

# NOTA TÉCNICA



DINÂMICA DO MERCÚRIO  
E AVALIAÇÃO DOS SEUS  
RISCOS:

O IMPACTO DA  
CONTAMINAÇÃO NOS  
RIOS DA  
AMAZÔNIA BRASILEIRA



BRASIL

# INTRODUÇÃO



O aumento expressivo dos garimpos ilegais de ouro na Amazônia tem gerado problemas sociais e ambientais cada vez mais preocupantes, com destaque para a contaminação por mercúrio, que ameaça a rica biodiversidade do bioma e coloca em risco a saúde e a sobrevivência das comunidades amazônicas. O mercúrio, que é uma das substâncias mais poluentes do planeta, é empregado pelos garimpeiros na extração do ouro e liberado em concentrações expressivas no ambiente.

**De acordo com o MapBiomias<sup>1</sup>, a área de garimpo apenas em territórios indígenas cresceu 265% entre 2017 e 2022, alcançando 25,2 mil hectares, um território maior do que a cidade de Recife.**

As Terras Indígenas Kayapó (13,7 mil hectares), Munduruku (6,5 mil hectares) e Yanomami (3,3 mil hectares) estão entre os territórios mais afetados. O crescimento desenfreado da atividade garimpeira torna ainda mais urgente a necessidade de monitorar a contaminação e mitigar os seus impactos na saúde dos ecossistemas e das populações locais.

Tarefa difícil, entretanto, não apenas pela extensão territorial da Amazônia e a limitação de recursos, mas pela natureza ilegal da maioria dos garimpos de ouro, que gera incertezas sobre os reais impactos da mineração.

<sup>1</sup> <https://brasil.mapbiomas.org/>

**Desconhece-se, muitas vezes, as quantidades de mercúrio usadas nas operações e liberadas no ambiente, assim como a extensão dos danos causados, especialmente nos rios amazônicos, fontes essenciais de alimento para as comunidades tradicionais.**

Diante da escassez de informações confiáveis, torna-se crucial explorar ferramentas e tecnologias disponíveis que possam preencher as lacunas de conhecimento e contribuir para a formulação de estratégias de gerenciamento de risco mais assertivas. Neste cenário, o estudo a seguir, desenvolvido em parceria com o WWF-Brasil e publicado no Periódico Toxics em agosto deste ano, usa um modelo probabilístico desenvolvido pela Agência Ambiental Americana (U.S. Environmental Protection Agency - US EPA), para projetar a distribuição e bioacumulação de mercúrio em três grandes bacias amazônicas, visando a fornecer as bases científicas necessárias para planejar e implementar intervenções eficazes e adequadas às realidades locais das regiões afetadas pela contaminação.



# O ESTUDO



Buscando entender a dinâmica do mercúrio na Amazônia, o estudo realizou uma modelagem com o objetivo de prever padrões de contaminação pelo metal pesado em algumas das principais bacias hidrográficas da região afetados pela extração de ouro.

**Na ausência de dados amostrais, modelos matemáticos emergem como uma alternativa importante para ajudar a desvendar a dinâmica do mercúrio na natureza.**

Esses modelos permitem identificar variáveis que influenciam o transporte e o destino do poluente no ambiente, apontando parâmetros de incerteza e direcionando ajustes e abordagens alternativas.

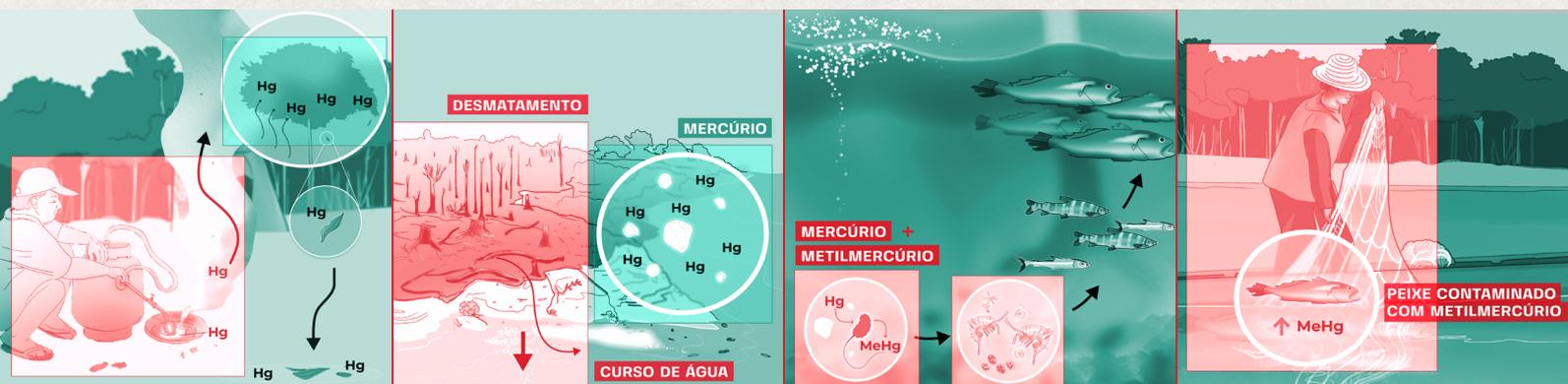
Dadas as dificuldades em obter informações consistentes em todas as regiões da Amazônia, foi necessário adotar uma abordagem específica. Assim, o estudo empregou o modelo SERAFM (spreadsheet-based ecological risk assessment for the fate of mercury), desenvolvido pela U.S. EPA <sup>2</sup>, para avaliar o risco ecológico a partir do destino do mercúrio. A concentração do metal em peixes foi analisada com base nos dados do Observatório do Mercúrio, uma plataforma desenvolvida pelo WWF-Brasil em parceria com outras instituições, que foram fundamentais no ajuste dos resultados e na sua comparação.

