentes bacias amazônicas, o que faz da posição trófica, mais do que da localização geográfica isolada, o melhor preditor da carga de mercúrio de um peixe.

A relevância sanitária desse padrão nasce do prato, não apenas do rio. Comunidades ribeirinhas e indígenas consomem pescado muito acima da média nacional, frequentemente como única fonte de proteína animal disponível. Pequenas variações na concentração de

metilmercúrio dos peixes, nesse contexto, não são um detalhe ecotoxicológico: traduzem-se em exposição humana continuada, silenciosa e cumulativa.

Vasconcellos *et al.* (2022), ao analisarem 75 espécimes de peixes de vinte espécies coletados na bacia do rio Branco, em Roraima, também confirmaram a relação entre nível trófico e concentração de mercúrio. As concentrações variaram de 0 a 3,159 microgramas por grama; a média entre as espécies não carnívoras foi de 0,116 microgramas por grama, enquanto entre as espécies carnívoras a média alcançou 0,869 microgramas por grama. Os autores identificaram, ainda, diferenças relevantes entre os pontos de coleta, com maior prevalência de contaminação nos rios Mucajaí e Uraricoera, áreas sob maior influência da atividade garimpeira ilegal, quando comparados a pontos de coleta no rio Branco na capital Boa Vista.

Vale registrar que nem todo peixe amazônico oferece o mesmo risco, e essa diferença não é aleatória. Bastos *et al.* (2008), ao descreverem o mercúrio em peixes da bacia do rio Madeira, já demonstravam variação expressiva de concentração conforme o hábito alimentar da espécie, espécies piscívoras muito acima das demais, num gradiente que outros trabalhos, quase quinze anos depois, continuariam confirmando. Matos *et al.* (2025), na bacia do rio Teles Pires, no sul da Amazônia, repetiram esse achado ao comparar peixes piscívoros e detritívoros de uma mesma comunidade aquática: os primeiros carregavam concentrações de mercúrio muito superiores às dos segundos, mesmo estando ambos expostos ao mesmo corpo d'água.

Essa regularidade, presente em bacias tão distantes entre si quanto o Madeira, o Machado e o Teles Pires, sugere algo mais do que coincidência regional. Aponta para um mecanismo ecológico geral, replicável em qualquer sistema aquático amazônico onde exista mercúrio disponível na base da cadeia alimentar: a posição trófica do peixe, e não apenas a localização do rio, determina o risco individual de contaminação. Essa constatação tem consequência prática direta, que será retomada adiante, ao permitir pensar estratégias de manejo alimentar baseadas na espécie consumida, e não somente na origem geográfica do pescado.

A magnitude da atividade garimpeira ajuda a explicar por que esse cenário se agravou nas últimas décadas. Estima-se que, desde o início da mineração artesanal de ouro na Amazônia, na década de 1970, cerca de 200 toneladas de mercúrio sejam liberadas anualmente no ambiente (Bezerra de Oliveira *et al.*, 2022). Parte desse mercúrio metálico infiltra-se diretamente nos corpos d'água durante o processo de amalgamação, enquanto outra parte é volatilizada para a atmosfera e retorna à superfície por deposição seca ou úmida, muitas vezes distante do ponto original de emissão. Esse duplo caminho, aquático e atmosférico, amplia o alcance geográfico da contaminação para além dos limites imediatos das áreas de garimpo.

A disponibilidade de metilmercúrio para a biota também depende de características físico-químicas do ambiente aquático, e não apenas da quantidade total de mercúrio presente. Águas com maior concentração de matéria orgânica dissolvida, menor oxigenação e pH mais baixo tendem a favorecer a atividade das bactérias metiladoras, o que explica por que ambientes lênticos, como lagos de várzea e reservatórios, costumam apresentar maior eficiência de

metilação do que trechos de correnteza mais rápida. Cabrera Monteiro *et al.* (2026), ao compararem um lago de várzea natural a um canal de irrigação construído na bacia do Araguaia, mostraram que a biomagnificação do mercúrio se mantém mesmo em ambientes profundamente modificados pelo ser humano, ainda que a magnitude absoluta da contaminação possa variar conforme as características hidrológicas de cada sistema.

Antes de atingir o sistema nervoso, o metilmercúrio precisa ser absorvido pelo trato gastrointestinal, etapa em que sua toxicocinética já se distingue da de outras formas de mercúrio. Mais de 90% do mercúrio presente no músculo de peixes encontra-se na forma de metilmercúrio, e essa fração é absorvida com eficiência próxima de 95% pelo intestino humano, ao contrário do mercúrio inorgânico, cuja absorção intestinal é bem menor. Essa alta biodisponibilidade oral é o que torna o consumo de pescado, e não a exposição ocupacional a vapores de mercúrio, a principal via de intoxicação para as populações amazônicas.

2.2. Mecanismos de Neurotoxicidade do Metilmercúrio no Sistema Nervoso Central

O metilmercúrio não lesa o sistema nervoso por uma via única. Sua toxicidade resulta da soma de vários mecanismos moleculares que se disparam quase simultaneamente. A afinidade por grupos sulfidril de proteínas e aminoácidos confere-lhe grande mobilidade tecidual e explica algo decisivo: ele atravessa tanto a barreira hematoencefálica quanto a barreira placentária, usando os mesmos transportadores que o organismo reserva a aminoácidos essenciais, como o transportador de L-aminoácidos do tipo LAT-1 (Caamaño

Lourido, 2023). Nenhuma dessas barreiras, portanto, protege de fato o encéfalo em formação.

Dentro do neurônio, o primeiro evento costuma ser o estresse oxidativo. O metilmercúrio inibe a glutathione peroxidase mitocondrial, enfraquecendo a principal defesa antioxidante da célula. O desequilíbrio resultante acumula peróxido de hidrogênio e promove peroxidação lipídica das membranas neuronais (Franco, 2009).

Esse dano não fica isolado. As mitocôndrias, justamente por concentrarem parte considerável do metilmercúrio absorvido pela célula nervosa, sofrem disfunção progressiva: a cadeia respiratória perde eficiência, a produção de ATP cai, e mais espécies reativas de oxigênio são geradas. Estresse oxidativo e falência mitocondrial passam, então, a se realimentar.

Um terceiro eixo de dano envolve a neurotransmissão. O metilmercúrio inibe a recaptação astrocitária de glutamato, que se acumula no espaço extracelular e hiperativa receptores NMDA. O resultado é um influxo excessivo de cálcio para dentro do neurônio, dishomeostase que ativa proteases, endonucleases e, por fim, a via das caspases, disparando apoptose (Caamaño Lourido, 2023). O metal ainda desorganiza os microtúbulos do citoesqueleto, comprometendo o transporte axonal e a migração neuronal. É esse último ponto, mais do que qualquer outro, que explica por que a exposição intrauterina costuma ser mais grave do que exposições equivalentes na vida adulta: atinge um sistema que ainda está sendo construído.

Neuroinflamação fecha o quadro. Micróglia e astrócitos, ativados pelo dano oxidativo e mitocondrial já instalado, liberam citocinas pró-inflamatórias que agravam a lesão neuronal e comprometem ainda mais a barreira hematoencefálica, facilitando, com isso, exposições futuras. Estresse oxidativo, disfunção mitocondrial, dishomeostase de cálcio e glutamato, dano ao citoesqueleto e neuroinflamação não são, portanto, mecanismos paralelos: formam um circuito que se realimenta e que confere à intoxicação por metilmercúrio um caráter progressivo, mesmo em exposições consideradas moderadas quando olhadas isoladamente.

