EXPANSÃO DO GARIMPO ILEGAL E RISCOS SOCIOAMBIENTAIS ASSOCIADOS AO MERCÚRIO NA TERRA INDÍGENA SARARÉ (MATO GROSSO)

EXPANSION OF ILLEGAL GOLD MINING AND SOCIOENVIRONMENTAL RISKS ASSOCIATED WITH MERCURY IN THE SARARÉ INDIGENOUS LAND (MATO GROSSO)

EXPANSIÓN DE LA MINERÍA DE ORO ILEGAL Y RIESGOS SOCIOAMBIENTALES ASOCIADOS AL MERCURIO EN LA TIERRA INDÍGENA SARARÉ (MATO GROSSO)

10.56238/IIMultiCientifica-155

Silvério Teixeira dos Santos
Farmacêutico-Bioquímico; Mestre em Farmácia (Análises Clínicas); doutorando em Ciências Ambientais
Instituição: Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA)
E-mail: silverio.teixeira@unemat.br

Maria Aparecida Pereira Pierangeli
Doutora em Agronomia (Solos e Nutrição de Plantas)
Instituição: Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), Campus Universitário de Pontes e Lacerda e Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA)
E-mail: mapp@unemat.br

RESUMO

A expansão da mineração ilegal e mecanizada de ouro na Terra Indígena (TI) Sararé, localizada no sudoeste de Mato Grosso e habitada pelo povo Nambikwara, intensificou a degradação socioambiental no território e gerou a necessidade de monitoramento químico contínuo. Este estudo objetivou caracterizar a evolução espaço-temporal do garimpo entre 2019 e 2025, determinar as concentrações de arsênio (As), chumbo (Pb) e mercúrio (Hg) em áreas impactadas e verificar se amostras locais apresentavam uma faixa de Hg adequada para avaliar o desempenho do equipamento de fluorescência de raios X portátil (pXRF) na triagem ambiental de campo. Para isso, integraram-se imagens de satélite (PlanetScope), dados de monitoramento (MapBiomas Alerta), registros de fiscalização do IBAMA e da Polícia Federal e análises de laboratório de referência para 40 amostras de solo e sedimento (coletadas entre 30 e 40 cm de profundidade). A análise geoespacial evidenciou o avanço acelerado da atividade garimpeira, especialmente a partir de 2023, com a área degradada por desmatamento, cavas, aberturas de acesso e alteração de leitos fluviais saltando de aproximadamente 92 hectares em 2019 para cerca de 3.000 hectares em 2025. As análises laboratoriais de referência (métodos USEPA 3050B e USEPA 7471B) reportaram concentrações censuradas à esquerda para todas as 40 amostras: As < 1,140 mg kg^{-1}, Pb < 0,187 mg kg^{-1} e Hg < 25 µg kg^{-1} (< 0,025 mg kg^{-1}). Esses valores correspondem a limites superiores analíticos de nível traço e permaneceram significativamente abaixo dos Valores de Prevenção para Solo estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 420/2009. A ausência de

concentrações quantificadas de Hg impediu a avaliação da resposta espectral do pXRF em matrizes ambientais reais, não havendo suporte para recomendar o equipamento na triagem de Hg em níveis traço sem a prévia validação de seu limite de detecção em ensaios controlados. Conclui-se que a degradação territorial visível não implica, isoladamente, a presença de contaminação por Hg nos pontos amostrados, embora os resultados não descartem anomalias em outros locais, compartimentos ou na biota. O estudo estabelece uma linha de base química local e reforça a relevância de uma abordagem de Saúde Única, combinando fiscalização permanente, recuperação ambiental e monitoramento integrado dos ecossistemas aquáticos e da saúde comunitária.

Palavras-chave: Garimpo Ilegal. Mercúrio. Terra Indígena. Saúde Única. Monitoramento Ambiental.

ABSTRACT

The expansion of illegal and mechanized gold mining in Sararé Indigenous Land (TI), located in southwestern Mato Grosso and inhabited by the Nambikwara people, has intensified socio-environmental degradation in the territory and generated the need for continuous chemical monitoring. This study aimed to characterize the spatiotemporal evolution of mining activities between 2019 and 2025, determine the concentrations of arsenic (As), lead (Pb), and mercury (Hg) in impacted areas, and verify whether local samples presented an appropriate Hg range to assess the performance of portable X-ray fluorescence equipment (pXRF) in field environmental screening. To accomplish this, satellite imagery (PlanetScope), monitoring data (MapBiomas Alerta), inspection records from IBAMA and the Federal Police, and reference laboratory analyses were integrated for 40 soil and sediment samples (collected between 30 and 40 cm depth). Geospatial analysis revealed the accelerated advancement of mining activity, especially from 2023 onwards, with the area degraded by deforestation, excavations, access openings, and alteration of riverbeds increasing from approximately 92 hectares in 2019 to about 3,000 hectares in 2025. Reference laboratory analyses (USEPA 3050B and USEPA 7471B methods) reported left-censored concentrations for all 40 samples: As < 1.140 mg kg^{-1}, Pb < 0.187 mg kg^{-1}, and Hg < 25 µg kg^{-1} (< 0.025 mg kg^{-1}). These values correspond to trace-level analytical upper limits and remained significantly below the Soil Prevention Values established by CONAMA Resolution No. 420/2009. The absence of quantified Hg concentrations prevented the evaluation of the spectral response of pXRF in real environmental matrices, with no support to recommend the equipment for Hg screening at trace levels without prior validation of its detection limit in controlled assays. It is concluded that visible territorial degradation does not, by itself, imply the presence of Hg contamination at the sampled points, although the results do not rule out anomalies at other locations, compartments, or in biota. The study establishes a local chemical baseline and reinforces the relevance of a One Health approach, combining permanent enforcement, environmental recovery, and integrated monitoring of aquatic ecosystems and community health.

Keywords: Illegal Gold Mining. Mercury. Indigenous Land. One Health. Environmental Monitoring.

RESUMEN

La expansión de la minería ilegal y mecanizada de oro en la Tierra Indígena (TI) Sararé, ubicada en el suroeste de Mato Grosso y habitada por el pueblo Nambikwara, ha intensificado la degradación socioambiental en el territorio y generó la necesidad de monitoreo químico continuo. Este estudio tuvo como objetivo caracterizar la evolución espacio-temporal de la actividad minera entre 2019 y 2025, determinar las concentraciones de arsénico (As), plomo (Pb) y mercurio (Hg) en áreas impactadas y verificar si las muestras locales presentaban un rango de Hg adecuado para evaluar el desempeño del

equipamiento de fluorescencia de rayos X portátil (pXRF) en el cribado ambiental de campo. Para esto, se integraron imágenes de satélite (PlanetScope), datos de monitoreo (MapBiomas Alerta), registros de fiscalización del IBAMA y de la Policía Federal y análisis de laboratorio de referencia para 40 muestras de suelo y sedimento (recolectadas entre 30 y 40 cm de profundidad). El análisis geoespacial evidenció el avance acelerado de la actividad minera, especialmente a partir de 2023, con el área degradada por deforestación, excavaciones, aberturas de acceso y alteración de lechos fluviales saltando de aproximadamente 92 hectáreas en 2019 a cerca de 3.000 hectáreas en 2025. Los análisis de laboratorio de referencia (métodos USEPA 3050B y USEPA 7471B) reportaron concentraciones censuradas a la izquierda para las 40 muestras: As < 1,140 mg kg^{-1}, Pb < 0,187 mg kg^{-1} y Hg < 25 µg kg^{-1} (< 0,025 mg kg^{-1}). Estos valores corresponden a límites superiores analíticos de nivel traza y permanecieron significativamente por debajo de los Valores de Prevención para Suelo establecidos por la Resolución CONAMA nº 420/2009. La ausencia de concentraciones cuantificadas de Hg impidió la evaluación de la respuesta espectral del pXRF en matrices ambientales reales, no habiendo apoyo para recomendar el equipamiento en el cribado de Hg en niveles trazo sin la previa validación de su límite de detección en ensayos controlados. Se concluye que la degradación territorial visible no implica, aisladamente, la presencia de contaminación por Hg en los puntos muestreados, aunque los resultados no descartan anomalías en otros lugares, compartimentos o en la biota. El estudio establece una línea de base química local y refuerza la relevancia de un enfoque de Salud Única, combinando fiscalización permanente, recuperación ambiental y monitoreo integrado de los ecosistemas acuáticos y la salud comunitaria.

