REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

IMPACTOS SOCIOECONÔMICOS E AMBIENTAIS NA MINERAÇÃO DO OURO: UMA REVISÃO CRÍTICA DA LEGISLAÇÃO, DOS CONFLITOS MINERÁRIOS E DA CONTAMINAÇÃO POR MERCÚRIO NO BRASIL

SOCIOECONOMIC AND ENVIRONMENTAL IMPACTS OF GOLD MINING: A CRITICAL REVIEW OF LEGISLATION, MINING CONFLICTS AND MERCURY CONTAMINATION IN BRAZIL

IMPACTOS SOCIOECONÓMICOS Y AMBIENTALES EN LA MINERÍA DEL ORO: UNA REVISIÓN CRÍTICA DE LA LEGISLACIÓN, LOS CONFLICTOS MINEROS Y LA CONTAMINACIÓN POR MERCURIO EN BRASIL

Uáguida Kátia da Silva[1], Walace Luiz dos Santos Soares[2], Fabrícia Nunes de Jesus[3], Agostinho Ferreira[4]

e747682
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i4.7682

PUBLICADO: 04/2026

RESUMO

A mineração do ouro constitui uma das atividades extrativas de maior relevância econômica no Brasil e no mundo, mas também uma das mais controvertidas do ponto de vista socioambiental. Este artigo de revisão bibliográfica analisa os impactos socioeconômicos e ambientais decorrentes da mineração de ouro no contexto brasileiro, com foco especial na legislação vigente, nos conflitos minerários documentados e na contaminação por mercúrio. A pesquisa é de natureza básica e descritiva, fundamentada em artigos científicos, legislações, relatórios técnicos e dados de órgãos setoriais publicados entre 2000 e 2025. Os resultados demonstram que o setor mineral faturou R$ 270,8 bilhões em 2024, crescimento de 9,1% em relação ao ano anterior, mas registrou 901 conflitos socioambientais afetando 2,81 milhões de pessoas, aumento de 308,1% no contingente impactado. A mineração artesanal de ouro emprega mercúrio em larga escala, respondendo por cerca de 37% das emissões globais desse metal, com consequências neurológicas, renais e reprodutivas irreversíveis sobre garimpeiros, populações ribeirinhas e povos indígenas. O arcabouço regulatório brasileiro é robusto no plano formal, mas sua efetividade é comprometida por insuficiência fiscalizatória e pela persistência de práticas ilegais. Conclui-se que a superação desse paradoxo requer revisão estrutural do modelo minerário, integração de tecnologias de monitoramento, diversificação econômica das comunidades dependentes e participação efetiva das populações afetadas nas decisões sobre o uso do território.

PALAVRAS-CHAVE: Mineração de Ouro. Impacto Ambiental. Mercúrio. Conflitos Minerários. Legislação Ambiental. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Gold mining is one of the most economically relevant extractive activities in Brazil and worldwide, but also one of the most controversial from a socio-environmental perspective. This bibliographic review article analyzes the socioeconomic and environmental impacts of gold mining in the Brazilian context, with special focus on current legislation, documented mining conflicts and mercury contamination. The research is basic and descriptive in nature, based on scientific articles, legislation, technical reports and sectoral data published between 2000 and 2025. Results

[1] Graduanda em Engenharia de Minas, UEMG – Unidade João Monlevade, MG, Brasil.
[2] Graduando em Engenharia de Minas, UEMG – Unidade João Monlevade, MG, Brasil.
[3] Doutora em Educação, Professora Orientadora, UEMG – Unidade João Monlevade, MG, Brasil.
[4] Mestre em Física, Professor, UEMG – Unidade João Monlevade, MG, Brasil.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

show that the mineral sector generates revenues of R$ 270.8 billion in 2024 (9.1% growth year-over-year) but simultaneously records 901 socio-environmental conflicts affecting 2.81 million people, a 308.1% increase in the impacted population. Artisanal gold mining uses mercury on a large scale, accounting for approximately 37% of global mercury emissions, with irreversible neurological, renal and reproductive consequences for miners, riverside populations and indigenous peoples. Brazil's regulatory framework is robust on a formal level, but its effectiveness is undermined by insufficient enforcement and the persistence of illegal practices. It is concluded that overcoming this paradox requires structural revision of the mining model, integration of monitoring technologies, economic diversification of dependent communities and effective participation of affected populations in territorial decisions.