Um aspecto adicional merece destaque: a idade em que a exposição ocorre modifica profundamente sua gravidade. No adulto, o sistema nervoso já formado dispõe de alguma reserva funcional e de mecanismos de reparo que amortecem, ainda que parcialmente, o dano celular descrito acima. No feto e no lactente, essa reserva praticamente não existe. Cada mecanismo, estresse oxidativo, disfunção mitocondrial, desorganização do citoesqueleto, atinge não uma estrutura pronta, mas uma estrutura em obras, o que multiplica sua repercussão funcional. É por essa razão que a exposição pré-natal ocupa lugar central nos estudos revisados na próxima subseção, e não apenas por uma escolha metodológica dos pesquisadores.

Fora do sistema nervoso central, alguns dos mesmos mecanismos moleculares parecem contribuir para efeitos sobre outros sistemas, o que amplia o espectro clínico associado à exposição crônica ao metilmercúrio. Discute-se, por exemplo, associação entre exposição prolongada e desenvolvimento de hipertensão arterial e maior risco cardiovascular, atribuída em parte ao estresse oxidativo vascular e à interferência do metal na função endotelial. Ainda que esses

desfechos extrapolem o recorte central desta revisão, sua menção é pertinente porque reforça o caráter sistêmico, e não estritamente neurológico, da intoxicação mercurial crônica.

Convém ainda observar que esses mecanismos não foram descritos exclusivamente em modelos experimentais distantes da realidade amazônica. Eles fornecem a base biológica que permite interpretar, com plausibilidade, os achados clínicos e epidemiológicos relatados em comunidades ribeirinhas e indígenas, um exercício de amarração entre laboratório e campo que será retomado na seção de resultados e discussão.

2.3. Biomarcadores de Exposição e Riscos à Saúde das Populações Tradicionais

Medir a exposição humana ao metilmercúrio exige uma matriz biológica capaz de refletir a carga corporal do metal ao longo do tempo. O cabelo cumpre esse papel na maior parte dos estudos amazônicos: incorpora o mercúrio circulante durante o crescimento do fio e permite estimar, pelo comprimento da mecha, o padrão de exposição de meses anteriores à coleta. O sangue, por sua vez, reflete a exposição mais recente, de dias a poucas semanas, e a urina tem papel mais limitado para o metilmercúrio, sendo mais útil para formas inorgânicas do metal. Essa diferença temporal entre matrizes explica por que o cabelo se tornou o biomarcador preferencial em estudos que buscam caracterizar exposição crônica em populações ribeirinhas e indígenas, cujo padrão de consumo de peixe tende a ser estável ao longo do ano.

Também no cabelo, o que se determina laboratorialmente é o mercúrio total, e não o metilmercúrio isoladamente, ainda que essa

fração costume corresponder à quase totalidade do mercúrio capilar em populações cuja exposição é predominantemente alimentar. Essa correspondência, no entanto, é menos segura em indivíduos com exposição ocupacional concomitante ao mercúrio metálico, como garimpeiros que manipulam diretamente o metal na amalgamação do ouro, situação em que uma fração maior do mercúrio detectado pode ser de origem inorgânica. Os estudos revisados nesta pesquisa concentram-se em populações consumidoras de peixe, e não em trabalhadores do garimpo, o que reduz esse risco de confusão, mas não o elimina por completo quando a residência é próxima às áreas de extração.

Paralelamente aos biomarcadores humanos, a avaliação de risco também pode ser construída a partir da concentração de mercúrio no próprio alimento consumido, combinada a parâmetros de dose de referência estabelecidos por agências de saúde. A dose de referência representa a quantidade diária de determinada substância que pode ser ingerida ao longo da vida sem risco apreciável à saúde; para o metilmercúrio, a Organização Mundial da Saúde, por meio da FAO/OMS, e a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (U.S. EPA) adotam valores distintos, o que faz com que uma mesma dose ingerida possa ser classificada como seguro por um critério e como risco real por outro. Essa duplicidade de parâmetros reaparece nos estudos de avaliação de risco revisados nesta pesquisa e ajuda a explicar por que diferentes trabalhos, usando a mesma população, podem chegar a conclusões quantitativamente distintas sobre a magnitude do risco.

Khoury *et al.* (2013), ao comparar comunidades ribeirinhas do Tapajós e do Tocantins, no Pará, encontraram concentrações capilares significativamente mais altas no Tapajós, área de garimpo

histórico, embora ainda abaixo dos 50 microgramas por grama que a Organização Mundial da Saúde associa a 5% de risco de alteração neurológica em adultos. O dado, à primeira vista tranquilizador, esconde um problema de origem: esse limiar foi construído a partir de episódios agudos, como Minamata e o Iraque, e não necessariamente descreve o que acontece quando a exposição é baixa, mas se estende por décadas.

Costa Junior *et al.* (2017) dão pistas de que esse descompasso é real. Entre ribeirinhos de Itaituba e Acará, no Pará, a concentração capilar de mercúrio associou-se a sintomas de ansiedade, depressão e insônia mesmo em níveis considerados moderados pelos padrões internacionais.

Já Khoury *et al.* (2013), ao aplicarem exame neurológico convencional nas mesmas populações, encontraram como principal alteração objetiva apenas um desvio de marcha, sem diferença estatística nos demais parâmetros entre áreas expostas e controle.

A discrepância entre sintomas subjetivos evidentes e sinais neurológicos formais discretos não invalida a hipótese de neurotoxicidade; sugere, isto sim, que os instrumentos clínicos tradicionais talvez não capturem bem um dano que se instala devagar.

Crianças e gestantes ocupam o topo da vulnerabilidade. Jacques *et al.* (2025) situam a exposição pré-natal, mediada pelo consumo materno de peixe, como determinante central do neurodesenvolvimento nos primeiros mil dias de vida, somando-se a outras fragilidades já presentes em comunidades indígenas, como insegurança alimentar e acesso limitado a serviços de saúde. Raposo

et al. (2026), ao sintetizarem cinco publicações sobre o tema, reforçam essa hipótese: o mercúrio medido no cabelo dessas crianças costuma ultrapassar 2,0 microgramas por grama, chegando a passar de 20 microgramas por grama em alguns casos pontuais, patamar acompanhado de prejuízo no quociente de inteligência, na memória operacional e na fluência verbal infantil.

Entre crianças indígenas amazônicas avaliadas em áreas de exposição ao metilmercúrio, parcela expressiva apresentou sinais de alerta em testes de triagem do desenvolvimento, sobretudo em linguagem e habilidades motoras, com níveis de mercúrio no cabelo muito acima da dose de referência da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (Jacques *et al.*, 2025). Entre adultos Yanomami de outra região amazônica, Rebouças *et al.* (2024) associaram a exposição ambiental crônica a neuropatia periférica e comprometimento cognitivo, ampliando o espectro de dano para além da infância. Carvalho e Hacon (2016), por sua vez, usando biomarcadores de estresse oxidativo em crianças ribeirinhas do rio Madeira, identificaram alterações metabólicas precoces compatíveis com dano celular, indício de que o efeito tóxico pode estar presente antes de qualquer sinal clínico visível.