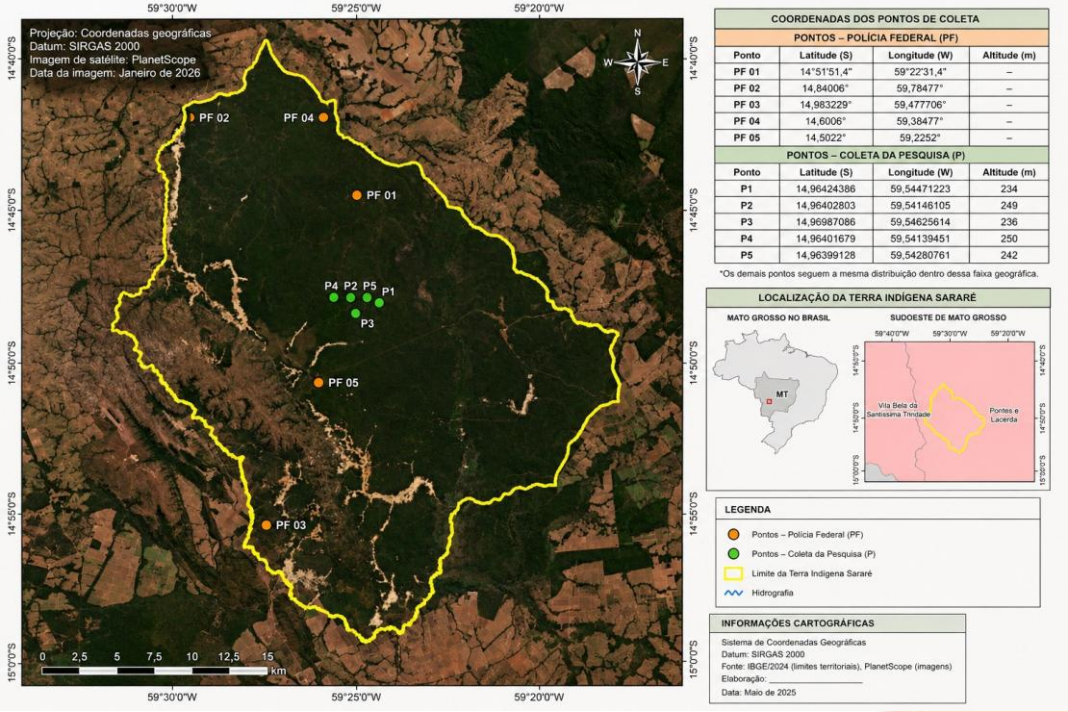
Palabras clave: Minería Ilegal de Oro. Mercurio. Tierra Indígena. Salud Única. Monitoreo Ambiental.

1 INTRODUÇÃO

A mineração ilegal de ouro na Amazônia brasileira passou a empregar escavadeiras hidráulicas, motores, pistas de acesso e cadeias logísticas de alta capacidade. Essa mecanização acelera a remoção da vegetação e o revolvimento do solo, amplia a carga de sedimentos nos cursos d'água e aumenta a capacidade de reorganização das frentes de extração (CASTRO; SILVA-FORSBERG, 2015; FERREIRA NETO *et al.*, 2024). Na TI Sararé, essa transformação é visível na expansão das cicatrizes de garimpo e na escala da infraestrutura identificada pelas operações de fiscalização.

A TI Sararé localiza-se no sudoeste de Mato Grosso, na região do Vale do Guaporé, em área tradicionalmente ocupada pelo povo Nambikwara (Figura 1). A distribuição conjunta dos pontos registrados pela Polícia Federal e das coletas realizadas nesta pesquisa permite relacionar a ocupação territorial do garimpo às áreas efetivamente amostradas. Sua posição em uma zona de transição Cerrado–Amazônia confere relevância hidroecológica ao território e impõe cuidado interpretativo, pois sazonalidade hídrica, mosaicos de vegetação, matéria orgânica e condições redox podem influenciar a mobilização e a transformação de contaminantes (ISA, 2023; LIMA *et al.*, 2022, 2023).

Figura 1. Área de estudo e distribuição dos pontos de coleta na Terra Indígena Sararé (MT). Os pontos em laranja correspondem às coordenadas registradas pela Polícia Federal (PF), e os pontos em verde às coletas realizadas na pesquisa (P). O limite da Terra Indígena Sararé está representado em amarelo sobre imagem PlanetScope. Sistema de coordenadas geográficas, datum SIRGAS 2000.



Fonte: IBGE (2024), PlanetScope e dados de campo; elaboração cartográfica: Rangel, E. G. O.

Os impactos do garimpo não se restringem à abertura de clareiras. A retirada da cobertura vegetal e o revolvimento de margens e leitos alteram a morfologia fluvial, favorecem erosão, turbidez e assoreamento, reduzem a qualidade de habitats aquáticos e podem comprometer usos locais da água. Em território indígena, essas mudanças se combinam a invasões recorrentes, conflitos, interrupção de práticas tradicionais e maior vulnerabilidade de comunidades que dependem diretamente dos ecossistemas para alimentação e reprodução sociocultural (FEARNSIDE, 2017; BRASIL, 1988; DPU, 2025).

O mercúrio adiciona uma dimensão persistente ao problema. Na extração de ouro por amalgamação, o Hg metálico pode alcançar solos e águas ou ser volatilizado durante a queima da amálgama. Após transporte e deposição, formas inorgânicas de Hg podem ser retidas em partículas e sedimentos; em zonas com baixa disponibilidade de oxigênio, processos microbianos favorecem a formação de metilmercúrio (MeHg), que se bioacumula e se biomagnifica nas redes tróficas aquáticas (DRISCOLL *et al.*, 2013; CASTILHOS; DOMINGOS, 2024). Em solos amazônicos, a interpretação também deve considerar a variabilidade do fundo geoquímico natural do Hg e sua relação com

atributos pedológicos e ambientais, evitando atribuir automaticamente toda ocorrência à mineração (LIMA *et al.*, 2022, 2023).

A perspectiva de Saúde Única oferece um eixo integrador porque considera, em conjunto, saúde humana, saúde animal e integridade ambiental. Nesse enquadramento, a alteração dos rios pode afetar a biota, a disponibilidade de pescado, a segurança alimentar e a saúde das comunidades, com implicações para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 2, 3, 6 e 12.

A Convenção de Minamata sobre Mercúrio, adotada em 2013, constitui o principal instrumento internacional voltado à proteção da saúde humana e do ambiente contra emissões e liberações antrópicas de mercúrio. Suas disposições incluem medidas relativas à mineração artesanal e de pequena escala de ouro, às áreas contaminadas, à redução das liberações ambientais e à proteção de populações vulneráveis. No Brasil, a Convenção foi promulgada pelo Decreto nº 9.470, de 14 de agosto de 2018 (CONVENÇÃO DE MINAMATA SOBRE MERCÚRIO, 2013; BRASIL, 2018; CASTILHOS; DOMINGOS, 2024).