KEYWORDS: *Gold Mining. Environmental Impact. Mercury. Mining Conflicts. Environmental Legislation. Sustainability.*

RESUMEN
La minería del oro es una de las actividades extractivas de mayor relevancia económica en Brasil y en el mundo, pero también una de las más controvertidas desde el punto de vista socioambiental. Este artículo de revisión bibliográfica analiza los impactos socioeconómicos y ambientales de la minería del oro en el contexto brasileño, con especial énfasis en la legislación vigente, los conflictos mineros documentados y la contaminación por mercurio. La investigación es de naturaleza básica y descriptiva, fundamentada en artículos científicos, legislación, informes técnicos y datos sectoriales publicados entre 2000 y 2025. Los resultados muestran que el sector mineral facturó R$ 270.800 millones en 2024, con un crecimiento del 9,1%, pero registró simultáneamente 901 conflictos socioambientales que afectaron a 2,81 millones de personas, un aumento del 308,1% en el contingente impactado. La minería artesanal de oro emplea mercurio a gran escala, representando aproximadamente el 37% de las emisiones globales del metal, con consecuencias neurológicas, renales y reproductivas irreversibles. Se concluye que superar esta paradoja exige una revisión estructural del modelo minero, integración de tecnologías de monitoreo y diversificación económica de las comunidades dependientes.

PALABRAS CLAVE: *Minería de Oro. Impacto Ambiental. Mercurio. Conflictos Mineros. Legislación Ambiental. Sostenibilidad.*

INTRODUÇÃO

O ouro (Au, número atômico 79) é um dos metais mais valorizados da história humana. Sua resistência extraordinária à oxidação, alta maleabilidade, ductilidade e condutividade elétrica fazem dele um insumo indispensável tanto no sistema financeiro global quanto na indústria de alta tecnologia. Conforme aponta o World Gold Council (2023), a demanda global pelo metal atingiu 4.899 toneladas em 2022, distribuída entre o setor de joias (45%), investimentos (25%), bancos centrais (23%) e aplicações tecnológicas (7%). Somente a indústria eletrônica mundial consome anualmente cerca de 280 toneladas do metal, demanda que cresce de forma exponencial com a proliferação de dispositivos conectados (Murad, 2022).

No Brasil, a mineração de ouro possui raízes históricas que remontam ao período colonial. O ciclo do ouro nos séculos XVII e XVIII transformou a fisionomia de Minas Gerais, criou cidades, financiou a metrópole portuguesa e deixou como legado um patrimônio cultural de valor inestimável e também cicatrizes ambientais que persistem até hoje em áreas como a Serra do

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Espinhaço e os rios do Quadrilátero Ferrífero. Essa trajetória histórica é fundamental para compreender as dinâmicas atuais do setor, que combina grandes operações formais com um garimpo artesanal enraizado culturalmente em diversas regiões do país (Viana; Bursztyn, 2010).

Contemporaneamente, a mineração brasileira é um setor de expressiva magnitude econômica. Em 2024, o faturamento do setor mineral alcançou R$ 270,8 bilhões, representando 16,8% do PIB industrial nacional. O ouro responde por 8,81% desse faturamento, posicionando-se como o segundo mineral mais relevante após o minério de ferro. As exportações minerais atingiram US$ 43,43 bilhões, gerando saldo comercial de US$ 34,95 bilhões, equivalente a 47% do superávit da balança comercial nacional (IBRAM, 2025). Esses números colocam o Brasil entre os dez maiores produtores mundiais de ouro e reforçam o caráter estratégico do metal para a economia do país.