O quadro que emerge desses estudos é o de uma população que convive há décadas com exposição crônica a um neurotóxico sem que isso esteja plenamente incorporado à rotina de vigilância em saúde. A testagem de mercúrio em cabelo não integra, de forma sistemática, os programas de pré-natal ou de acompanhamento infantil do Sistema Único de Saúde. Enquanto isso, o garimpo ilegal persiste em terras indígenas. O problema sanitário, nesse sentido, segue maior do que aquilo que os indicadores oficiais registram.

Há, por fim, um ponto metodológico que atravessa praticamente todos os estudos aqui reunidos e que merece ser adiantado antes de se avançar para a discussão dos resultados: a maior parte dessa produção é transversal, descreve associação e não estabelece, com segurança, relação de causa e efeito ao longo do tempo. Isso não invalida os achados. A coerência entre mecanismo molecular, biomarcador de exposição e desfecho clínico é forte demais para ser ignorada, mas indica que o desenho longitudinal ainda é uma lacuna a ser preenchida pela pesquisa amazônica sobre o tema.

3. METODOLOGIA

O presente estudo caracteriza-se como uma revisão bibliográfica da literatura, de caráter descritivo e abordagem qualitativa, com o objetivo de reunir e analisar informações científicas relacionadas à contaminação de pescados por metilmercúrio na Amazônia brasileira, seus mecanismos de neurotoxicidade e os riscos associados à saúde das populações amazônicas. A revisão não seguiu o protocolo PRISMA de revisões sistemáticas, dado o caráter exploratório-descritivo da pesquisa, mas incorporou critérios explícitos de busca, seleção e exclusão, descritos a seguir, de modo a conferir transparência ao processo de escolha dos estudos analisados.

A busca bibliográfica foi realizada nas bases de dados PubMed/MEDLINE, Scientific Electronic Library Online (SciELO), Biblioteca Virtual em Saúde (BVS) e Google Acadêmico, utilizando descritores e palavras-chave em português e inglês; tais como: “Metilmercúrio”; “Mercúrio”; “Pescados”; “Amazônia”; “Neurotoxicidade”; “Bioacumulação”; “Biomagnificação”; “Saúde Pública”; “Methylmercury”; “Mercury”; “Fish”; “Amazon”;

“Neurotoxicity” e “Public Health”; Os termos foram combinados por meio dos operadores booleanos AND e OR; conforme os eixos temáticos investigados; As buscas foram complementadas pela leitura das listas de referências dos artigos selecionados; técnica também conhecida como busca em cascata; o que permitiu identificar estudos ecotoxicológicos regionais nem sempre indexados de forma direta pelos descritores utilizados.

Foram priorizados artigos científicos publicados nos últimos dez anos, nos idiomas português, inglês e espanhol, que abordassem a contaminação por mercúrio ou metilmercúrio em pescados da região amazônica, os mecanismos de neurotoxicidade, os biomarcadores de exposição humana e os impactos à saúde pública. Estudos anteriores a esse período foram utilizados quando considerados relevantes para a fundamentação dos mecanismos toxicológicos clássicos e do contexto histórico da exposição ao mercúrio na Amazônia, a exemplo dos episódios de contaminação associados à mineração de ouro documentados desde a década de 1990.

Foram excluídos trabalhos duplicados, publicações sem relação direta com os objetivos da pesquisa, estudos que não apresentassem informações pertinentes à exposição ao mercúrio ou ao metilmercúrio e materiais sem fundamentação científica adequada, como textos de divulgação sem revisão por pares. Revisões sistemáticas, revisões integrativas e metanálises foram, em regra, excluídas da síntese de resultados primários, com exceção de duas revisões (Raposo *et al.*, 2026; Paiva *et al.*, 2025) mantidas por reunirem, respectivamente, evidência quantitativa sobre neurodesenvolvimento infantil e um panorama sistemático da distribuição geográfica dos estudos ecotoxicológicos na bacia

amazônica, informação não disponível de outra forma na literatura consultada. A seleção ocorreu inicialmente pela leitura de títulos e resumos, seguida da leitura na íntegra dos estudos considerados potencialmente elegíveis.

Após a seleção, as publicações foram organizadas segundo três eixos temáticos, correspondentes aos objetivos específicos do estudo: a ocorrência de metilmercúrio em pescados amazônicos e sua dinâmica de bioacumulação e biomagnificação; os mecanismos de neurotoxicidade associados à exposição; e os riscos à saúde das populações tradicionais, considerando biomarcadores de exposição e grupos de maior vulnerabilidade. Ao final desse processo, dezenove estudos foram selecionados e caracterizados quanto a autoria, objetivo, delineamento metodológico, exposição ou alteração investigada e principais resultados, conforme sintetizado no Quadro 1. Os achados foram discutidos de maneira descritiva e comparativa, buscando evidenciar convergências, divergências e lacunas presentes na literatura científica consultada, bem como diferenças metodológicas relevantes entre os estudos, como o tipo de biomarcador utilizado e a dose de referência adotada para o cálculo de risco.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos critérios de busca e seleção descritos na metodologia, foram reunidos estudos que permitem caracterizar, de forma comparativa, autoria, objetivo, delineamento metodológico, alteração ou exposição investigada e principais resultados. Essa organização, sintetizada no Quadro 1, precede a discussão propriamente dita e serve de referência para os três eixos temáticos explorados nas subseções seguintes.

Quadro 1. Caracterização dos estudos incluídos

Autor/ano	Objetivo	Metodologia	Exposição/ alteração investigada	Principais resultados
Bastos et al. (2008)	Descrever o mercúrio em peixes da bacia do rio Madeira, Amazônia.	Estudo descritivo; análise de mercúrio total em espécies de diferentes hábitos alimentares.	Concentração de mercúrio em tecido muscular de peixes.	Concentrações variaram conforme o hábito alimentar; espécies piscívoras muito acima das demais.
Bezerra de Oliveira et al. (2022)	Avaliar hábitos de consumo de peixe e exposição ao mercúrio em gestantes de Itaituba, bacia do Tapajós.	Coleta de cabelo de 110 gestantes; determinação de mercúrio total no cabelo e em duas espécies piscívoras mais consumidas, em duas estações do ano.	Mercúrio capilar em gestantes e mercúrio em peixe por estação hidrológica.	Mercúrio capilar médio de 1,6 µg/g, acima da referência da U.S. EPA em 48% das gestantes; concentração de mercúrio no peixe variou entre as estações seca e chuvosa, ultrapassando o limite de segurança para uma das espécies em ambas as estações.
Khoury et al. (2013)	Comparar exposição ao mercúrio e	Estudo comparativo; mercúrio total no	Mercúrio capilar e sinais	Tapajós apresentou concentrações maiores que

	manifestações neurológicas em ribeirinhos do Pará.	cabelo por espectrofotometria e exame neurológico de rotina.	neurológicos clínicos.	Tocantins ($p<0,01$); única diferença neurológica significativa foi o desvio de marcha.
Cabrera Monteiro et al. (2026)	Comparar composição da comunidade de peixes e bioacumulação de mercúrio entre lago de várzea natural e canal de irrigação construído, bacia do Araguaia.	Amostragem de 473 indivíduos de 34 espécies; análise de mercúrio total no músculo dorsal de 62 espécimes de guildas tróficas comparáveis.	Estrutura da comunidade de peixes e mercúrio por guilda trófica em ambiente natural versus construído.	Mercúrio aumentou significativamente com o nível trófico em ambos os ambientes; lago natural apresentou concentrações maiores que o canal para as guildas carnívora e detritívora, mas a eficiência de transferência trófica do mercúrio foi semelhante entre os dois sistemas.
Costa Junior et al. (2017)	Analisar manifestações emocionais e motoras de ribeirinhos expostos ao mercúrio em Itaituba e Acará (PA).	Coleta de cabelo para mercúrio total; questionários sintomatológicos emocionais e motores.	Sintomas de ansiedade, depressão, insônia, parestesia e tremor.	Associação entre mercúrio e sintomas emocionais; queixas motoras no Acará não relacionadas ao mercúrio.