Nesse contexto, a fluorescência de raios X portátil (pXRF) foi incorporada à investigação como uma alternativa potencial para ampliar a capacidade de triagem ambiental em áreas extensas, heterogêneas e de difícil acesso. A técnica reúne características particularmente atrativas para esse cenário, como portabilidade, rapidez analítica, caráter não destrutivo e obtenção de informações multielementares, podendo contribuir para a seleção de amostras e áreas prioritárias para confirmação laboratorial. Entretanto, sua resposta depende do elemento investigado, da matriz, da faixa de concentração, das características instrumentais e das condições de aquisição, tornando indispensável estabelecer experimentalmente sua capacidade e suas limitações antes de empregá-la como ferramenta de monitoramento (BRENT *et al.*, 2017; HORTA *et al.*, 2021; XU *et al.*, 2020). A incursão na TI Sararé teve, portanto, uma finalidade analítica adicional ao diagnóstico ambiental e territorial: obter solos e sedimentos provenientes de áreas diretamente afetadas pelo garimpo que pudessem servir como matrizes ambientais reais para avaliar a resposta do pXRF ao Hg. Assim, este estudo objetivou caracterizar a transformação socioambiental da TI Sararé, investigar As, Pb e Hg nas amostras coletadas e verificar se as concentrações encontradas permitiriam uma avaliação inicial da aplicabilidade do pXRF para triagem de Hg, integrando evidências geoespaciais, observações de campo e determinações laboratoriais de referência.

2 METODOLOGIA

2.1 DELINEAMENTO, FONTES DE DADOS E ETAPA DE CAMPO

A pesquisa combinou análise geoespacial, levantamento documental, revisão da literatura e trabalho de campo. A amostragem foi planejada não apenas para caracterizar a condição química dos solos e sedimentos nas áreas investigadas, mas também para localizar matrizes ambientais com Hg associado às frentes de garimpo que possibilitassem confrontar a resposta do pXRF com determinações laboratoriais de referência. O conjunto analítico compreendeu 40 amostras obtidas nos pontos identificados pela letra P e em locais vinculados, por colaboração da Polícia Federal, aos pontos PF (Figura 1). O material foi encaminhado ao laboratório de referência para determinação de Hg pelo método USEPA 7471B, baseado em vapor frio para matrizes sólidas e semissólidas, e para preparação/digestão de Pb e As pelo método USEPA 3050B (USEPA, 1996, 2007). Essa estratégia preservou o valor diagnóstico da campanha de campo e, simultaneamente, permitiu verificar se as amostras reais apresentavam uma faixa de Hg adequada para a etapa analítica pretendida com o equipamento portátil.

As amostras foram coletadas na faixa de 30 a 40 cm de profundidade, secas por 24 h a 45 °C em estufa ventilada e passadas por peneira de abertura de 0,2 mm. A temperatura de secagem foi mantida em 45 °C para minimizar potenciais perdas de Hg por volatilização. A Figura 1 apresenta a distribuição espacial dos pontos, mas não permite, por si só, identificar o compartimento físico de cada coleta.

Como procedimento de controle de qualidade analítica, 10% do conjunto amostral (n = 4) foi submetido a análises repetidas para verificação da consistência dos resultados. Adicionalmente, as 40 amostras foram submetidas à triagem qualitativa por fluorescência de raios X portátil (pXRF), com aquisição e inspeção dos espectros no software Bruker Instrument Tools (BIT), visando verificar a presença de sinais atribuíveis ao Hg e a outros elementos potencialmente tóxicos.

2.2 CRITÉRIOS DE ANÁLISE

Os materiais foram organizados em quatro eixos: expansão espacial do garimpo; alteração de solos e sistemas aquáticos; rotas do mercúrio e efeitos ecotoxicológicos; e repercussões sociais, territoriais e de saúde. Foram priorizadas fontes oficiais, artigos revisados por pares e estudos regionais. A interpretação do pXRF considerou que a resposta depende da matriz, da faixa de concentração e da calibração, e que a integração com outros sensores e métodos de referência pode

melhorar a estimativa de elementos potencialmente tóxicos (XU *et al.*, 2020; SHRESTHA *et al.*, 2022). As séries de degradação foram analisadas segundo a definição de cada fonte, e a etapa de campo foi incorporada como base empírica do estudo.

2.3 INTEGRAÇÃO GEOESPACIAL E AVALIAÇÃO ANALÍTICA

A análise articulou registros geoespaciais, documentos de fiscalização, literatura científica e dados de campo. Os resultados inferiores aos limites reportados pelo laboratório foram tratados como dados censurados à esquerda, sem atribuição de valores numéricos exatos. Para contextualização ambiental, os limites superiores reportados foram comparados aos Valores de Prevenção para solo da Resolução CONAMA nº 420/2009: 15 mg kg^{-1} para As, 72 mg kg^{-1} para Pb e 0,5 mg kg^{-1} para Hg. Essa comparação não substitui valores naturais regionais nem deve ser aplicada automaticamente a sedimentos submersos. A avaliação da aplicabilidade futura do pXRF incorpora a incerteza de medição, pois sua propagação pode alterar a classificação e o mapeamento de áreas contaminadas (HORTA *et al.*, 2021).

3 RESULTADOS E INTEGRAÇÃO AMBIENTAL

3.1 EVIDÊNCIAS DE CAMPO E DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA DEGRADAÇÃO

Os registros fotográficos produzidos durante operações de fiscalização documentam a dimensão material da atividade garimpeira na TI Sararé (Figura 2). A presença de galerias, cavas, reservatórios, frentes de extração, estruturas de processamento e bacias associadas ao beneficiamento confirma que a transformação da paisagem não resulta de ocorrências isoladas, mas de operações mecanizadas capazes de remover a cobertura vegetal, revolver grandes volumes de solo e sedimento e alterar a drenagem superficial (IBAMA, 2025; FERREIRA NETO *et al.*, 2024).

Figura 2. Registros fotográficos de áreas impactadas pela mineração ilegal de ouro durante operações de fiscalização: (A) galeria subterrânea; (B) paisagem degradada com múltiplas cavas e reservatórios; (C) frente de extração e estruturas operacionais; (D) área escavada com lagoas de rejeito; (E) estruturas de processamento do material aurífero; e (F) bacia associada ao beneficiamento.



Fonte: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e Polícia Federal.

A leitura das fotografias, em conjunto com o mapa de pontos, relaciona as feições observadas em campo às áreas efetivamente investigadas e fornece a base territorial para interpretar os resultados químicos. Essa integração entre evidência espacial e desenho amostral é necessária em áreas heterogêneas, nas quais a distribuição dos contaminantes pode ser descontínua e dependente da densidade de amostragem (TROYACK *et al.*, 2021; HORTA *et al.*, 2021).

3.2 PRESSÕES SOCIAIS, TERRITORIAIS E INSTITUCIONAIS

A presença continuada de frentes de garimpo produz efeitos que ultrapassam a dimensão biofísica. Documentos institucionais apontam invasões recorrentes, circulação de maquinário e pessoas não autorizadas, ameaças à integridade territorial e dificuldade de manter ações de fiscalização por longos períodos (DPU, 2025; MPF, 2026). Para o povo Nambikwara, a degradação de rios e áreas de uso tradicional pode afetar mobilidade, pesca, segurança alimentar e transmissão de práticas culturais. A participação direta das comunidades fortalece a caracterização desses efeitos e assegura que sua interpretação considere a experiência e as prioridades do povo Nambikwara.