Paradoxalmente, no mesmo período em que o setor mineral celebra recordes de faturamento, o relatório "Conflitos da Mineração no Brasil" registrou 901 casos de conflitos socioambientais que afetaram 2,81 milhões de pessoas, crescimento de 308,1% no contingente impactado em relação ao ano anterior (Cruz, 2025). Quarenta e um desses conflitos tiveram desfecho fatal. As consequências dos rompimentos de barragem em Mariana (2015) e Brumadinho (2019) continuam gerando impactos ativos anos após os eventos. Comunidades indígenas e quilombolas enfrentam invasão de seus territórios pelo garimpo ilegal e contaminação progressiva de seus recursos hídricos e alimentares pelo mercúrio.

A contaminação por mercúrio na mineração artesanal de ouro é reconhecida pela Organização Mundial da Saúde (OMS) como um dos maiores desafios de saúde ambiental do século XXI. A mineração artesanal e de pequena escala (MAPE) responde por aproximadamente 37% das emissões globais de mercúrio (Castro *et al.,* 2020), e seus impactos sobre o sistema nervoso central, os rins e o desenvolvimento fetal, especialmente em crianças e povos indígenas amazônicos, estão extensamente documentados na literatura científica (Pamplona; Lopes; Bittencourt, 2021; Coelho; Lucas; Medeiros, 2020).

Diante desse contexto, formula-se o seguinte problema de pesquisa: como o arcabouço normativo brasileiro regula a mineração de ouro, e em que medida essa regulação tem sido efetiva na prevenção e mitigação dos impactos socioeconômicos e ambientais da atividade? Os objetivos específicos que orientam esta investigação são: (i) examinar o marco legal que rege a mineração no Brasil; (ii) analisar os dados econômicos do setor e os conflitos socioambientais documentados; (iii) identificar os mecanismos de contaminação por mercúrio e seus impactos à saúde humana e aos ecossistemas; e (iv) discutir estratégias de mitigação e tendências regulatórias internacionais.

A relevância acadêmica e social deste trabalho reside na necessidade de integrar, em uma perspectiva sistêmica, as dimensões jurídica, econômica, ambiental e de saúde pública da

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

mineração aurífera. Essa integração é especialmente necessária para a formação de engenheiros de minas comprometidos não apenas com a eficiência técnica da extração, mas também com a responsabilidade socioambiental que deve nortear o exercício profissional no contexto do desenvolvimento sustentável. Metodologicamente, trata-se de pesquisa básica, descritiva e de revisão bibliográfica, com análise crítica e comparativa de fontes publicadas entre 2000 e 2025.

1. REFERENCIAL TEÓRICO

1.1. O ouro na economia global e no contexto brasileiro

O ouro ocupa posição singular na economia global, funcionando simultaneamente como reserva de valor soberana, matéria-prima industrial e ativo financeiro. Desde o colapso do padrão ouro-dólar de Bretton Woods em 1971, o metal manteve sua função de ativo de refúgio em momentos de instabilidade econômica e geopolítica. A crise financeira de 2008 e a pandemia de COVID-19 em 2020 impulsionaram novas altas históricas nos preços internacionais do ouro, estimulando a expansão da atividade mineradora formal e informal ao redor do mundo (World Gold Council, 2023).

No Brasil, a produção de ouro em 2024 foi estimada em aproximadamente 120 toneladas, distribuídas entre operações industriais de grande porte, como a Mina de Serra Leste e a Mina de Coringa, no Pará, e um vasto universo de operações artesanais e ilegais na Amazônia. O estado do Pará concentra a maior parte da produção formal, enquanto os estados do Mato Grosso, Amazonas e Roraima são os principais focos do garimpo informal. Minas Gerais, berço do ciclo colonial do ouro, mantém operações significativas em municípios como Nova Lima, Congonhas e Itabira (IBRAM, 2025).

A dualidade entre mineração formal e garimpo artesanal é uma característica estrutural do setor aurífero em países em desenvolvimento, conforme observam Mancini e Sala (2018). As grandes mineradoras operam com tecnologia avançada, equipes de gestão ambiental, relatórios de sustentabilidade e auditorias externas; o garimpo artesanal, por sua vez, emprega métodos rudimentares, utiliza mercúrio sem controle, frequentemente invade terras indígenas e áreas de proteção ambiental, e gera externalidades negativas que recaem sobre as populações mais vulneráveis. Essa assimetria de poder e de responsabilização é um dos nós centrais do problema socioambiental da mineração aurífera.