Carvalho; Hacon (2016)	Avaliar estresse oxidativo induzido por mercúrio em população ribeirinha infantojuvenil do rio Madeira (RO).	Dosagem de mercúrio em cabelo/sangue e biomarcadores de estresse oxidativo em crianças e adolescentes.	Biomarcadores de estresse oxidativo e carga corporal de mercúrio.	Níveis de mercúrio acima dos valores de referência da OMS; alterações metabólicas precoces compatíveis com dano celular.
Costa et al. (2022)	Avaliar mercúrio em músculo e fígado de <i>Plagioscion squamosissimus</i> no rio Machado (RO).	Análise de tecidos de peixes coletados no rio Machado.	Concentração de mercúrio em músculo e fígado de peixe piscívoro.	Concentrações acima do limite da OMS para consumo humano.
Domingues et al. (2024)	Estimar a dinâmica e o risco de bioacumulação de mercúrio em peixes nas bacias do Branco, Tapajós e Xingu, impactadas por garimpo.	Modelagem probabilística (SERA FM) em 8.259 sub-bacias; projeção de concentração de mercúrio e avaliação de risco de consumo.	Concentração projetada de mercúrio por sub-bacia e risco de consumo por grupo populacional.	Em média, 27,47% das sub-bacias poderiam não atender à legislação brasileira, chegando a 52,38% nas bacias do Branco e do Tapajós; em média, 49,79% das populações tradicionais dessas duas bacias enfrentariam

				risco extremamente alto.
Escobar-Camacho et al. (2024)	Investigar mercúrio total em água, sedimento e peixe em dois territórios indígenas da Amazônia equatoriana.	Amostragem de peixe, água e sedimento em territórios Waorani e A'i Cofán; comparação entre comunidades e guildas tróficas.	Mercúrio total em peixe, água e sedimento por comunidade e guilda trófica.	A maioria das amostras de peixe (91,5%), sedimento (100%) e água (95,3%) esteve abaixo dos limites internacionais ; peixes piscívoros e onívoros apresentaram as maiores concentrações entre as guildas tróficas.
Matos et al. (2025)	Avaliar mercúrio no músculo, fígado, rins e brânquias de peixes piscívoros e do detritívoro <i>Prochilodus nigricans</i> no rio Teles Pires, sul da Amazônia.	Coleta de espécimes de diferentes níveis tróficos em duas estações; análise de mercúrio total por tecido.	Mercúrio em peixes de hábitos alimentares distintos e em diferentes tecidos.	Músculo dos piscívoros com concentrações superiores às do detritívoro; maioria das amostras abaixo do limite da OMS para consumo, mas ingestão diária estimada da população local ultrapassa esse limite.

Castilho et al. (2026)	Avaliar mercúrio em peixes de rio impactado por garimpo em Mato Grosso e o risco à saúde humana.	Biomonitoramento de três espécies de níveis tróficos distintos (predador, generalista e detritívoro); cálculo de risco de consumo.	Bioacumulação, biomagnificação e risco de consumo por nível trófico.	Músculo do predador com maior concentração de mercúrio, seguido do generalista e do detritívoro, confirmando biomagnificação; risco de consumo elevado para o predador, moderado para o generalista e baixo para o detritívoro.
Jacques et al. (2025)	Elaborar modelo teórico dos determinantes do neurodesenvolvimento em crianças indígenas expostas ao metilmercúrio.	Ensaio teórico conforme checklist para relato teórico em estudos epidemiológicos; síntese de estudos com populações indígenas amazônicas.	Exposição pré-natal ao metilmercúrio e neurodesenvolvimento.	prejuízo em parcela expressiva das crianças avaliadas em área exposta, com sinais de alerta em testes de triagem do neurodesenvolvimento, sobretudo em linguagem e habilidades motoras.
Paiva et al. (2025)	Sintetizar a literatura sobre concentração de	Revisão sistemática (1990-2022) em seis gêneros de	Distribuição geográfica dos estudos e risco de exposição	Distribuição de estudos heterogênea, com a sub-bacia do

	mercúrio em peixes e exposição de grupos sociais na bacia amazônica.	peixes; 46 estudos e 455 registros nas bases Web of Science e Scopus.	por grupo social.	Madeira mais estudada e a bacia do Paru-Jari sem nenhum estudo; avaliação de risco indicou exposição elevada, sobretudo entre populações tradicionais, mesmo quando as concentrações em peixe não excediam os limites regulatórios.
Raposo et al. (2026)	Analisar evidências sobre impactos do mercúrio no neurodesenvolvimento de crianças ribeirinhas e indígenas amazônicas.	Revisão integrativa de literatura (2016-2025); cinco publicações incluídas.	Neurodesenvolvimento infantil e carga corporal de mercúrio.	Concentrações capilares frequentemente acima de 2,0 µg/g, com valores individuais superiores a 20 µg/g; prejuízo em QI, memória e fluência verbal.
Rebouças et al. (2024)	Avaliar associação entre exposição ambiental crônica ao metilmercúrio e dano	Estudo observacional com avaliação neurológica e cognitiva de população	Neuropatia periférica e comprometimento cognitivo em adultos.	Associação significativa entre exposição crônica ao metilmercúrio e neuropatia

	neuroológico em adultos indígenas Yanomami.	indígena amazônica.		periférica e declínio cognitivo.
Vasconcellos et al. (2022)	Avaliar o risco à saúde atribuível ao consumo de peixes contaminados por mercúrio na bacia do rio Branco, Roraima, para populações urbanas e não urbanas.	Coleta de 75 espécimes de 20 espécies e 4 níveis tróficos em quatro pontos da bacia; determinação de mercúrio total por espectrofotometria de absorção atômica; avaliação de risco segundo metodologia da OMS em três cenários de consumo (50, 100 e 200 g/dia).	Concentração de mercúrio por nível trófico e por ponto de coleta; dose de mercúrio ingerida e razão de risco por subgrupo populacional.	Concentrações entre 0 e 3,159 µg/g, com média de 0,869 µg/g em carnívoros contra 0,116 µg/g em não carnívoros; mulheres em idade fértil ingerem de 5 a 21 vezes a dose seguro da U.S. EPA e crianças menores de 5 anos, de 18 a 75 vezes; toda a população, exceto homens adultos com consumo baixo, está em risco.
Franco (2009)	Investigar o papel do sistema antioxidante da glutatona na neurotoxidade induzida por metilmercúrio	Tese experimental (modelos in vitro e in vivo); avaliação bioquímica do sistema da glutatona e de marcadores	Estresse oxidativo e via da glutatona como alvo molecular do metilmercúrio.	Confirmação da glutatona peroxidase mitocondrial como alvo preferencial do metilmercúrio; compostos naturais atenuaram o dano