As operações de repressão interrompem frentes de extração e desarticulam a infraestrutura do garimpo. Sua efetividade ambiental é ampliada quando desintrusão e vigilância territorial se articulam à recuperação de áreas degradadas e ao monitoramento de solos e sedimentos. A persistência do Hg e a possibilidade de remobilização durante erosão ou inundação justificam o acompanhamento posterior

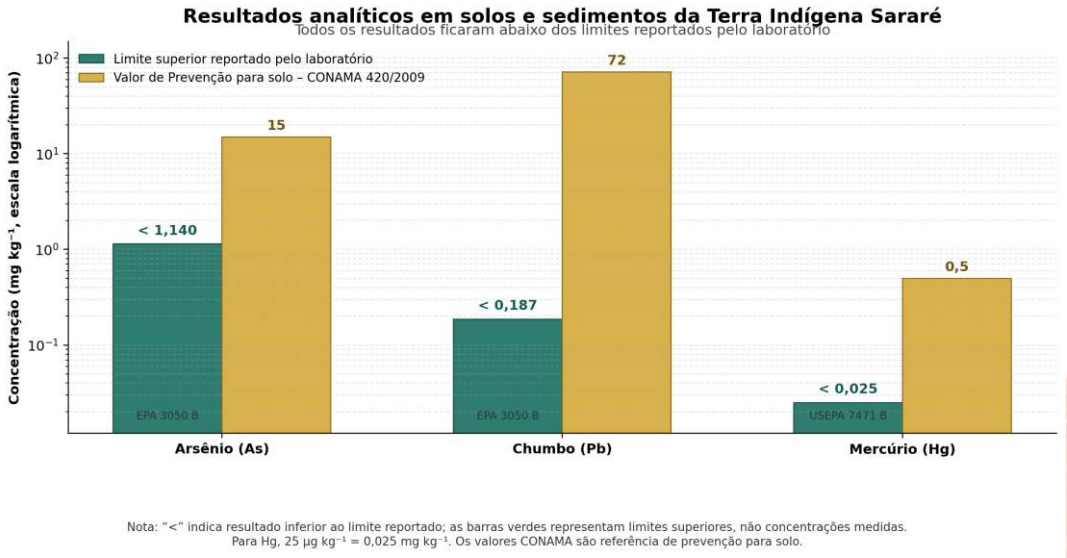
à retirada dos equipamentos (DRISCOLL *et al.*, 2013), compondo uma estratégia contínua de proteção territorial e mitigação dos passivos ambientais.

3.3 RESULTADOS ANALÍTICOS E AVALIAÇÃO PRELIMINAR DO PXRF

O trabalho de campo buscou localizar solos ou sedimentos com concentrações detectáveis de Hg em áreas associadas ao garimpo. Contudo, as 40 amostras avaliadas pelo laboratório de referência apresentaram arsênio (As) < 1,140 mg kg^{-1}, chumbo (Pb) < 0,187 mg kg^{-1} e mercúrio (Hg) < 25 µg kg^{-1}, equivalente a < 0,025 mg kg^{-1}. Como os resultados foram reportados com o sinal "<", esses números representam limites superiores analíticos e não concentrações efetivamente quantificadas. Os limites superiores permaneceram abaixo dos respectivos Valores de Prevenção para solo estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 420/2009 (BRASIL, 2009; Figura 3).

A triagem qualitativa realizada por pXRF com o software BIT também não evidenciou sinais espectrais atribuíveis ao Hg ou aos demais elementos potencialmente tóxicos investigados nas 40 amostras. Esse achado mostrou concordância qualitativa com os resultados inferiores aos limites reportados pelo laboratório de referência. Entretanto, a ausência de sinal no pXRF não comprova a ausência dos analitos, não constitui quantificação e não demonstra capacidade instrumental para detectar Hg em níveis-traço.

Figura 3. Resultados das análises de arsênio (As), chumbo (Pb) e mercúrio (Hg) nas 40 amostras de solos e sedimentos coletadas em regiões de garimpo da Terra Indígena Sararé. Os resultados foram inferiores aos limites reportados pelo laboratório: As < 1,140 mg kg^{-1}, Pb < 0,187 mg kg^{-1} e Hg < 25 µg kg^{-1} (< 0,025 mg kg^{-1}). Para contextualização, apresentam-se os Valores de Prevenção para solo da Resolução CONAMA nº 420/2009. Metodologias informadas pelo laboratório: Hg — USEPA 7471B; Pb e As — USEPA 3050B. O símbolo "<" indica dado censurado, não concentração quantificada.



Fonte: Dados da pesquisa.

Nenhuma das 40 amostras apresentou Hg em concentração quantificável que fornecesse uma faixa de referência adequada para calibrar ou avaliar o desempenho do pXRF em condições ambientais reais. Não foi determinado, neste estudo, um limite de detecção do pXRF para Hg nas matrizes locais; por isso, as amostras não demonstram o desempenho instrumental. Os valores inferiores a 0,025 mg kg^{-1} tampouco justificam recomendar pXRF para monitorar Hg em concentrações traço: uma aplicação a concentrações mais elevadas requer demonstração experimental de sinal distinguível, limite de detecção e confirmação laboratorial (BRENT *et al.*, 2017; AN *et al.*, 2023). Ao mesmo tempo, estabelece uma linha de base para os pontos avaliados e demonstra que a magnitude visual da degradação territorial não pode ser utilizada como substituto da determinação química. A heterogeneidade espacial de áreas contaminadas também exige planejamento do número e da distribuição das amostras, pois amostragens pontuais podem não interceptar hotspots mesmo em paisagens intensamente impactadas (TROYACK *et al.*, 2021; HORTA *et al.*, 2021).

4 DISCUSSÃO INTEGRADA

4.1 ROTAS BIOGEOQUÍMICAS DO MERCÚRIO

O ciclo conceitual proposto para a região do Sararé parte do uso de Hg^0 na formação da amálgama. Uma fração do metal pode alcançar diretamente solos, rejeitos e águas, enquanto outra pode ser emitida como vapor durante a queima, transportada pela atmosfera e posteriormente depositada por vias seca ou úmida. Após oxidação, o Hg^{2+} pode permanecer dissolvido ou adsorvido a partículas minerais e matéria orgânica. Em sedimentos anóxicos, microrganismos podem converter frações biodisponíveis em CH_3Hg^+, que é incorporado por organismos de base e transferido ao longo da cadeia trófica (DRISCOLL *et al.*, 2013; CASTILHOS; DOMINGOS, 2024).

Figura 4. Síntese conceitual das principais rotas do mercúrio associadas ao garimpo na região do Sararé: amalgamação, volatilização, transporte e deposição, entrada em solos e rios, metilação microbiana, transferência trófica, biomagnificação e exposição humana potencial.



Fonte: Elaboração do autor com apoio de ferramenta de inteligência artificial, a partir de Driscoll *et al.* (2013), Castilhos e Domingos (2024) e Castilho *et al.* (2026).

A Figura 4 funciona como modelo conceitual da pesquisa e organiza as rotas prioritárias de investigação: uso e perda de Hg no beneficiamento do ouro; transferência para solos e ambientes aquáticos; retenção em partículas e matéria orgânica; metilação em microambientes redutores; incorporação pela biota; e transferência trófica. Temperatura, pulso hidrológico, granulometria,

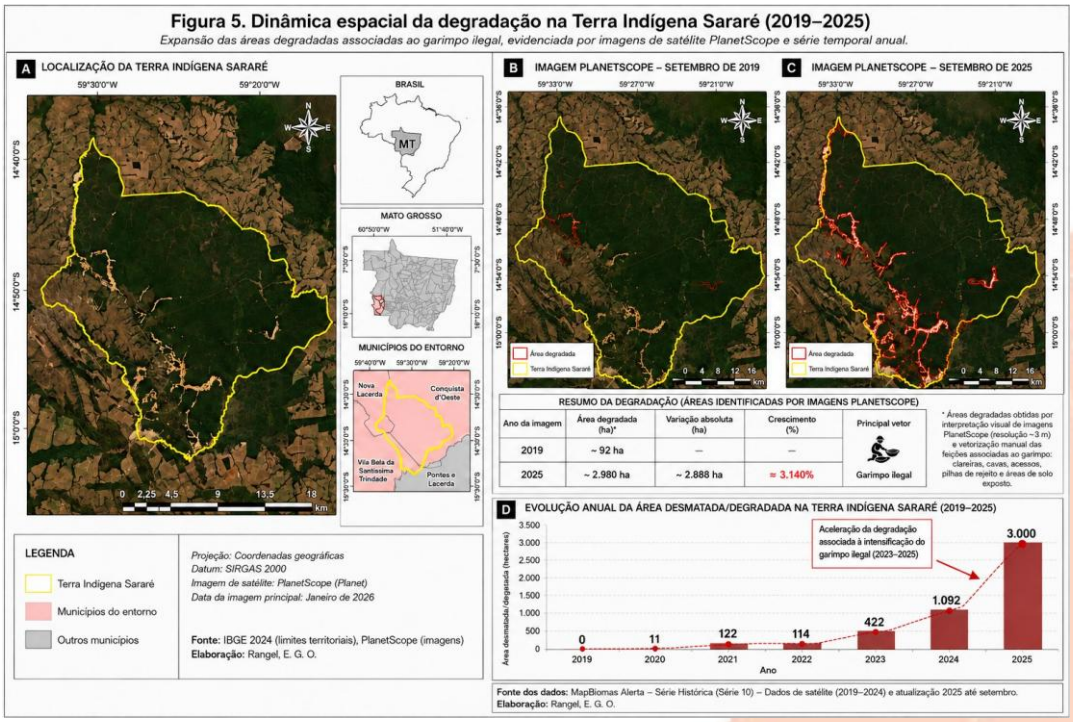
matéria orgânica, pH e condições redox definem a intensidade de cada processo e devem orientar a seleção das matrizes, a localização dos pontos e a interpretação dos resultados ambientais (DRISCOLL *et al.*, 2013; LIMA *et al.*, 2022).