1.2. Constituição Federal de 1988 e a tutela ambiental da mineração

A Constituição Federal de 1988 representa um divisor de águas na proteção ambiental brasileira. O art. 225 estabelece, de forma inovadora no constitucionalismo comparado, que todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

preservá-lo para as presentes e futuras gerações. Na interpretação consolidada do Supremo Tribunal Federal, esse dispositivo confere ao meio ambiente a natureza de direito fundamental difuso, oponível tanto contra o Estado quanto contra particulares.

Segundo Cançado Trindade (1999), ao reconhecer o direito a um meio ambiente sadio, a Constituição reconhece o direito à vida em todas as suas dimensões. Esse entendimento implica que atividades econômicas que degradam o ambiente sem a devida recuperação violam, em última análise, direitos fundamentais, o que justifica a intervenção estatal regulatória e a responsabilização civil, administrativa e penal dos agentes causadores de dano ambiental.

O art. 176 da Constituição Federal atribui à União a propriedade dos recursos minerais do subsolo, dissociando-a da propriedade do solo superficial. Isso significa que o proprietário da terra não tem direito automático aos minerais que nela existem: a exploração requer concessão ou autorização federal, conforme o regime aplicável. Essa regra cria o fundamento constitucional para o licenciamento e a fiscalização da atividade minerária pelo Estado federal, exercida atualmente pela Agência Nacional de Mineração (ANM). Ribeiro (2005) argumenta que a garantia do direito à propriedade mineral pelo Estado, longe de ser um instrumento de intervenção arbitrária, é uma condição para que a mineração cumpra sua função social. Ao exigir licenciamento, planos de recuperação de áreas degradadas e compensação financeira aos municípios produtores, o Estado assegura que os benefícios da exploração mineral sejam distribuídos de forma mais equitativa pela sociedade, e não capturados exclusivamente pelos concessionários.

1.3. Código de mineração e normas regulamentadoras

O Código de Mineração, instituído pelo Decreto-Lei nº 227/1967 e regulamentado pelo Decreto nº 62.934/1968, é a lei que organiza o aproveitamento dos recursos minerais no Brasil. Ele prevê diferentes regimes jurídicos conforme o tipo de mineral e a finalidade da exploração: autorização de pesquisa, concessão de lavra, licenciamento para minerais de uso imediato na construção civil, permissão de lavra garimpeira e monopólio estatal para substâncias estratégicas. A concessão de lavra é o regime aplicável ao ouro, sendo outorgada pelo Ministério de Minas e Energia mediante requerimento instruído com relatório de pesquisa aprovado (Farias, 2002).

A Portaria DNPM nº 237/2001 aprovou as 22 Normas Regulamentadoras de Mineração (NRM), que estabelecem os requisitos técnicos de segurança para cada fase e aspecto da operação minerária. A NRM-2 regula a lavra a céu aberto; a NRM-4, as aberturas subterrâneas; a NRM-9, a prevenção de poeiras; a NRM-18, o beneficiamento; a NRM-19, os rejeitos e a disposição de estéril; e a NRM-22, a proteção ao trabalhador. Especialmente relevantes são a NRM-20, que trata do fechamento de mina e da retomada de operações, e a NRM-21, que

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

disciplina a reabilitação de áreas mineradas, normas que definem as responsabilidades ambientais dos titulares de lavra após o encerramento das atividades (DNPM, 2001).

Farias (2007) observa que o licenciamento ambiental da mineração no Brasil envolve a articulação entre o regime do Código de Mineração de competência federal e as normas ambientais de competência concorrente entre União, estados e municípios. Essa sobreposição de competências pode gerar conflitos e assimetrias regulatórias, com empresas buscando operar em estados com maior permissividade ambiental ou menor capacidade fiscalizatória. A criação de sistemas de licenciamento integrados, que articulem simultaneamente as exigências da ANM e dos órgãos ambientais, é uma das principais demandas dos especialistas em direito minerário.