	io e o efeito protetor de compostos naturais.	de estresse oxidativo.		oxidativo induzido pelo metal.
Rebello (2016)	Revisar a toxicidade do mercúrio e sua relação com doenças neurodegenerativas.	Revisão bibliográfica sobre farmacocinética do mercúrio e mecanismos de neurotoxicidade.	Mecanismos moleculares de neurotoxicidade e associação com quadros neurodegenerativos.	Descrição da via de estresse oxidativo, disfunção mitocondrial e apoptose como base da neurotoxicidade mercurial; associação discutida com doenças neurodegenerativas.
Caamaño Lourido (2023)	Revisar os mecanismos de neurotoxicidade do metilmercúrio no sistema nervoso central.	Trabalho de fim de grau; revisão bibliográfica de estudos experimentais e clínicos sobre toxicocinética e neurotoxicidade.	Mecanismos celulares de neurotoxicidade (estresse oxidativo, excitotoxicidade glutamatérgica, dishomeostase de cálcio).	Sistematização dos mecanismos de captação, distribuição e neurotoxicidade do metilmercúrio, com ênfase na excitotoxicidade glutamatérgica e na dishomeostase de cálcio intracelular.

Fonte: elaborado pela autora (2026)

Os estudos selecionados foram agrupados em três eixos temáticos, considerando a ocorrência do mercúrio em pescados amazônicos, os mecanismos relacionados à neurotoxicidade e os riscos à saúde associados à exposição, com ênfase nos biomarcadores e nas populações tradicionais.

Os estudos ecotoxicológicos revisados indicam que peixes carnívoros de níveis tróficos superiores tendem a apresentar concentrações de mercúrio mais elevadas do que espécies onívoras ou herbívoras da mesma bacia. Costa *et al.* (2022) verificaram, na corvina do rio Machado, em Rondônia, valores musculares e hepáticos acima do limite estabelecido pela Organização Mundial da Saúde para consumo humano, resultado compatível com o que Bastos *et al.* (2008) já haviam registrado na mesma bacia.

Castilho *et al.* (2026), em rio afetado por garimpo no Mato Grosso, encontraram padrão semelhante: a espécie predadora apresentou concentração muscular de mercúrio superior às das espécies generalista e detritívora da mesma comunidade aquática, o que os autores associaram ao processo de biomagnificação ao longo da cadeia alimentar. Matos *et al.* (2025), no rio Teles Pires, relataram concentrações mais elevadas nas espécies piscívoras do que na detritívora *Prochilodus nigricans*, embora a maior parte das amostras estivesse abaixo do limite da Organização Mundial da Saúde para consumo humano quando considerada isoladamente.

A presença de mercúrio nos ambientes amazônicos parece estar relacionada tanto a fontes naturais quanto a atividades antrópicas. Carvalho e Hacon (2016) discutem a remobilização do mercúrio previamente depositado nos solos da região, associada ao desmatamento e à formação de reservatórios hidrelétricos,

enquanto os estudos de Castilho *et al.* (2026) e de Matos *et al.* (2025) situam a contaminação em rios diretamente impactados por atividade garimpeira. Essa diferença entre as fontes é relevante porque indica que a exposição observada nos peixes pode resultar de processos ambientais distintos, ainda que ambos contribuam para a disponibilidade do metilmercúrio nos sistemas aquáticos.

Um aspecto discutido de forma incipiente na literatura reunida refere-se à possibilidade de orientar o consumo entre espécies de diferentes níveis tróficos como medida de redução de exposição. Matos *et al.* (2025) sugerem que espécies detritívoras, por apresentarem menor concentração muscular de mercúrio, poderiam ser priorizadas por grupos mais vulneráveis, como gestantes, lactantes e crianças. Os próprios autores, contudo, não avaliaram a viabilidade dessa recomendação em contexto real de consumo, o que limita sua aplicação imediata como diretriz de saúde pública.

Observa-se ainda uma diferença de escopo entre os estudos reunidos no Quadro 1. Bastos *et al.* (2008), Costa *et al.* (2022) e Matos *et al.* (2025) descrevem a contaminação a partir da análise de tecidos do peixe, em abordagem predominantemente ecotoxicológica, enquanto Castilho *et al.* (2026) e Vasconcellos *et al.* (2022) incorporam também o cálculo de risco à saúde humana a partir do consumo estimado. Essa diferença sugere uma tendência, ainda pouco consolidada na literatura amazônica, de associar a medição ambiental do mercúrio a estimativas de risco para a população consumidora.

O estudo de Vasconcellos *et al.* (2022), realizado na bacia do rio Branco, em Roraima, ilustra essa segunda abordagem em maior

detalhe. Ao analisarem 75 espécimes de 20 espécies distribuídas em quatro níveis tróficos, os autores confirmaram o padrão de biomagnificação também observado nos demais estudos: as medianas de concentração de mercúrio decresceram de espécies carnívoras para onívoras, detritívoras e herbívoras. Os quatro pontos de coleta apresentaram, ainda, diferentes graus de contaminação, com maior prevalência de peixes acima do limite estabelecido pela Organização Mundial da Saúde nos rios Mucajá e Uraricoera, áreas de maior influência de garimpo ilegal, em comparação ao ponto de coleta situado no rio Branco, na capital Boa Vista.

A variação sazonal da contaminação, pouco explorada na maior parte dos estudos reunidos, foi diretamente investigada por Bezerra de Oliveira *et al.* (2022) em Itaituba, no Tapajós. Ao comparar duas espécies piscívoras ao longo de um ciclo hidrológico completo, os autores encontraram concentrações de mercúrio distintas entre a estação seca e a chuvosa, com uma das espécies ultrapassando o limite de segurança em ambos os períodos e a outra apenas na seca. O estudo também mediu mercúrio no cabelo de 110 gestantes, encontrando média de 1,6 microgramas por grama, acima da referência da U.S. EPA em quase metade das participantes.

Fora das bacias tipicamente associadas ao garimpo, Cabrera Monteiro *et al.* (2026) investigaram a bacia do Araguaia, comparando um lago de várzea natural a um canal de irrigação construído. O mercúrio aumentou significativamente com o nível trófico em ambos os ambientes, confirmando o padrão de biomagnificação já discutido, e as inclinações da magnificação trófica foram estatisticamente semelhantes entre o ambiente natural e o construído, ainda que o lago apresentasse concentrações absolutas mais altas nas guildas carnívora e detritívora. Esse achado sugere

que a eficiência de transferência do mercúrio ao longo da cadeia trófica pode se manter relativamente estável mesmo diante de alterações substanciais no ambiente aquático.

A limitação geográfica sugerida a partir dos estudos ecotoxicológicos reunidos no Quadro 1 é corroborada pela revisão sistemática de Paiva *et al.* (2025), que analisou 46 estudos e 455 registros sobre mercúrio em seis gêneros de peixes amazônicos entre 1990 e 2022. Os autores constataram distribuição geográfica marcadamente desigual da produção científica, com a sub-bacia do Madeira concentrando o maior número de estudos e a bacia do Paru-Jari sem nenhum registro. Segundo os mesmos autores, a avaliação de risco indicou exposição elevada entre populações tradicionais mesmo em situações nas quais as concentrações de mercúrio no peixe não ultrapassavam os limites regulatórios, o que reforça a importância do padrão de consumo, e não apenas da concentração ambiental, na determinação do risco.