A evidência regional reforça a importância da investigação na TI Sararé. Lázaro *et al.* (2025) encontraram Hg total em sedimentos de rios de Mato Grosso entre 1,4 e 948,1 μg kg^{-1} e identificaram o rio Guaporé como ponto crítico, com média reportada de 731,5 μg kg^{-1}. Esses valores oferecem uma referência hidrográfica relevante para comparar os resultados locais de solo e planejar a ampliação do monitoramento para sedimentos e sistemas aquáticos.

4.2 DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA DEGRADAÇÃO AMBIENTAL

A dinâmica espaço-temporal da degradação ambiental na Terra Indígena Sararé é sintetizada na Figura 5, que reúne, em uma única composição, a localização do território, os cenários de 2019 e 2025 e a evolução anual das áreas degradadas. Essa leitura integrada permite avaliar simultaneamente onde ocorreu a expansão, sua magnitude e, sobretudo, a mudança de velocidade do processo ao longo do período. Mais do que um aumento contínuo do desmatamento, a série revela uma inflexão a partir de 2023, seguida por forte aceleração em 2024 e 2025, compatível com a intensificação recente do garimpo ilegal documentada por levantamentos independentes (AGÊNCIA PÚBLICA, 2025; DPU, 2025; IBAMA, 2025).

Figura 5. Dinâmica espaço-temporal da degradação ambiental na Terra Indígena Sararé (MT) entre 2019 e 2025. (A) Localização da Terra Indígena Sararé no contexto do sudoeste de Mato Grosso e da Amazônia Legal; (B) distribuição das áreas degradadas identificadas por imagens PlanetScope em setembro de 2019; (C) expansão das áreas degradadas em setembro de 2025; e (D) evolução anual da área degradada por garimpo ilegal, identificada na própria composição como MapBiomas Alerta, Série Histórica (Série 10), para 2019–2024, e atualização de 2025 a partir de imagens PlanetScope. A comparação evidencia a rápida intensificação da atividade garimpeira, caracterizada pela expansão das frentes de mineração, abertura de novas vias de acesso, formação de cavas, pilhas de rejeito e aumento expressivo das áreas degradadas, principalmente a partir de 2023. Fonte, conforme os créditos inscritos na imagem: IBGE (2024), limites territoriais; PlanetScope (Planet), imagens de satélite; MapBiomas Alerta, Série Histórica (Série 10), gráfico anual até 2024; atualização de 2025 até setembro a partir de imagens de satélite. Elaboração cartográfica e composição: Rangel, E. G. O.



Fonte: IBGE (2024), limites territoriais; PlanetScope (Planet), imagens de satélite; MapBiomas Alerta, Série Histórica (Série 10), gráfico anual até 2024; atualização de 2025 até setembro a partir de imagens de satélite. Elaboração cartográfica e composição: Rangel, E. G. O.

A comparação das cartas-imagem evidencia uma transformação expressiva da paisagem da Terra Indígena Sararé entre 2019 e 2025. Mais do que representar uma progressão temporal uniforme, as evidências espaciais demonstram a ampliação e a redistribuição das áreas diretamente afetadas pelo garimpo, caracterizadas pela expansão das frentes de exploração, abertura de acessos, formação de cavas e aumento das superfícies de solo exposto. A interpretação conjunta desses dados deve considerar as particularidades temporais e metodológicas das diferentes bases utilizadas na composição da Figura 5, evitando que valores provenientes de levantamentos distintos sejam interpretados como uma única série contínua. Ainda assim, as evidências geoespaciais convergem ao demonstrar uma intensificação substancial da pressão garimpeira sobre a TI Sararé nos anos mais recentes.

Os valores aproximados de 92 ha em 2019 e 2.980 ha em 2025 do quadro comparativo de cartas-imagem representam áreas identificadas na interpretação visual de imagens PlanetScope. O gráfico anual da mesma composição apresenta outra série, atribuída ao MapBiomas Alerta até 2024 e atualizada para 2025; o zero indicado para 2019 nesse gráfico não deve ser equiparado à estimativa de aproximadamente 92 ha do quadro cartográfico. As duas séries exigem identificação separada de fonte, critério de mapeamento e unidade temporal para comparação quantitativa.

A inflexão observada na Figura 5 encontra respaldo em fontes independentes. Levantamento divulgado em 2025 registrou crescimento de 93% da área explorada por garimpo na TI Sararé entre 2023 e 2024, em contraste com a redução registrada em outros territórios indígenas monitorados no mesmo período (AGÊNCIA PÚBLICA, 2025). No ano seguinte, a intensificação tornou-se ainda mais evidente: registros oficiais apontaram 1.814 alertas relacionados ao garimpo ilegal na TI Sararé em 2025, reforçando que o avanço identificado por sensoriamento remoto corresponde a uma pressão territorial persistente e de grande escala (MINISTÉRIO DOS POVOS INDÍGENAS, 2025).

Esse crescimento não representa apenas supressão de vegetação. A expansão espacial das frentes de mineração é acompanhada pela abertura de vias de acesso, multiplicação e ampliação de cavas, formação de áreas extensas de solo exposto, depósitos de rejeitos e estruturas de apoio ao beneficiamento mineral. Operações de fiscalização também documentaram o emprego de maquinário pesado e infraestrutura capaz de sustentar elevada capacidade operacional, enquanto a proximidade da BR-174 e a logística do entorno favorecem o acesso ao território (IBAMA, 2025; DPU, 2025). O conjunto dessas evidências é compatível com uma mudança de escala da atividade, aproximando-a de um processo mecanizado e organizado de exploração, com capacidade de modificar rapidamente a paisagem.

As consequências físicas ultrapassam a área diretamente desmatada. A abertura sucessiva de cavas, o revolvimento de grandes volumes de solo e sedimento e a intervenção sobre canais naturais podem alterar a drenagem superficial, favorecer erosão e assoreamento e formar reservatórios artificiais associados às frentes de mineração. Essas mudanças modificam a conectividade entre ambientes terrestres e aquáticos e criam zonas de deposição e remobilização de partículas finas, matéria orgânica e contaminantes, ampliando a complexidade do monitoramento ambiental (FEARNSIDE, 2017; RINCHEVAL; COHEN; HEMMINGS, 2019).

A transformação da paisagem assume ainda dimensão socioambiental porque ocorre em território tradicionalmente ocupado pelo povo Nambikwara. A degradação de corpos hídricos, a

fragmentação da cobertura vegetal, a ocupação de áreas de uso tradicional e a circulação de pessoas e maquinário externos ao território podem interferir na mobilidade, na pesca, na caça, na coleta e em práticas culturais relacionadas ao uso da paisagem. Documentos institucionais relatam, adicionalmente, conflitos, ameaças e pressões sociais associadas à permanência do garimpo, demonstrando que a alteração detectada por sensoriamento remoto integra um processo territorial mais amplo (DPU, 2025).