O diagrama apresentado a seguir permite que se compreenda como se dá o processo de contaminação pelo mercúrio na Amazônia.

<sup>2</sup>

<https://www.epa.gov/hydrowq/serafm-conceptual-model>

# DIAGRAMA DO PROCESSO DE CONTAMINAÇÃO POR MERCÚRIO



## A

O mercúrio é liberado durante o processo de amalgamação

A maior parte do mercúrio gasoso é retida na vegetação circundante e, posteriormente, depositada no solo.

## B

A maior parte do mercúrio que chega aos rios é transportada adsorvida nas partículas do solo.

Portanto, atividades como o desmatamento aceleram o processo de erosão e, conseqüentemente, a deposição de mercúrio nos rios.

## C

O mercúrio sofre metilação em ecossistemas da região.

Sob baixa oxigenação e altas concentrações de matéria orgânica, o mercúrio particulado se transforma em metilmercúrio, capaz de se acumular na cadeia alimentar.

## D

O mercúrio se bioacumula na cadeia alimentar, especialmente em peixes piscívoros.

Esses peixes são consumidos pelas populações locais, impactando sua saúde.

3

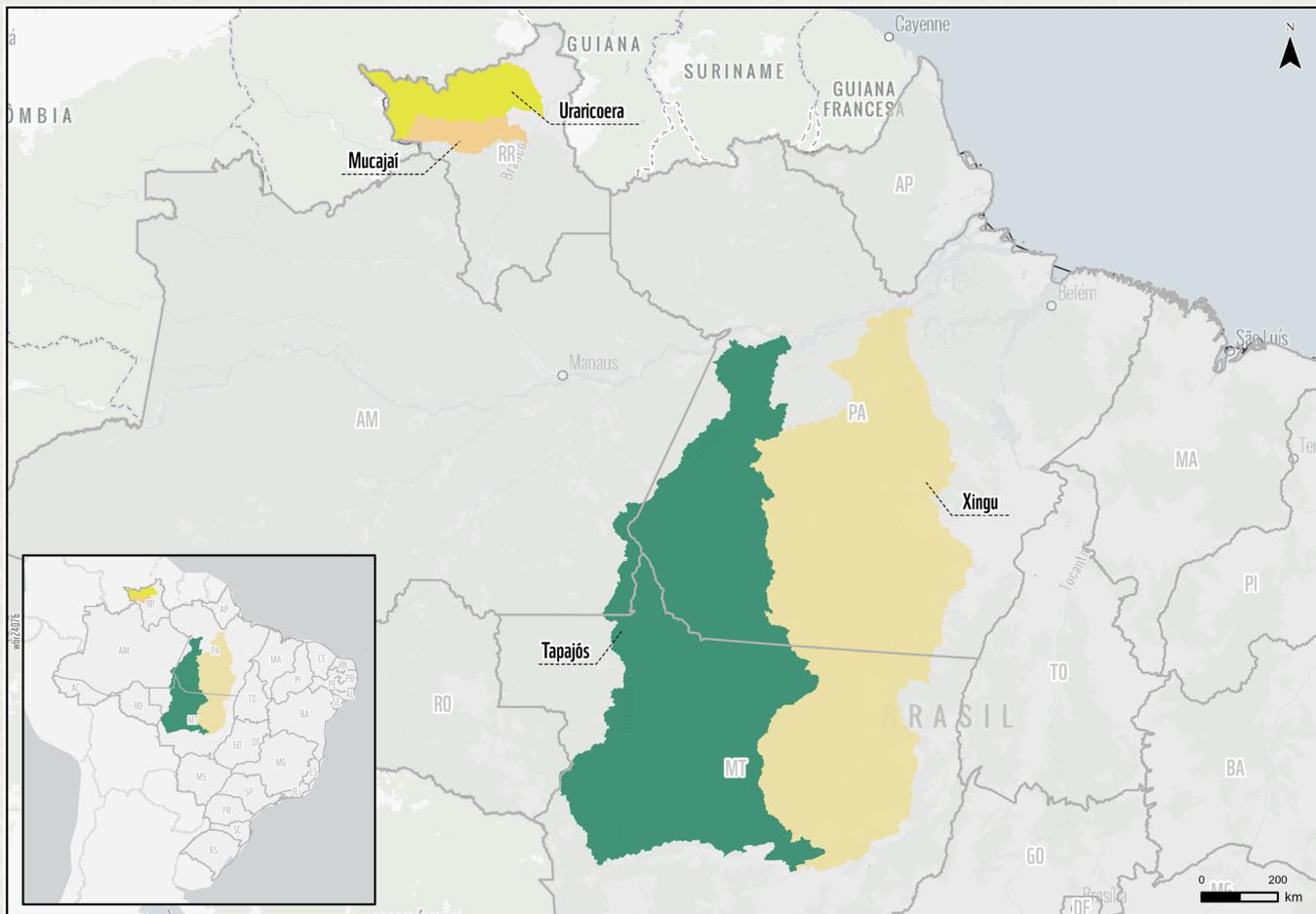
DOMINGUES, V.S. Mercury Dynamics in the Amazon: Understanding contamination complexities and charting a path to protection. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) – Centre for Environmental Policy, Imperial College London, Londres, 104 p. 2023.