O conjunto de estudos analisados não permite avaliar a variação sazonal da contaminação de forma sistemática para todas as bacias, uma vez que apenas Bezerra de Oliveira *et al.* (2022) acompanhou essa dinâmica ao longo de um ciclo hidrológico completo. Da mesma forma, a maior parte dos estudos ecotoxicológicos reunidos no Quadro 1 concentra-se em bacias do sul e do sudoeste amazônico, como o Madeira, o Machado e o Teles Pires, padrão de concentração geográfica que a revisão de Paiva *et al.* (2025) descreve em maior escala e que limita a generalização dos achados para outras regiões da Amazônia ainda pouco representadas nesse conjunto de publicações.

Os mecanismos descritos na literatura toxicológica experimental, estresse oxidativo, disfunção mitocondrial e dishomeostase de cálcio (Caamaño Lourido, 2023; Franco, 2009), fornecem uma base biológica compatível com os desfechos relatados em estudos realizados com populações amazônicas expostas ao metilmercúrio. Rebouças *et al.* (2024) associaram a exposição ambiental crônica ao metal a neuropatia periférica e a comprometimento cognitivo em adultos indígenas, desfecho coerente com a hipótese de dano progressivo descrita nesses modelos experimentais.

Nos estudos com populações ribeirinhas, os desfechos relatados nem sempre correspondem ao que se observaria em um exame neurológico convencional. Costa Junior *et al.* (2017) associaram a concentração capilar de mercúrio a sintomas emocionais, como ansiedade, depressão e insônia, entre ribeirinhos do Pará. Khoury *et al.* (2013), avaliando populações da mesma região por exame neurológico de rotina, identificaram como alteração objetiva apenas um desvio de marcha, sem diferença estatística para os demais parâmetros avaliados.

Essa diferença entre os dois estudos pode estar relacionada à sensibilidade dos instrumentos de avaliação empregados. Sintomas emocionais, investigados por questionário, parecem ter maior capacidade de captar alterações associadas à exposição crônica do que o exame neurológico convencional, historicamente desenvolvido para identificar quadros de intoxicação aguda.

Em crianças, os estudos reunidos relatam prejuízo em domínios cognitivos mensuráveis por instrumentos padronizados. O modelo teórico de Jacques *et al.* (2025) situa a exposição pré-natal ao metilmercúrio como fator associado a alterações do

neurodesenvolvimento nos primeiros mil dias de vida, e estudos com crianças indígenas amazônicas relatam sinais de alerta em testes de triagem do desenvolvimento, sobretudo em linguagem e em habilidades motoras. Raposo *et al.* (2026), em revisão integrativa, reuniram evidências de prejuízo no quociente de inteligência, na memória operacional e na fluência verbal de crianças ribeirinhas e indígenas de diferentes localidades amazônicas.

Os desfechos relatados nos estudos parecem variar conforme a faixa etária avaliada: em adultos, predominam sintomas emocionais e alterações motoras discretas; em crianças, os prejuízos aparecem de forma mais estruturada em domínios cognitivos específicos. Essa diferença é compatível com a literatura sobre neurodesenvolvimento, segundo a qual exposições ocorridas durante a formação do sistema nervoso tendem a produzir efeitos mais duradouros do que exposições de magnitude semelhante na vida adulta, ainda que os estudos aqui reunidos não tenham comparado diretamente os dois grupos numa mesma população.

Carvalho e Hacon (2016), diferentemente dos estudos anteriores, não avaliaram desfecho neurológico, mas biomarcadores de estresse oxidativo em crianças e adolescentes ribeirinhos do rio Madeira, identificando alterações metabólicas precoces compatíveis com dano celular, ainda na ausência de sintoma clínico evidente. Esse achado é compatível com os mecanismos moleculares descritos na literatura experimental, nos quais o estresse oxidativo antecede manifestações neurológicas mais tardias.

Os estudos reunidos sugerem que a vulnerabilidade à exposição ao metilmercúrio não depende apenas da concentração ambiental do metal, mas também do momento biológico em que a exposição

ocorre. Jacques *et al.* (2025) discutem a exposição pré-natal, mediada pelo consumo materno de peixe, como fator relevante para o neurodesenvolvimento infantil, o que aponta a gestação e a primeira infância como períodos que merecem atenção prioritária em estratégias de vigilância, sem que isso implique, a partir do conjunto de estudos revisados, estabelecer uma hierarquia definitiva de risco entre diferentes grupos populacionais.

Os estudos com populações indígenas, como os de Rebouças *et al.* (2024) e de Jacques *et al.* (2025), relatam concentrações de mercúrio e desfechos de saúde compatíveis com exposição relevante nessas comunidades. Os estudos revisados, no entanto, não comparam diretamente populações indígenas e ribeirinhas não indígenas quanto ao grau de exposição, de modo que eventuais diferenças entre esses grupos não podem ser afirmadas com base apenas neste conjunto de publicações.

O cabelo é o biomarcador mais utilizado nos estudos revisados, o que pode ser atribuído à sua coleta simples e não invasiva. Essa característica representa uma vantagem operacional em regiões com estrutura laboratorial limitada, ainda que a concentração encontrada reflita principalmente a exposição dos meses anteriores à coleta e possa sofrer influência de fatores externos ao metabolismo do mercúrio, como tratamentos capilares.

Biomarcadores de estresse oxidativo, como os utilizados por Carvalho e Hacon (2016), oferecem informação relacionada mais diretamente ao dano celular, mas dependem de infraestrutura laboratorial pouco disponível na maior parte dos municípios amazônicos. Essa diferença de exigência técnica entre os

biomarcadores ajuda a explicar por que o cabelo permanece como matriz predominante nos estudos populacionais da região.

Um estudo com abordagem distinta, baseada na concentração de mercúrio no próprio pescado e não em amostras biológicas humanas, foi conduzido por Vasconcellos *et al.* (2022) na bacia do rio Branco, em Roraima. Ao aplicarem a metodologia de avaliação de risco proposta pela Organização Mundial da Saúde a três cenários hipotéticos de consumo, os autores estimaram que mulheres em idade fértil ingerem de 5 a 21 vezes mais mercúrio do que a dose considerada segura pela U.S. EPA, e de 2 a 9 vezes mais do que o limite estabelecido pela FAO/OMS. Entre crianças menores de 5 anos, a ingestão estimada chegou a 18 a 75 vezes a dose de referência da U.S. EPA. Segundo os autores, praticamente toda a população que consome peixe das localidades amostradas está em risco atribuível à ingestão de metilmercúrio, com exceção apenas de homens adultos com consumo baixo, de 50 gramas por dia.