A continuidade da degradação após o intervalo representado na Figura 5 reforça essa interpretação. Informações institucionais divulgadas em 2026 estimaram aproximadamente 4.200 ha já impactados, indicando que a pressão observada até 2025 não se encerrou com o término da série analisada (IBAMA, 2026). Ao mesmo tempo, a magnitude visual e espacial da degradação não permite inferir automaticamente a distribuição de Hg. Nas 40 amostras investigadas, o laboratório de referência não identificou concentrações quantificáveis de As, Pb ou Hg. Essa aparente dissociação é cientificamente relevante: o sensoriamento remoto demonstra onde e com que intensidade a paisagem está sendo transformada, enquanto a análise química mostra que a presença de atividade garimpeira, isoladamente, não prediz a concentração de Hg nos pontos e matrizes amostrados. Esse contraste reforça a necessidade de integrar análise geoespacial, amostragem direcionada, métodos laboratoriais de referência e técnicas rápidas de triagem, entre elas o pXRF (LIMA *et al.*, 2022, 2023; TROYACK *et al.*, 2021; HORTA *et al.*, 2021).

4.3 POTENCIAL E LIMITAÇÕES DO PXRF NO MONITORAMENTO AMBIENTAL

Obter amostras ambientais representativas de condições reais de ocorrência de Hg era uma etapa fundamental para avaliar a aplicabilidade do pXRF no contexto da TI Sararé. Diferentemente de materiais preparados exclusivamente em laboratório, solos e sedimentos provenientes das frentes de garimpo incorporam naturalmente a complexidade da matriz ambiental, incluindo variações de granulometria, umidade, matéria orgânica, mineralogia e composição elementar. Em princípio, esse conjunto permitiria verificar se a resposta instrumental do pXRF seria suficientemente distinta para reconhecer Hg em uma situação ambiental real e, posteriormente, apoiar a seleção de amostras para confirmação por métodos laboratoriais de referência. Em outros contextos, o equipamento tem apoiado o mapeamento biogeoquímico de rejeitos, a avaliação de barragens de mineração e o acompanhamento espaço-temporal de solos afetados por acidentes minerários, demonstrando utilidade operacional para

elementos cuja concentração e resposta espectral sejam adequadas (RINCHEVAL; COHEN; HEMMINGS, 2019; FERREIRA *et al.*, 2021; JHA *et al.*, 2021).

As determinações laboratoriais, contudo, alteraram o percurso experimental inicialmente previsto. Nenhuma das 40 amostras apresentou Hg em concentração quantificável, sendo reportado Hg < 25 µg kg^{-1} (< 0,025 mg kg^{-1}). Consequentemente, o conjunto ambiental obtido na TI Sararé não ofereceu uma faixa de concentrações conhecida e suficientemente ampla para construir uma relação entre concentração de referência e resposta instrumental. A discrepância entre o baixo limite reportado pelo laboratório (< 0,025 mg kg^{-1}) e a sensibilidade ainda não demonstrada do instrumento portátil impede extrapolar esses resultados para uma capacidade de triagem em níveis traço. Não se deve atribuir ao modelo utilizado um limite de detecção numérico retirado de outro equipamento ou de condições analíticas distintas. Para delimitar a triagem de anomalias em concentrações mais elevadas, torna-se necessário estabelecer, em condições controladas, se o equipamento produz resposta mensurável ao Hg, a partir de qual faixa de concentração essa resposta se torna distinguível e como as características da matriz interferem no sinal. Essa necessidade conduz naturalmente à avaliação crítica das evidências disponíveis para o uso do pXRF e à construção de experimentos com concentrações conhecidas de Hg e controle progressivo das variáveis capazes de modificar a resposta instrumental (SIKORA *et al.*, 2021; ACQUAH *et al.*, 2022; SUT-LOHMANN *et al.*, 2022; BRENT *et al.*, 2017; AN *et al.*, 2023). Estabelece-se, desse modo, uma sequência metodológica na qual a realidade ambiental orienta a etapa experimental: o diagnóstico territorial identifica o problema e fornece as matrizes locais; a análise laboratorial de referência estabelece a condição química das amostras; a avaliação crítica da técnica delimita suas possibilidades e limitações; e os experimentos controlados passam a definir sensibilidade, faixa operacional e efeitos de matriz necessários para uma aplicação ambiental cientificamente sustentada.

4.4 EXPOSIÇÃO POTENCIAL, SAÚDE ÚNICA E ODS

A principal via de exposição humana ao MeHg em populações que consomem pescado é a dieta. A biomagnificação faz com que peixes de níveis tróficos superiores tendam a apresentar maiores concentrações, com variações relacionadas a espécie, tamanho, idade, habitat e sazonalidade. Em um rio amazônico de Mato Grosso impactado por garimpo, Castilho *et al.* (2026) observaram Hg total em todas as amostras de peixes e maior concentração no músculo de predadores. Esse estudo oferece uma

referência metodológica regional para orientar a futura integração entre solos, sedimentos, peixes e consumo alimentar na abordagem de Saúde Única.

Na TI Sararé, as 40 amostras de solo e sedimento estabelecem uma base ambiental local para os pontos investigados e orientam a ampliação do monitoramento. Na perspectiva de Saúde Única, a continuidade da investigação deve integrar Hg total e MeHg em sedimentos e peixes, caracterização dos hábitos de consumo e biomarcadores humanos, mediante protocolos éticos, consentimento e participação indígena. Essa progressão conecta o diagnóstico ambiental à avaliação ecotoxicológica e à vigilância em saúde (PASSOS; MERGLER, 2008; BASTA *et al.*, 2021; BRASIL, 2018).

Em Saúde Única, a mesma cadeia causal vincula perda de integridade territorial, alteração da água e dos sedimentos, exposição da fauna, disponibilidade de alimento e saúde humana. Essa abordagem evita tratar o mercúrio como problema isolado e orienta indicadores conjuntos de qualidade ambiental, segurança do consumo, percepção comunitária e acesso à vigilância em saúde. O enquadramento contribui para os ODS 2, 3, 6 e 12 e para a implementação da Convenção de Minamata, especialmente de suas disposições sobre ASGM, liberações de Hg, áreas contaminadas, saúde pública e proteção de populações vulneráveis (CONVENÇÃO DE MINAMATA SOBRE MERCÚRIO, 2013; BRASIL, 2018; CASTILHOS; DOMINGOS, 2024).

4.5 MONITORAMENTO AMBIENTAL E APLICAÇÃO DO PXRF

A urgência do diagnóstico territorial justifica investigar métodos capazes de orientar rapidamente a seleção de pontos e a delimitação de áreas prioritárias. Nesse fluxo, o pXRF ocupa posição central por reunir rapidez, portabilidade, caráter não destrutivo e capacidade de análise multielementar, características que podem reduzir o número de amostras encaminhadas ao laboratório e ampliar a cobertura espacial da triagem. Sua utilidade específica para Hg, contudo, não deve ser presumida: precisa ser demonstrada para a matriz, a faixa de concentração e as condições instrumentais de interesse. Estudos em solos e áreas contaminadas mostram que calibração, heterogeneidade e incerteza condicionam o desempenho e a interpretação dos resultados (XU *et al.*, 2020; HORTA *et al.*, 2021; SUT-LOHMANN *et al.*, 2022), enquanto fatores como umidade, granulometria, matéria orgânica, óxidos de Fe e Al e preparação da amostra podem modificar a resposta instrumental (BRENT *et al.*, 2017).