Cabe destacar que o estudo não considerou a exposição ocupacional ao mercúrio, que poderia impactar significativamente os resultados, uma vez que muitos trabalhadores nas comunidades afetadas estão associados à atividade garimpeira.

Além disso, a bioacumulação do contaminante em peixes afeta também outros mamíferos e aves, e os impactos ambientais dessa exposição ao mercúrio deveriam ser explorados em outros estudos.

A modelagem focou nas bacias hidrográficas dos Rios Tapajós, Xingu, Rio Mucajaí e Uraricoera, que abrigam os territórios indígenas mais afetados pelo garimpo.

**Figura 1**



**Figura 1:**

**Bacias analisadas.**

As projeções devem ser interpretadas considerando o contexto específico de cada bacia e os desafios enfrentados em cada região, devendo ser avaliadas à luz das peculiaridades das bacias analisadas no estudo. A partir da interpretação, pode-se criar alternativas para aprimorar novas modelagens nos ecossistemas amazônicos.

A ausência de dados de amostragem ambiental reduz a precisão da modelagem. Assim, o monitoramento e a calibração devem ser uma prioridade, já que dados de entrada obtidos através de metodologias cientificamente consistentes e padronizadas refinariam os resultados.

# RESULTADOS



## DINÂMICA DA BIOACUMULAÇÃO DE MERCÚRIO

A acumulação de mercúrio em peixes segue um padrão consistente nas três bacias analisadas, com concentrações mais baixas nas cabeceiras e aumento progressivo nos corpos d'água principais, especialmente nas porções à jusante.

Esse padrão foi mais associado à capacidade de bioacumulação e à dinâmica de metilação do mercúrio do que à proximidade de áreas de mineração. As áreas alagáveis desempenham um papel crucial na metilação do mercúrio. Esses ambientes, ricos em carbono orgânico dissolvido e sujeitos a condições anóxicas, criam um ambiente favorável para a transformação do mercúrio em metilmercúrio, aumentando assim o risco de contaminação.

## BACIAS DO URARICOERA E MUCAJAÍ

Os principais cursos d'água e outros rios mais longos apresentam um maior potencial de bioacumulação de mercúrio, com valores acima de  $0,31 \mu\text{g g}^{-1}$  para peixes não-piscívoros e  $1,79 \mu\text{g g}^{-1}$  para peixes piscívoros em várias sub-bacias.

Além dos rios principais, destacam-se os Rios Parima, Uraricaá e Amajari, e afluentes como Auaris, Trairão e Ereu na bacia do Rio Uraricoera. Na bacia do Rio Mucajaí, além do Rio Apiaú, o Rio Couto de Magalhães também demonstra alto potencial de bioacumulação.

Na Bacia do Rio Uraricoera, os resultados ressaltam a importância das áreas alagáveis nos processos de metilação de mercúrio e na sua bioacumulação em peixes. A dinâmica de transformação, especialmente na área alagável conhecida como Lavrado, influenciou fortemente as projeções de contaminação no nordeste da bacia.