1.4. Licenciamento Ambiental: EIA/RIMA e PRAD

O licenciamento ambiental é o principal instrumento preventivo de controle dos impactos da mineração. Para empreendimentos com potencial de significativa degradação ambiental, categoria que inclui a maioria das operações de extração de ouro, o processo de licenciamento exige a elaboração do Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e do respectivo Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), conforme estabelecido pela Resolução CONAMA nº 1/1986.

O EIA deve ser elaborado por equipe multidisciplinar habilitada e contemplar: o diagnóstico ambiental da área de influência; a identificação e avaliação dos impactos ambientais nos meios físico, biótico e socioeconômico; a definição de medidas mitigadoras, compensatórias e de monitoramento; e a análise de alternativas tecnológicas e locacionais ao projeto. O RIMA é a versão do EIA voltada ao público em geral, devendo ser redigido em linguagem acessível para subsidiar as audiências públicas que antecedem a decisão de licenciamento (Brasil, 1986).

O Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD), regulado pelo Decreto nº 97.632/1989, é um instrumento igualmente fundamental. Ele deve detalhar as ações de recuperação ambiental previstas para cada fase da exploração e para o encerramento das atividades, incluindo medidas de recomposição topográfica, revegetação com espécies nativas, tratamento de efluentes e monitoramento de longo prazo. A aprovação do PRAD é condição para a obtenção do licenciamento, embora sua implementação efetiva enfrente desafios relacionados ao monitoramento e à capacidade técnica dos órgãos ambientais (Gomide, 2018).

1.5. Sustentabilidade e mineração: limites e possibilidades

A aplicação do conceito de desenvolvimento sustentável à mineração enfrenta uma tensão fundamental: a atividade extrai recursos não renováveis, o que implica, por definição, uma forma de "dívida" intergeracional. Mancini e Sala (2018) argumentam que a sustentabilidade da mineração não pode ser avaliada apenas pelos indicadores econômicos convencionais, mas deve

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

incorporar métricas de impacto social e ambiental: qualidade dos recursos hídricos, saúde das populações vizinhas, integridade dos ecossistemas e número de conflitos socioambientais.

Barbosa (2008) propõe que a sustentabilidade da mineração deve ser entendida como um processo de transição: durante o período de operação da mina, os benefícios gerados (emprego, renda, arrecadação tributária, infraestrutura) devem ser investidos na diversificação da base econômica local, de forma que o encerramento das atividades minerárias não represente o colapso da comunidade. Esse modelo, que exige planejamento territorial de longo prazo, raramente é implementado de forma efetiva no contexto brasileiro, onde predomina uma perspectiva de curto prazo tanto nas empresas quanto nos governos locais.

Castro *et al.,* (2020) destacam que a relação entre mineração e sustentabilidade é ainda mais complexa quando se considera a MAPE, que opera fora dos marcos formais de planejamento e licenciamento. Para esses autores, a sustentabilidade do garimpo artesanal exige não apenas a substituição tecnológica do mercúrio por métodos mais limpos, mas também a formalização das operações, o reconhecimento dos direitos dos trabalhadores e a criação de arranjos institucionais que garantam a participação das comunidades garimpeiras na gestão dos territórios em que atuam.

2. MÉTODOS

Esta pesquisa caracteriza-se como básica, de natureza descritiva, realizada por meio de revisão bibliográfica de caráter narrativo-analítico, com procedimentos sistematizados de seleção e análise de fontes. Segundo Gil (2018), a pesquisa bibliográfica é elaborada a partir de material já publicado, permitindo ao investigador cobrir amplitude de fenômenos maior do que poderia pesquisar diretamente. Diferentemente da revisão sistemática estrita, que requer protocolo PRISMA, registro prévio e procedimentos de metanálise, a revisão narrativa sistematizada adotada neste estudo opera com critérios explícitos de inclusão e exclusão, análise crítica e comparativa das fontes e organização temática dos resultados, o que a distingue da revisão narrativa informal e confere rigor metodológico compatível com o caráter multidisciplinar do problema investigado, que envolve dimensões jurídicas, econômicas, ambientais e de saúde pública.