Para Hg, o pXRF só deve ser considerado ferramenta de triagem de anomalias após comprovação de sua faixa detectável na matriz e no equipamento utilizados e não como substituto

automático dos métodos confirmatórios. Técnicas como DMA-80, CVAAS ou ICP-MS oferecem quantificação laboratorial de referência, e métodos específicos podem acrescentar informações de especiação. A concordância entre métodos precisa ser demonstrada para a matriz e a faixa de interesse, e não presumida (SIKORA *et al.*, 2021). Para Hg, a determinação por fluorescência apresenta desafios adicionais: água, geometria da amostra e condições de preparação podem modificar a intensidade do sinal, especialmente em sedimentos úmidos (AN *et al.*, 2023). Estratégias recentes de pré-concentração acopladas ao pXRF indicam caminhos para ampliar a sensibilidade em solos, mas ainda exigem validação independente e adequação ao uso de campo (LI *et al.*, 2026).

Uma vez estabelecidos experimentalmente os limites de desempenho, o fluxo analítico poderá conectar diretamente o diagnóstico geoespacial à triagem química: o sensoriamento remoto e as observações de campo estratificam áreas prioritárias; o pXRF, quando tecnicamente aplicável, reconhece anomalias e orienta a amostragem; e o laboratório de referência confirma e quantifica o Hg. A combinação de pXRF com sensores complementares, modelagem e controle da incerteza já demonstrou potencial para melhorar a predição e o mapeamento de elementos em solos (XU *et al.*, 2020; SHRESTHA *et al.*, 2022; XIA *et al.*, 2022). Caso a sensibilidade se mostre insuficiente nas concentrações ambientalmente relevantes, esse resultado também será cientificamente informativo, pois delimitará com rigor as condições em que o equipamento não deve ser empregado para Hg.

Do ponto de vista de gestão, recomenda-se articular fiscalização permanente, recuperação de drenagens e áreas ciliares, monitoramento participativo e desenho amostral estratificado por distância das frentes de garimpo, compartimento ambiental e estação hidrológica. A participação do povo Nambikwara deve orientar prioridades, locais de uso e comunicação de riscos. Esse arranjo transforma o monitoramento em instrumento de proteção territorial e de tomada de decisão, em consonância com a gestão de áreas contaminadas e com os compromissos da Convenção de Minamata (DPU, 2025; MPF, 2026; CONVENÇÃO DE MINAMATA SOBRE MERCÚRIO, 2013; BRASIL, 2018).

5 CONCLUSÃO

As evidências reunidas demonstram a rápida expansão e a elevada capacidade operacional do garimpo ilegal na TI Sararé, com perda de vegetação, revolvimento de solos, alteração de drenagens e pressão sobre sistemas aquáticos. A integração das evidências espaciais, temporais e de campo caracteriza uma crise socioambiental e territorial que requer fiscalização contínua, recuperação das

áreas degradadas e monitoramento capaz de acompanhar contaminantes associados à atividade minerária.

Nas 40 amostras avaliadas, as análises de referência não identificaram concentrações quantificáveis de As, Pb ou Hg: As < 1,140 mg kg^{-1}, Pb < 0,187 mg kg^{-1} e Hg < 25 µg kg^{-1}. Esses resultados estabelecem uma linha de base para os pontos amostrados e indicam ausência de evidência de concentrações elevadas nesse conjunto, mas não autorizam generalização para toda a Terra Indígena Sararé nem excluem a ocorrência de Hg em outros locais, profundidades, períodos ou compartimentos ambientais.

A principal contribuição deste estudo é integrar um problema ambiental concreto à construção de uma resposta analítica para seu monitoramento. A incursão na TI Sararé permitiu documentar a rápida transformação territorial, estabelecer uma linha de base química para os pontos investigados e obter matrizes ambientais reais com as quais se pretendia avaliar o pXRF. A ausência de Hg quantificável nas amostras impediu essa avaliação direta e não sustenta o uso do pXRF para monitorar Hg em níveis traço. A possibilidade de triagem de materiais com concentrações mais altas depende do limite de detecção efetivamente validado para este equipamento e estas matrizes. A partir desse resultado, torna-se indispensável compreender criticamente as possibilidades e limitações da técnica e estabelecer, em condições controladas e com concentrações conhecidas, sua capacidade de detecção, sensibilidade, faixa operacional e dependência da matriz. Somente após essa caracterização será possível selecionar matrizes com concentrações acima da faixa detectável validada e decidir quando o pXRF pode atuar como ferramenta rápida de triagem, orientando a priorização de áreas e a confirmação laboratorial. Dessa forma, o diagnóstico geoespacial, o trabalho de campo, a química de referência e o desenvolvimento instrumental não constituem esforços isolados, mas etapas complementares de uma mesma estratégia de monitoramento ambiental do Hg em territórios submetidos à mineração aurífera.

Declaração de uso de inteligência artificial — Foi utilizada uma ferramenta de inteligência artificial como apoio à composição visual do modelo conceitual apresentado na Figura 4. O conteúdo científico e a revisão da figura são de responsabilidade dos autores.

REFERÊNCIAS

ACQUAH, G. E. *et al.* Portable X-ray fluorescence (pXRF) calibration for analysis of nutrient concentrations and trace element contaminants in fertilisers. PLOS ONE, v. 17, n. 1, e0262460, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262460.

AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY (ATSDR). Toxicological profile for mercury. Atlanta: U.S. Department of Health and Human Services, 2022.

AGÊNCIA PÚBLICA. Garimpo ilegal migra na Amazônia e dispara na TI Sararé (MT), alerta Greenpeace. 8 abr. 2025. Disponível em: https://apublica.org/2025/04/garimpo-ilegal-migra-na-amazonia-e-dispara-na-ti-sarare-mt-alerta-greenpeace/. Acesso em: 7 jun. 2026.

AN, S. *et al.* Geometrical influence on Hg determination in wet sediment using K-shell fluorescence analysis. X-Ray Spectrometry, v. 52, n. 4, p. 182–196, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1002/xrs.3303.

BASTA, P. C. *et al.* Mercury exposure in Munduruku indigenous communities in the Brazilian Amazon: a cross-sectional study. International Journal of Environmental Research and Public Health, v. 18, n. 17, 9222, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.3390/ijerph18179222.

BASTOS, W. R. *et al.* Mercury in the environment and riverside population in the Madeira River Basin, Amazon, Brazil. Science of the Total Environment, v. 368, n. 1, p. 344–351, 2006. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.09.048.

BRASIL. [Constituição (1988)]. Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Senado Federal, 1988.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 420, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas. Diário Oficial da União: Brasília, DF, n. 249, p. 81–84, 30 dez. 2009.

BRASIL. Decreto nº 9.470, de 14 de agosto de 2018. Promulga a Convenção de Minamata sobre Mercúrio. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 157, p. 65, 15 ago. 2018.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. Diretrizes para a vigilância em saúde de populações expostas a mercúrio. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2018.

BRENT, R. N. *et al.* Validation of handheld X-ray fluorescence for in situ measurement of mercury in soils. Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 5, p. 768–776, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.12.056.

CASTILHO, A. C. C. *et al.* Ecotoxicological assessment of mercury in fish from a gold-mining-impacted Amazonian river: biomonitoring and human health risk. Environmental Toxicology, 2026. Disponível em: https://doi.org/10.1002/tox.70150.

CASTILHOS, Z. C.; DOMINGOS, L. B. B. A picture of artisanal and small-scale gold mining (ASGM) in Brazil and its mercury emissions and releases. Environmental Geochemistry and Health, v. 46, 101, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10653-024-01881-z.

CASTRO, N. S.; SILVA-FORSBERG, M. C. A questão do garimpo na Amazônia e os impactos socioambientais. Revista Geográfica Acadêmica, v. 9, n. 2, p. 5–18, 2015.

CONVENÇÃO DE MINAMATA SOBRE MERCÚRIO. Texto e anexos. Genebra: Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, 2013. Disponível em: https://minamataconvention.org/en/documents/minamata-convention-mercury-text-and-annexes. Acesso em: 3 ago. 2026.