## BACIA DO TAPAJÓS

Os principais cursos d'água e outros rios mais longos apresentam um maior potencial de bioacumulação de mercúrio, com valores acima de  $0,36 \mu\text{g g}^{-1}$  para peixes não-piscívoros e  $6,46 \mu\text{g g}^{-1}$  para peixes piscívoros em várias sub-bacias.

O sudoeste da Macrobacia do Juruena, que inclui o Rio Camararé e seus afluentes, apresenta muitas sub-bacias com projeções elevadas. Destacam-se também as três regiões da Bacia do Rio Teles Pires, as bacias dos Rios Apiacás e Peixoto de Azevedo.

As melhores condições foram projetadas a montante da Bacia do Alto Tapajós, onde há presença predominante de cursos hídricos de menor ordem.

A presença de áreas alagadiças está associada a projeções elevadas das concentrações de mercúrio em peixes, mesmo em áreas com presença limitada de garimpos, como o Alto Juruena.

## BACIA DO XINGU

Apesar de uma menor presença de garimpo, a Bacia do Xingu apresenta níveis preocupantes de bioacumulação de mercúrio em peixes. A emissão de vapores metálicos pode ser um fator importante na dinâmica da contaminação.

As sub-bacias na Macrobacia do Rio Fresco e Macrobacia do Rio Iriri destacam-se por suas projeções significativas de concentração de mercúrio em peixes. Os resultados podem estar associados à maior atividade garimpeira na região.

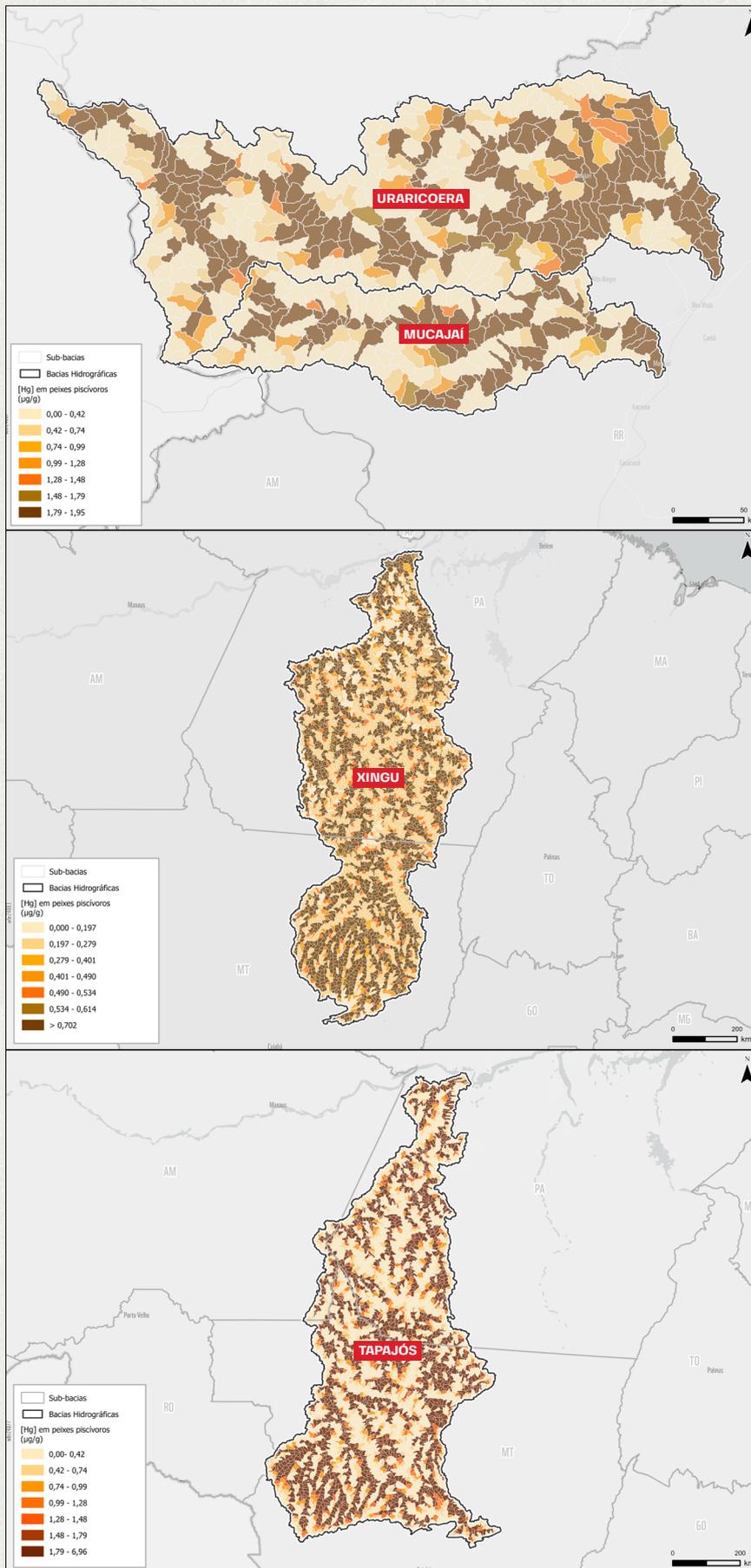
O sul da Bacia do Xingu, que inclui as Macrobacias do Rio Ronuro e Nascentes do Xingu, apresenta projeções expressivas mesmo em cursos hídricos de menor ordem. Na Macrobacia do Rio Iriri, mesmo as projeções dos afluentes Curuá, Carajari e Novo se destacam.