As fontes foram selecionadas segundo critérios explícitos de inclusão e exclusão. Critérios de inclusão: artigos publicados em periódicos indexados com revisão por pares; dissertações e teses de programas de pós-graduação avaliados pela CAPES com conceito mínimo 4; relatórios de órgãos governamentais e organismos internacionais de reconhecida credibilidade institucional; obras de referência no campo do direito minerário e ambiental; e dados quantitativos provenientes exclusivamente de fontes primárias oficiais (IBRAM, ANM, IBGE, INPE, PNUMA). Critérios de exclusão: fontes sem identificação de autoria ou sem revisão institucional; dados quantitativos não

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

verificáveis em fonte primária; e publicações anteriores ao ano 2000, exceto legislações e obras clássicas de referência teórica consolidada. Em termos de recorte temporal, privilegiou-se o período 2000-2025, dado o dinamismo do setor e a evolução do marco regulatório.

As bases de dados consultadas incluem Scielo, Google Scholar, Portal de Periódicos CAPES, repositórios institucionais da UEMG, UFMG e USP, e os sistemas de publicações do IBRAM, DNPM/ANM, IBGE e Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA). A busca utilizou os descritores: "mineração de ouro", "impactos ambientais", "mercúrio", "garimpo", "licenciamento ambiental", "conflitos minerários", isolados e em combinação, em português, inglês e espanhol.

Conforme Yin (2001), a pesquisa de revisão é uma estratégia que compreende a análise de um fenômeno no seu contexto real, incorporando múltiplas fontes de evidência. A análise das fontes foi conduzida de forma crítica e comparativa, com identificação de convergências e divergências entre autores. Os dados quantitativos como faturamento do setor, número de conflito e emissões de mercúrio foram extraídos diretamente de fontes primárias (IBRAM, 2025; Cruz, 2025; Castro *et al.,* 2020) e apresentados de forma gráfica, facilitando a visualização de tendências e padrões.

Para a análise dos dados econômicos, foram utilizados os relatórios anuais do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), especialmente o "Mineração em Números 2025", que consolida dados de faturamento, exportações, CFEM e emprego do setor. Os dados sobre conflitos minerários foram extraídos do relatório "Conflitos da Mineração no Brasil" (Cruz, 2025), elaborado pela Universidade Federal Fluminense (UFF), considerado a mais abrangente fonte de informações sobre conflitos socioambientais relacionados à mineração no país. Para os dados sobre emissões de mercúrio, foram consultados o "Global Mercury Assessment 2018" do PNUMA e artigos de revisão publicados em periódicos especializados como *Resources Policy, Environmental Science & Technology* e Desenvolvimento e Meio Ambiente.

A análise crítica das fontes foi orientada por quatro perguntas norteadoras: (1) Quais são os principais impactos socioeconômicos da mineração de ouro no Brasil, tanto positivos quanto negativos? (2) Como o marco regulatório brasileiro aborda esses impactos, e quais são as principais lacunas de efetividade? (3) Quais são os mecanismos de contaminação por mercúrio na MAPE e quais evidências científicas documentam seus impactos à saúde humana e aos ecossistemas? (4) Quais estratégias de mitigação têm demonstrado efetividade em contextos comparáveis ao brasileiro, e como poderiam ser adaptadas ao contexto nacional? Essas perguntas estruturaram a seleção e a análise das fontes, garantindo coerência entre os objetivos da pesquisa e os achados apresentados.

É relevante contextualizar epistemologicamente a abordagem adotada. A revisão bibliográfica, como método, privilegia o conhecimento produzido em contextos acadêmicos e

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

institucionais formais (artigos científicos, relatórios técnicos, legislação), o que implica inevitável sub-representação dos saberes e das perspectivas das comunidades diretamente afetadas pela mineração: garimpeiros, ribeirinhos, indígenas, quilombolas. Reconhecer essa limitação não invalida os achados apresentados, mas indica a necessidade de complementação com pesquisas de campo que deem voz a esses atores. A combinação de revisão bibliográfica com metodologias participativas como a pesquisa-ação, os diagnósticos rurais participativos e os processos de consulta prévia é a abordagem que melhor capturaria a complexidade do problema investigado em pesquisas futuras.