Em escala mais ampla, Domingues *et al.* (2024) aplicaram modelagem probabilística a 8.259 sub-bacias das bacias do Branco, do Tapajós e do Xingu, todas impactadas por garimpo. Os autores projetaram que, em média, 27,47% das sub-bacias poderiam não atender à legislação brasileira para mercúrio, proporção que chega a 52,38% quando consideradas isoladamente as bacias do Branco e do Tapajós. Na avaliação de risco de consumo, a proporção média de populações tradicionais em risco extremamente alto nessas duas bacias foi estimada em 49,79%, resultado da mesma ordem de grandeza do encontrado por Vasconcellos *et al.* (2022) especificamente para o rio Branco, o que reforça a magnitude do problema nessa bacia em particular.

Nem todos os estudos revisados descrevem cenário de risco tão acentuado. Escobar-Camacho *et al.* (2024), ao investigarem dois territórios indígenas da Amazônia equatoriana, verificaram que a maior parte das amostras de peixe (91,5%), sedimento (100%) e água (95,3%) permaneceu abaixo dos limites internacionais, ainda que oito espécies tenham excedido esses limites e que peixes piscívoros e onívoros tenham apresentado as maiores concentrações entre as guildas tróficas, padrão coerente com o restante da literatura. Essa divergência em relação aos achados brasileiros pode refletir diferenças na intensidade da atividade garimpeira entre as regiões estudadas, mas também pode decorrer de particularidades metodológicas e amostrais entre os estudos, o que os próprios autores reconhecem ao recomendarem a incorporação de biomarcadores humanos para uma avaliação de risco mais completa.

Esse achado é relevante porque desloca o foco da avaliação de risco do biomarcador humano para o alimento consumido, permitindo estimar a exposição mesmo antes de qualquer sinal clínico ou biomarcador populacional estar disponível. Vasconcellos *et al.* (2022) também retomam a proposta, já discutida na subseção anterior a partir de Matos *et al.* (2025), de priorizar espécies de menor nível trófico no consumo: os autores identificam aracú, curimatã, jaraqui, matrinxã e pacú como espécies que podem ser consumidas em quantidades maiores mesmo por mulheres em idade fértil e crianças, ao passo que espécies carnívoras amplamente consumidas na região, como surubim, filhote, pescada e tucunaré, apresentariam risco elevado para esses grupos.

Os valores de referência da Organização Mundial da Saúde para mercúrio no cabelo foram estabelecidos a partir de episódios de

exposição aguda, como os ocorridos em Minamata. Khoury *et al.* (2013) observaram concentrações capilares mais elevadas em área com histórico de garimpo, ainda que abaixo desse limiar, associadas a sintomas relatados em outros estudos da mesma região. Esse achado sugere que os parâmetros normativos vigentes podem não descrever com precisão os efeitos de uma exposição crônica e de menor intensidade, distinta do padrão a partir do qual foram originalmente estabelecidos.

Em conjunto, os estudos reunidos apontam para a relevância de ações de vigilância ambiental do pescado e de testagem de biomarcadores em grupos com maior probabilidade de exposição relevante, associadas à articulação entre serviços de saúde, órgãos ambientais e lideranças comunitárias. A diversificação do consumo entre espécies de diferentes níveis tróficos, discutida na subseção anterior, é apontada por Matos *et al.* (2025) e por Vasconcellos *et al.* (2022) como possibilidade a ser considerada, ainda que sua efetividade não tenha sido testada como intervenção nos estudos revisados.

Uma leitura crítica do conjunto de estudos revisados exige reconhecer, ainda, a heterogeneidade metodológica que os separa. Os dezenove estudos reunidos no Quadro 1 diferem quanto à matriz analisada (peixe, cabelo, sangue), quanto à fração de mercúrio determinada (a maioria mede mercúrio total e infere a fração de metilmercúrio, como discutido no referencial teórico), e quanto à dose de referência empregada nos cálculos de risco, que alterna entre os parâmetros da FAO/OMS e da U.S. EPA sem critério uniforme entre os trabalhos. Essa variação metodológica dificulta a comparação direta entre os resultados numéricos apresentados por diferentes estudos e sugere cautela ao tentar extrapolar um único

valor de risco para o conjunto da população amazônica, ainda que a direção geral dos achados, maior exposição associada a maior consumo de peixe carnívoro, permaneça consistente entre os trabalhos analisados.

Ao reunir os dezenove estudos do Quadro 1, observa-se convergência entre a evidência ecotoxicológica de contaminação do pescado, os mecanismos moleculares de neurotoxicidade descritos na literatura experimental e os desfechos clínicos relatados em populações amazônicas expostas. Essa convergência, embora não estabeleça relação de causalidade a partir de estudos predominantemente transversais, é compatível com a hipótese de que a exposição ao metilmercúrio pelo consumo de pescado representa um fator relevante para a saúde das populações tradicionais da região.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão da literatura indica que a exposição ao metilmercúrio pelo consumo de pescados na Amazônia brasileira está associada a fontes ambientais naturais e antrópicas, entre elas o garimpo de ouro e a formação de reservatórios hidrelétricos, em um contexto no qual o pescado constitui fonte proteica central para populações ribeirinhas e indígenas. Os estudos revisados descrevem um padrão de exposição predominantemente crônico e continuado, o que sugere que os parâmetros normativos internacionais, historicamente construídos a partir de episódios agudos, podem não descrever com precisão o risco enfrentado por essas populações.

No plano biológico, os mecanismos de neurotoxicidade descritos na literatura experimental, estresse oxidativo, disfunção mitocondrial, dishomeostase de cálcio e glutamato e neuroinflamação, mostram-se compatíveis com os desfechos relatados em estudos realizados com comunidades ribeirinhas e indígenas, que variam de manifestações emocionais e discretas alterações motoras em adultos a prejuízos cognitivos mensuráveis em crianças. Os estudos com crianças expostas durante a gestação e a primeira infância sugerem que esse período pode representar uma janela de maior vulnerabilidade ao dano neurológico, achado que, embora recorrente na literatura consultada, decorre principalmente de estudos transversais e não permite estabelecer relação causal definitiva.

Entre as lacunas identificadas na literatura revisada, destacam-se a escassez de estudos que avaliem simultaneamente biomarcadores de exposição e biomarcadores mecanísticos de dano celular em uma mesma população, a ausência de investigações sobre a efetividade de estratégias de diversificação alimentar entre espécies de diferentes níveis tróficos, a limitada representação geográfica de bacias amazônicas distintas do sul e do sudoeste da região, e a escassez de acompanhamentos longitudinais capazes de descrever a trajetória do desenvolvimento neurológico de crianças expostas ao longo do tempo. O preenchimento dessas lacunas depende da ampliação da pesquisa regional e, possivelmente, da incorporação de testagem de mercúrio a rotinas de atenção à saúde já existentes, de modo a permitir monitoramento mais contínuo da exposição sem comprometer um hábito alimentar de relevância nutricional e cultural para as populações tradicionais amazônicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BASTOS, W. R.; REBELO, M. F.; FONSECA, M. F.; ALMEIDA, R.; MALM, O. **Um estudo descritivo do mercúrio em peixes da bacia do Rio Madeira, Amazônia, Brasil. Acta Amazonica**, v. 38, n. 3, p. 431-438, 2008.

BEZERRA DE OLIVEIRA, R.; MACHADO DA SILVA, D.; SANTA BÁRBARA SOUSA FRANCO, T.; SENA VASCONCELOS, C. R.; DOS ANJOS DE SOUSA, D. J.; FERREIRA SARRAZIN, S. L.; SAKAMOTO, M.; BOURDINEAUD, J.-P. **Fish consumption habits of pregnant women in Itaituba, Tapajós River basin, Brazil: risks of mercury contamination as assessed by measuring total mercury in highly consumed piscivore fish species and in hair of pregnant women. Archives of Industrial Hygiene and Toxicology**, v. 73, p. 131-142, 2022.