Os principais cursos d'água e outros rios mais longos apresentam um maior potencial de bioacumulação de mercúrio, com valores acima de  $0,092 \mu\text{g g}^{-1}$  para peixes não-piscívoros e  $0,7017 \mu\text{g g}^{-1}$  para peixes piscívoros em várias sub-bacias.

As áreas alagadiças estão associadas a projeções elevadas de concentrações de mercúrio em peixes, mesmo em áreas com presença limitada de garimpos. As nascentes do Rio Xingu, o Alto Xingu e as Bacias do Rio Ronuro e do Rio Suiá-Miçu são repletas de planícies de inundação de importância ecológica. Outra região repleta de áreas úmidas é a Volta Grande do Xingu, na Macrobacia do Baixo Xingu, nas redondezas da UHE Belo Monte.

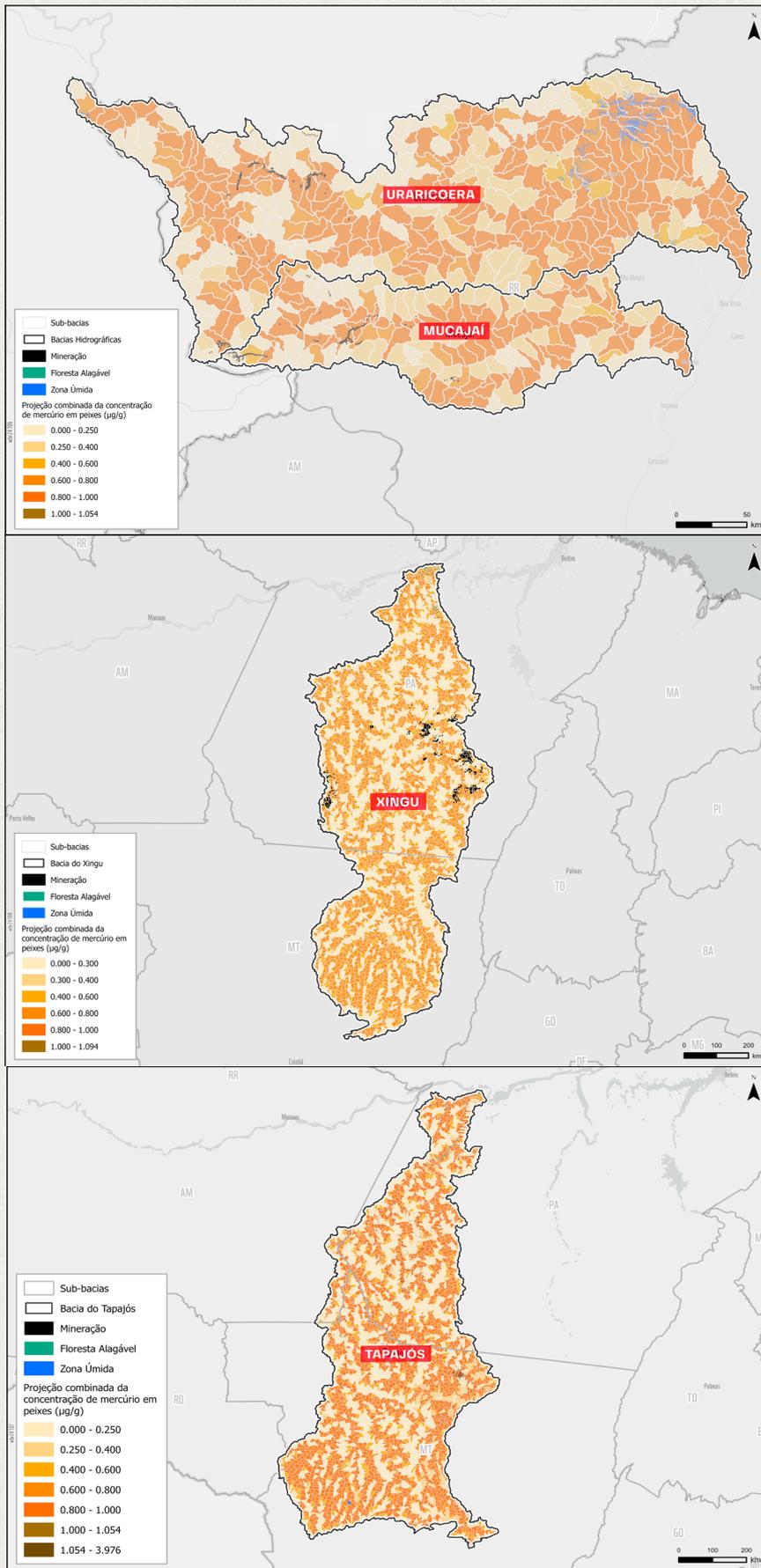
As melhores condições foram modeladas na Macrobacia do Baixo Xingu, em cursos hídricos de menor ordem.