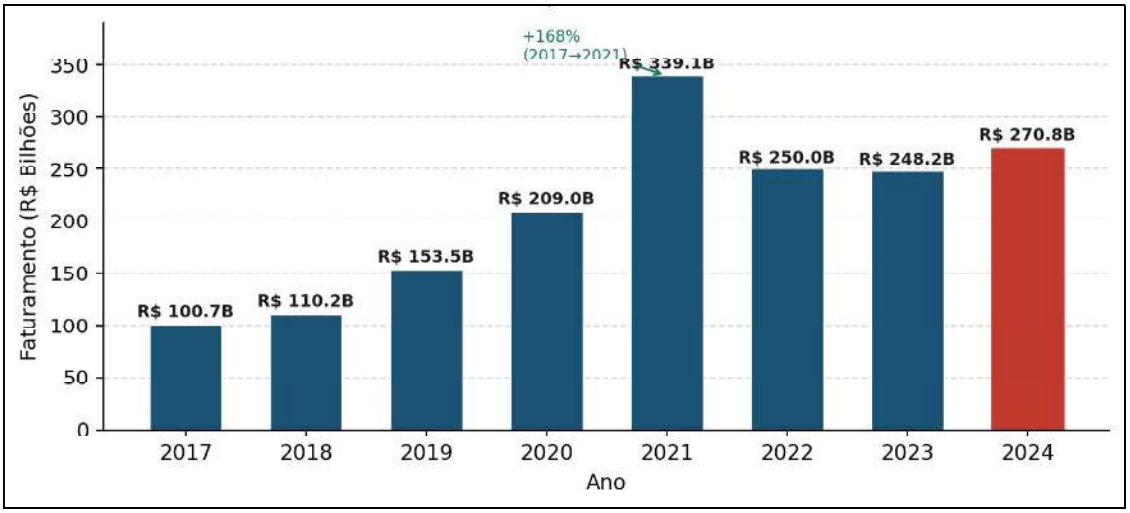
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Desempenho econômico do setor mineral brasileiro

A mineração é um dos pilares da economia brasileira. Em 2024, o setor registrou faturamento de R$ 270,8 bilhões, crescimento de 9,1% em relação a 2023. Esse desempenho reflete tanto a recuperação dos preços internacionais das commodities minerais após a volatilidade de 2022-2023 quanto o crescimento da demanda por metais estratégicos associados à transição energética como lítio, cobalto, cobre e terras raras, que impulsionam investimentos em prospecção e expansão de capacidade produtiva (IBRAM, 2025). O Gráfico 1 ilustra a evolução do faturamento entre 2017 e 2024. Chama atenção o pico de R$ 339,15 bilhões em 2021, impulsionado pela alta extraordinária dos preços do minério de ferro e do ouro durante a recuperação econômica pós-pandemia. A queda nos dois anos seguintes reflete a normalização dos preços internacionais e o arrefecimento da demanda chinesa por minério de ferro. A retomada em 2024 aponta para uma tendência de estabilização em patamares superiores aos observados antes de 2020, sustentada pela demanda estrutural por metais na transição para uma economia de baixo carbono.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Gráfico 1. Faturamento do Setor Mineral Brasileiro (R$ Bilhões), 2017–2024



Fonte: Adaptado de IBRAM (2025).

A Compensação Financeira pela Exploração Mineral (CFEM), principal mecanismo de redistribuição dos benefícios da mineração com os municípios produtores, gerou R$ 7,45 bilhões em 2024, um crescimento de 8,6% em relação a 2023 (R$ 6,86 bilhões). Desse total, 65% são destinados aos municípios onde ocorre a extração, 15% ao estado, 15% à União e 5% ao FNDCT. Embora expressiva em termos absolutos, a CFEM representa em média apenas 2% a 4% da receita tributária dos municípios mineradores, volume insuficiente para financiar a diversificação econômica necessária para reduzir a dependência de comunidades em relação à mineração (IBRAM, 2025; Gomide, 2018).