CAAMAÑO LOURIDO, E. **Neurotoxicidade do metilmercúrio**. Santiago de Compostela: Universidade de Santiago de Compostela, 2023. Trabalho de Fim de Grau.

CABRERA MONTEIRO, L.; NASCIMENTO DA SILVA CAMPOS, T.; CRISTHINA DA SILVA SANTOS, V.; SILVA SANTOS, L. J.; COUTO, D.; PEREIRA DE ALMEIDA, C.; BARRETO TERESA, F.; DE ALMEIDA, R.; RODRIGUES BASTOS, W.; ELIAS BERNARDI, J. V.; CARDOSO GALLI VIEIRA, L. **A snapshot of species composition and mercury bioaccumulation in fish from natural and constructed wetlands. Fishes**, v. 11, n. 3, p. 176, 2026.

CARVALHO, L. V. B. de; HACON, S. de S. **Avaliação dos níveis de estresse oxidativo induzido por exposição ao mercúrio em população ribeirinha infantojuvenil do rio Madeira (RO)**. Rio de Janeiro: Fundação Oswaldo Cruz, 2016.

CASTILHO, A. C. da C.; SOLERA, K.; LOPES, V. J. S.; MACHADO, G. A.; ANDRADE, R. L. T. de; BATTIROLA, L. D. **Ecotoxicological assessment of mercury in fish from a gold-mining-impacted Amazonian river: biomonitoring and human health risk. Environmental Toxicology**, p. 1-12, 2026.

COSTA JUNIOR, J. M. F.; LIMA, A. A. da S.; RODRIGUES JUNIOR, D.; KHOURY, E. D. T.; SOUZA, G. da S.; SILVEIRA, L. C. de L.; PINHEIRO, M. da C. N. **Manifestações emocionais e motoras de ribeirinhos expostos ao mercúrio na Amazônia. Revista Brasileira de Epidemiologia**, v. 20, n. 2, p. 212-224, 2017.

COSTA, I. D. da; NASCIMENTO, E. L. do; FACCHETI, M. S. A.; NUNES, N. N. dos S.; GOMES, J. P. de O.; ALMEIDA, R. de; BASTOS, W. R. **Mercury in muscle and liver of Plagioscion squamosissimus (Acanthuriformes: Sciaenidae) from the Machado River, Brazilian Amazon. Acta Amazonica**, v. 52, n. 1, p. 60-68, 2022.

CRESPO-LOPEZ, M. E.; AUGUSTO-OLIVEIRA, M.; LOPES-ARAÚJO, A.; SANTOS-SACRAMENTO, L.; TAKEDA, P. Y.; MATOS MACCHI, B. de; MARTINS DO NASCIMENTO, J. L.; MAIA, C. S. F.; LIMA, R. R.; ARRIFANO, G. P. **Mercury: what can we learn from the Amazon? Environment International**, v. 146, e106223, 2021.

DOMINGUES, V. S.; COLMENERO, C.; VINOGRAD, M.; OLIVEIRA-DA-COSTA, M.; BALBUENO, R. **Mercury dynamics and bioaccumulation risk assessment in three gold mining-impacted Amazon river basins. Toxics**, v. 12, n. 8, p. 599, 2024.

ESCOBAR-CAMACHO, D.; ROSERO-LÓPEZ, D.; RUIZ-URIGÜEN, M.; BARRAGÁN, K. S.; CARPINTERO-SALVADOR, N.; DAZA, J. R.; ALDOUS, A.; BENÍTEZ, S.; TEAR, T.; ENCALADA, A. C. **Mercury in aquatic**

ecosystems of two indigenous communities in the Piedmont Ecuadorian Amazon: evidence from fish, water, and sediments. *Ecotoxicology*, v. 33, p. 440-456, 2024.

FRANCO, J. L. **O sistema antioxidante da glutathione como alvo molecular na neurotoxicidade induzida por metilmercúrio: efeitos protetores de compostos naturais.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2009. Tese (Doutorado em Neurociências).

JACQUES, A. D.; SOUZA FILHO, B. A. B. de; ANDRADE, C. A. F. de; VAZ, J. dos S.; BASTA, P. C. **Exposição ao metilmercúrio e neurodesenvolvimento em crianças indígenas: um modelo teórico. *Cadernos de Saúde Pública*, Rio de Janeiro, v. 41, n. 3, e00228623, 2025.**

KHOURY, E. D. T.; SOUZA, G. da S.; SILVEIRA, L. C. de L.; COSTA, C. A. D.; ARAÚJO, A. A. D.; PINHEIRO, M. da C. N. **Manifestações neurológicas em ribeirinhos de áreas expostas ao mercúrio na Amazônia brasileira. *Cadernos de Saúde Pública*, v. 29, n. 11, p. 2307-2318, 2013.**

MATOS, L. S. de; KASPER, D.; SILVA, J. O. S.; CARVALHO, L. N. **Mercury in piscivorous and detritivorous fish from the Teles Pires River basin, Southern Amazon. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, v. 60, e2144, 2025.**

PAIVA, T. de C.; PESTANA, I. A.; MIRANDA, L. N. L.; CARVALHO, G. O. de; BASTOS, W. R.; KASPER, D. **Mercury scenario in fish from the Amazon basin: exploring the interplay of social groups and environmental diversity. *Toxics*, v. 13, n. 7, p. 580, 2025.**

RAPOSO, B. D. dos S.; RIBEIRO, V. H. da S.; CARNEIRO, A. M. M.; COSTA, Y. O. da; PINHEIRO, E. G.; MORAES, I. C. R. de; SANTANA, D. G.; FARIA, M. L. K. de; CARNEIRO, H. de A.; SILVA, B. A. F. da. **Impactos da exposição ao mercúrio no neurodesenvolvimento de crianças ribeirinhas e indígenas da Amazônia: uma revisão integrativa de literatura. Brazilian Journal of Interdisciplinary Health Sciences**, v. 8, n. 8, p. 419-436, 2026.

REBELO, R. de S. **Toxicidade do mercúrio e seus efeitos neurodegenerativos**. Almada: Instituto Superior de Ciências da Saúde Egas Moniz, 2016. Dissertação (Mestrado Integrado em Ciências Farmacêuticas).

REBOUÇAS, B. H.; KUBOTA, G. T.; OLIVEIRA, R. A. A.; PINTO, B. D.; CARDOSO, R. M.; VASCONCELLOS, A. C. S.; BASTA, P. C. **Long-term environmental methylmercury exposure is associated with peripheral neuropathy and cognitive impairment among an Amazon Indigenous population. Toxics**, v. 12, n. 3, p. 212, 2024.

VASCONCELLOS, A. C. S. de; FERREIRA, S. R. B.; SOUSA, C. C. de; OLIVEIRA, M. W. de; LIMA, M. de O.; BASTA, P. C. **Health risk assessment attributed to consumption of fish contaminated with mercury in the Rio Branco Basin, Roraima, Amazon, Brazil. Toxics**, v. 10, n. 9, p. 516, 2022.

¹ Discente

² Orientador