**Figura 2**



**Figura 2:**  
Mapa com a projeção da acumulação de mercúrio em peixes piscívoros nas Bacias do Uraricoera e Mucajaí (1), do Xingu (2) e do Tapajós (3)

**Figura 3**



**Figura 3:**  
Mapa combinando as projeções de bioacumulação de mercúrio em peixes com a distribuição de áreas de mineração, áreas alagadas e florestas ripárias nas bacias dos Rios Uraricoera e Mucajaí (1), do Xingu (2) e do Tapajós (3)



## ADEQUAÇÃO À LEGISLAÇÃO BRASILEIRA E ANÁLISE DE RISCO

A análise das sub-bacias em relação aos limites máximos de mercúrio estabelecidos pela legislação brasileira revelou uma alta taxa de não conformidade das projeções com a Instrução Normativa Anvisa 160, de 1º de julho de 2022, que estabelece os limites máximos tolerados de contaminantes em alimentos. Ainda mais alarmantes são os resultados da avaliação de risco, que consideram as altas taxas de ingestão de peixes pela população amazônica. Esse resultado é preocupante, dado o impacto direto nas comunidades locais que dependem da pesca como fonte primária de alimento.

**Os riscos à saúde derivados da ingestão de mercúrio bioacumulado foram, então, avaliados para populações ribeirinhas e indígenas. Os resultados destacam um risco extremamente alto para homens e mulheres em mais de 50% das sub-bacias analisadas, números particularmente alarmantes para as populações indígenas.**

### BACIAS DO URARICOERA E MUCAJAÍ

Das 540 sub-bacias analisadas, uma parcela significativa de 56,7% não atenderia aos padrões estabelecidos na legislação ambiental brasileira. Especificamente, na bacia do Uraricoera, esse número chegou a 57,87%, enquanto na do Mucajaí foi de 53,94%. Esses resultados indicam uma preocupante prevalência de contaminação por mercúrio, com implicações diretas para as comunidades que dependem da pesca como fonte de subsistência.

Para as populações ribeirinhas, todas as sub-bacias representam alto risco para mulheres. Já 50,2% das unidades

representam risco muito alto para homens, considerando o maior consumo de peixes pela população masculina.

Resultados ainda mais alarmantes para populações indígenas, com 51,1% das sub-bacias classificadas como risco muito alto para mulheres e 53,7% para homens.

## BACIA DO TAPAJÓS

De acordo com os dados obtidos, das 3.791 sub-bacias analisadas, mais da metade, 51,77%, não estariam em conformidade com a legislação ambiental. Uma análise mais detalhada revela uma maior inadequação nas subunidades da Bacia do Baixo Teles Pires, Rio Apiacás e Alto e Médio Teles Pires, todas com porcentagens acima de 59%.

45,1% das sub-bacias representam risco muito alto para mulheres ribeirinhas. Devido ao maior consumo de peixes, 49,4% das unidades apresentam risco muito alto para homens.

Para populações indígenas, 49,6% das sub-bacias são consideradas territórios de risco muito alto para mulheres e 50,4% para homens.