DEFENSORIA PÚBLICA DA UNIÃO (DPU). DPU envia recomendação a órgãos federais para retirada imediata de invasores da Terra Indígena Sararé (MT). 8 abr. 2025. Disponível em: https://direitoshumanos.dpu.def.br/dpu-envia-recomendacao-a-orgaos-federais-para-retirada-imediata-de-invasores-da-terra-indigena-sarare-mt/. Acesso em: 7 jun. 2026.

DRISCOLL, C. T.; MASON, R. P.; CHAN, H. M.; JACOB, D. J.; PIRRONE, N. Mercury as a global pollutant: sources, pathways, and effects. Environmental Science & Technology, v. 47, n. 10, p. 4967–4983, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1021/es305071v.

FEARNSIDE, P. M. Environmental destruction in the Brazilian Amazon. Future of Food: Journal on Food, Agriculture and Society, v. 5, n. 3, p. 12–21, 2017.

FERREIRA NETO, L. C. *et al.* Uncontrolled illegal mining and garimpo in the Brazilian Amazon. Nature Communications, v. 15, p. 1–12, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1038/s41467-024-54220-2.

FERREIRA, G. W. D. *et al.* Assessment of iron-rich tailings via portable X-ray fluorescence spectrometry: the Mariana dam disaster, southeast Brazil. Environmental Monitoring and Assessment, v. 193, n. 4, 203, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10661-021-08982-7.

HARADA, M. Minamata disease: methylmercury poisoning in Japan caused by environmental pollution. Critical Reviews in Toxicology, v. 25, n. 1, p. 1–24, 1995. Disponível em: https://doi.org/10.3109/10408449509089885.

HORTA, A.; AZEVEDO, L.; NEVES, J.; SOARES, A.; POZZA, L. Integrating portable X-ray fluorescence (pXRF) measurement uncertainty for accurate soil contamination mapping. Geoderma, v. 382, 114712, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114712.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). Ação desmantela garimpo ilegal na TI Sararé. Brasília, DF, 13 fev. 2025. Disponível em: https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/noticias/2025/acao-desmantela-garimpo-ilegal-na-ti-sarare. Acesso em: 7 jun. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). Governo federal realiza desintrusão na Terra Indígena Sararé (MT) contra garimpo ilegal. Brasília, DF, 30 mar. 2026. Disponível em: https://www.gov.br/ibama/pt-

br/assuntos/noticias/2026/governo-federal-realiza-desintrusao-na-terra-indigena-sarare-mt-contra-garimpo-ilegal. Acesso em: 7 jun. 2026.

INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL (ISA). Terra Indígena Sararé. São Paulo: ISA, 2023. Disponível em: https://terrasindigenas.org.br/. Acesso em: 10 out. 2023.

JHA, G. *et al.* Agricultural soils of the Animas River watershed after the Gold King Mine spill: an elemental spatiotemporal analysis via portable X-ray fluorescence spectroscopy. Journal of Environmental Quality, v. 50, n. 3, p. 730–743, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1002/jeq2.20209.

LACERDA, L. D.; PFEIFFER, W. C. Mercury from gold mining in the Amazon environment: an overview. Environmental Technology Letters, v. 9, n. 12, p. 1469–1474, 1988.

LI, L. *et al.* A novel AgNPs spongy trap coupled with portable XRF: a field-ready strategy for sensitive mercury analysis in soils. Analytica Chimica Acta, v. 1407, 345528, 2026. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.aca.2026.345528.

LIMA, F. R. D. *et al.* Geochemistry signatures of mercury in soils of the Amazon rainforest biome. Environmental Research, v. 215, 114147, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114147.

LIMA, F. R. D. *et al.* Predictive modeling of total Hg background concentration in soils of the Amazon Rainforest biome with support of proximal sensors and auxiliary variables. Journal of South American Earth Sciences, v. 129, 104510, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104510.

LÁZARO, W. L. *et al.* Mapping total mercury in rivers of Mato Grosso: baselines and contamination hotspots by biome. Revista Ambiente & Água, v. 20, e3119, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.4136/ambi-agua.3119.

MAPBIOMAS. Destaques do mapeamento anual de mineração no Brasil. Coleção 8. São Paulo: MapBiomas, 2023.

MINISTÉRIO DOS POVOS INDÍGENAS. Operação Sararé impõe prejuízo superior a R$ 177 milhões ao garimpo ilegal. Brasília, DF, 29 ago. 2025. Disponível em: https://www.gov.br/povosindigenas/pt-br/assuntos/noticias/2025/08/operacao-sarare-impoe-prejuizo-superior-a-r-177-milhoes-ao-garimpo-ilgeal. Acesso em: 7 jun. 2026.

MINISTÉRIO PÚBLICO FEDERAL (MPF). MPF e DPU cobram plano imediato da União e órgãos federais contra garimpo ilegal na Terra Indígena Sararé (MT). Cuiabá, 2026. Disponível em: https://www.mpf.mp.br/o-mpf/unidades/pr-mt/noticias/mpf-e-dpu-cobram-plano-imediato-da-uniao-e-orgaos-federais-contra-garimpo-ilegal-na-terra-indigena-sarare-mt. Acesso em: 13 abr. 2026.

PASSOS, C. J. S.; MERGLER, D. Human mercury exposure and adverse health effects in the Amazon: a review. Cadernos de Saúde Pública, v. 24, supl. 4, p. S503–S520, 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0102-311X2008001600011.

RINCHEVAL, M.; COHEN, D. R.; HEMMINGS, F. A. Biogeochemical mapping of metal contamination from mine tailings using field-portable XRF. Science of the Total Environment, v. 662, p. 404–413, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.235.

SHRESTHA, G. *et al.* Quantification of multiple soil trace elements by combining portable X-ray fluorescence and reflectance spectroscopy. Geoderma, v. 409, 115649, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115649.

SIKORA, A. L.; MAGUIRE, L. W.; NAIRN, R. W.; KNOX, R. C. A comparison of XRFS and ICP-OES methods for soil trace metal analyses in a mining impacted agricultural watershed. Environmental Monitoring and Assessment, v. 193, n. 8, 490, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10661-021-09275-9.

SUT-LOHMANN, M.; RAMEZANY, S.; KÄSTNER, F.; RAAB, T. Feasibility of pXRF to evaluate chosen heavy metals in soil highly influenced by municipal waste disposal: a monitoring study of a former sewage farm. Land Degradation & Development, v. 33, n. 3, p. 439–451, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1002/ldr.4147.

TROYACK, I. B.; VON MÜHLEN, C.; VASQUES, G. M.; WENCESLAU, G. T. Estimativa do número de amostras de solo para caracterizar elementos químicos utilizando fluorescência de raios X portátil em áreas contaminadas: estudo de caso em Resende. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 26, n. 5, p. 893–901, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1413-415220200158.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). Method 3050B: acid digestion of sediments, sludges, and soils. Revision 2. Washington, DC: USEPA, 1996. Disponível em: https://www.epa.gov/hw-sw846/sw-846-test-method-3050b-acid-digestion-sediments-sludges-and-soils. Acesso em: 3 ago. 2026.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). Method 7471B: mercury in solid or semisolid waste (manual cold-vapor technique). Revision 2. Washington, DC: USEPA, 2007. Disponível em: https://www.epa.gov/hw-sw846/sw-846-test-method-7471b-mercury-solid-or-semisolid-waste-manual-cold-vapor-technique. Acesso em: 3 ago. 2026.

VEIGA, M. M.; BAKER, R. Protocols for environmental and health assessment of mercury released by artisanal and small-scale gold miners. Vienna: UNIDO, 2004.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Mercury and health. Geneva: WHO, 2017.

XIA, F. *et al.* Prediction of heavy metal concentrations in contaminated sites from portable X-ray fluorescence spectrometer data using machine learning. Processes, v. 10, n. 3, 536, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/pr10030536.

XU, D.; CHEN, S.; XU, H.; WANG, N.; ZHOU, Y.; SHI, Z. Data fusion for the measurement of potentially toxic elements in soil using portable spectrometers. Environmental Pollution, v. 263, 114649, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114649.