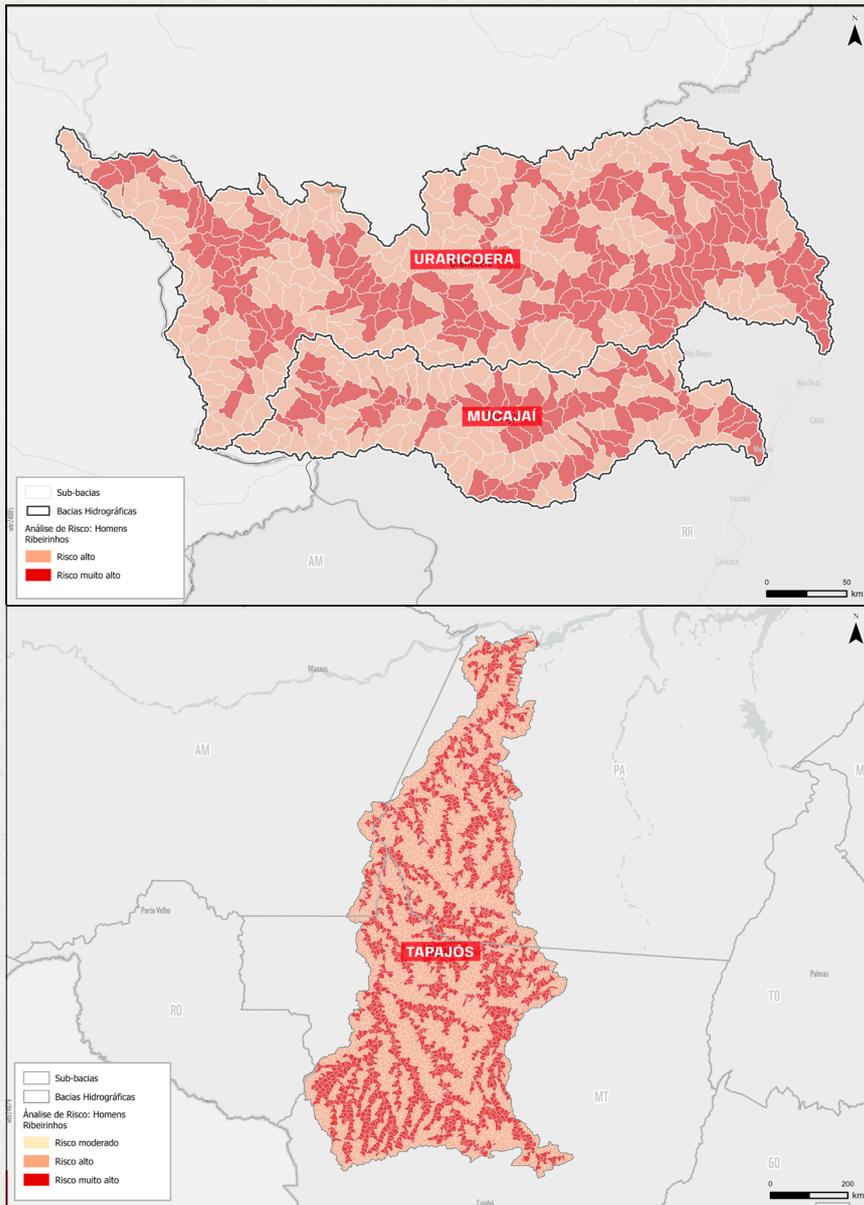
## BACIA DO XINGU

Embora apresente uma média de conformidade com os parâmetros legais, a bacia não está isenta de preocupações. Apesar de os resultados médios de concentração de mercúrio em peixes não ultrapassarem os limites regulatórios, as projeções causam apreensão, especialmente considerando os intervalos mínimos e máximos encontrados no estudo. Se não fossem impostas limitações, cerca de 48,2% das sub-bacias analisadas estariam em desacordo com a legislação.

Variação de 0.13  $\mu\text{g kg}^{-1} \text{bw}^{-1} \text{d}^{-1}$  para mulheres ribeirinhas até 1.02  $\mu\text{g kg}^{-1} \text{bw}^{-1} \text{d}^{-1}$  para homens indígenas.

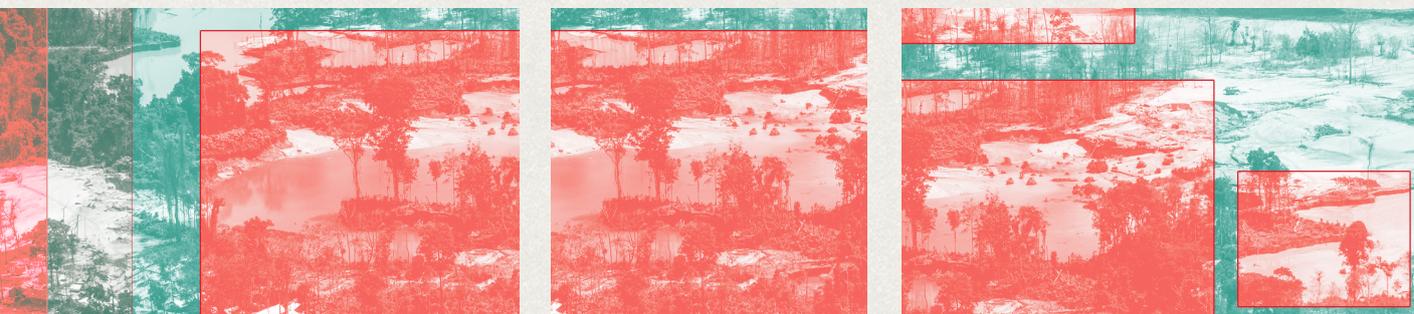
Todos os resultados estão na categoria de alto risco, ainda que destacando maior vulnerabilidade das comunidades indígenas devido ao maior consumo de peixes, reproduzindo o padrão de maior risco para homens.

**Figura 4**



**Figura 4:**  
Sub-bacias analisadas cujas projeções da concentração de mercúrio em peixes excedem os limites da legislação brasileira nas Bacias do Uraricoera e Mucajá (1) e Tapajós (2).

# CONCLUSÕES



Os principais resultados do estudo revelaram uma tendência do mercúrio em se acumular ao longo dos cursos hídricos da Amazônia.

**As projeções mostram concentrações mais altas de mercúrio em peixes a jusante dos rios, impulsionadas pela dispersão dos sedimentos e pela capacidade de bioacumulação do metal.**

As modelagens destacam, ainda, o papel crítico das áreas alagáveis e das florestas ripárias no aumento dos níveis de metilmercúrio, o que amplifica o impacto da poluição no meio ambiente e na saúde das pessoas. Portanto, é imperativo considerar as peculiaridades dos ecossistemas amazônicos para se prever efetivamente o transporte e o destino do contaminante.

Além disso, a implantação de infraestruturas que aumentem a oferta de ambientes favoráveis à metilação do mercúrio, como a criação de reservatórios para a geração de energia hidrelétrica, requer uma avaliação criteriosa, principalmente em rios onde a contaminação pelo metal já é uma realidade.

Fica evidente, ainda, que a atual regulamentação brasileira acerca das concentrações de mercúrio em peixes não é capaz de proteger adequadamente as comunidades dos efeitos nocivos do contaminante na saúde das pessoas. O alto consumo de pescado pelas populações amazônicas faz com que a exposição aumente significativamente e a análise de risco ressalta como muitas comunidades, especialmente comunidades tradicionais, estão vulneráveis.

Os modelos matemáticos, como o SERAFM, mostraram potencial de serem empregados para aperfeiçoar o planejamento, driblando a escassez de dados na região Amazônica. Com dados de entrada de melhor qualidade, calibração adequada e ajuste dos parâmetros de cálculo para refletirem cada vez melhor a dinâmica do mercúrio no meio ambiente, esses protocolos podem fornecer projeções mais refinadas e cenários mais realistas, orientando ações de prevenção e de mitigação dos impactos do mercúrio no meio ambiente e na saúde das pessoas.

A integração dos resultados da modelagem com as diversas plataformas de informação existentes, de dados ambientais e socioeconômicos, permitirá desenhar e implementar políticas públicas mais eficazes, capazes de gerenciar a contaminação de mercúrio na região.

# RECOMENDAÇÕES



\_\_\_\_\_ A implementação de um programa de monitoramento amplo, adaptado às condições das diferentes sub-regiões.

O sistema deve priorizar áreas mais vulneráveis e buscar produzir informações que aprimorem o planejamento de maneira iterativa. A colaboração com comunidades e parceiros locais é chave para alcançar resultados contínuos e abrangentes.



\_\_\_\_\_ O aprimoramento da legislação brasileira, substituindo os limites fixos atualmente estabelecidos por parâmetros baseados em análise de risco que considerem o alto consumo de peixe na região.

O estabelecimento de um conselho alimentar ativo e dinâmico, capaz de fornecer diretrizes claras para as populações locais acerca do consumo de peixe. As orientações devem considerar as diferentes espécies e sua frequência de ingestão, respeitando sempre as características socioeconômicas de cada comunidade.



\_\_\_\_\_ A implementação de um sistema padronizado de informações e a complementação das bases de dados existentes, como o Observatório do Mercúrio, para apoiar o planejamento governamental e guiar a tomada de decisões.

# FICHA TÉCNICA

WWF-BRASIL  
DIRETOR EXECUTIVO

Mauricio Voivodic

---

## AUTORES

Victor Domingues  
Carlos Colmenero  
Maria Vinograd  
Rodrigo Balbuena  
Marcelo Oliveira

---

## TEXTO

Victor Domingues (Redação)  
Rodrigo Balbuena (Redação)  
Marcelo Oliveira (Redação)  
Tainá Aragão (Revisão e Comunicação)

---

## RESPONSÁVEIS TÉCNICOS

Marcelo Oliveira (Especialista de Conservação WWF-Brasil)  
Rodrigo Balbuena (Especialista de Conservação WWF-Brasil)  
Tainá Aragão (Comunicadora Socioambiental WWF-Brasil)  
Regiane GUZZON (Analista de Engajamento)

MAPAS: Círculo de Ciências WWF-Brasil

---

## DESIGN EDITORIAL

Isabella Luz

DESIGN DA CAPA

© Isabella Luz

# BIBLIOGRAFIA



[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, 599, 20 p. 2024.](#)