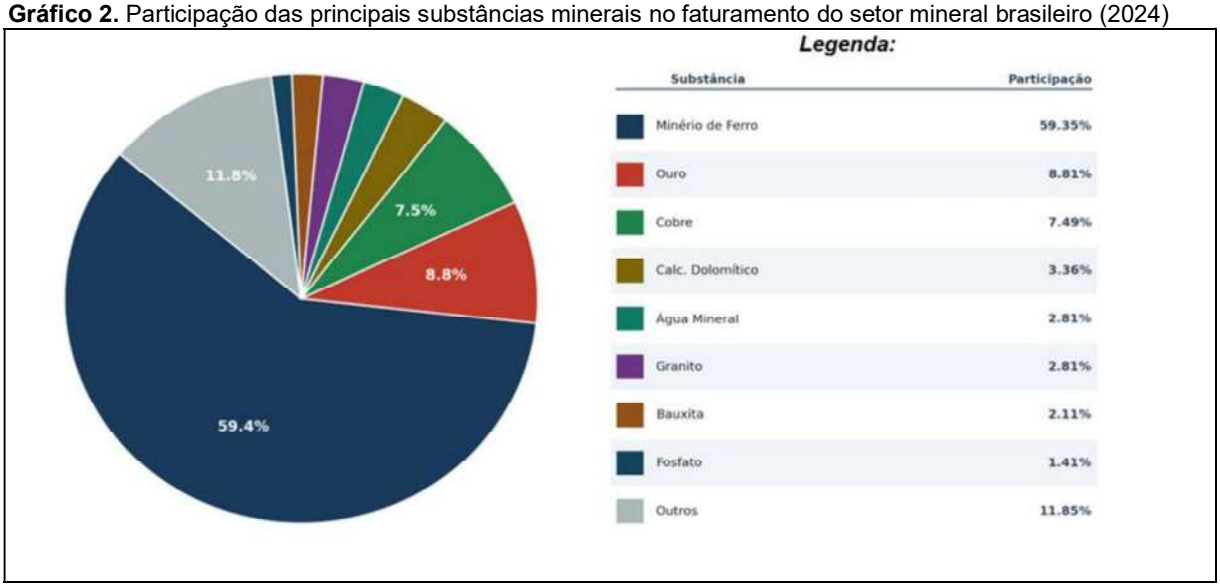
As exportações minerais somaram US$ 43,43 bilhões em 2024, com crescimento de 0,9% em relação ao ano anterior. O saldo da balança comercial mineral atingiu US$ 34,95 bilhões, correspondendo a 47% do superávit comercial nacional de US$ 74,55 bilhões. Esses números demonstram a importância crítica da mineração para o equilíbrio das contas externas brasileiras e para o financiamento das importações de produtos industrializados e de alta tecnologia.

O Gráfico 2 apresenta a composição do faturamento por substância mineral. A hegemonia do minério de ferro (59,35%) reflete a importância da Vale e das operações do Quadrilátero Ferrífero e da Serra dos Carajás. O ouro (8,81%) é o segundo mineral em importância, seguido pelo cobre (7,49%). A concentração em poucas commodities, especialmente a dependência do minério de ferro, intimamente ligada ao ciclo econômico chinês, representa uma vulnerabilidade estrutural que expõe o Brasil a choques externos de demanda e preços (Mancini; Sala, 2018).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Gráfico 2. Participação das principais substâncias minerais no faturamento do setor mineral brasileiro (2024)



Fonte: Adaptado de IBRAM (2025).

3.2. Conflitos minerários: escala, padrão geográfico e empresas envolvidas

O relatório "Conflitos da Mineração no Brasil" (CRUZ, 2025), elaborado pela Universidade Federal Fluminense (UFF) em parceria com o Comitê Nacional em Defesa dos Territórios Frente à Mineração, é a principal fonte de dados sobre os impactos socioambientais negativos do setor no Brasil. Em 2023, foram identificados 901 conflitos distribuídos em 786 localidades, abrangendo uma tipologia diversa: disputas por terras, dificuldades de acesso à água, contaminação ambiental, remoções compulsórias, ameaças a lideranças comunitárias, conflitos trabalhistas e negligência com passivos ambientais.

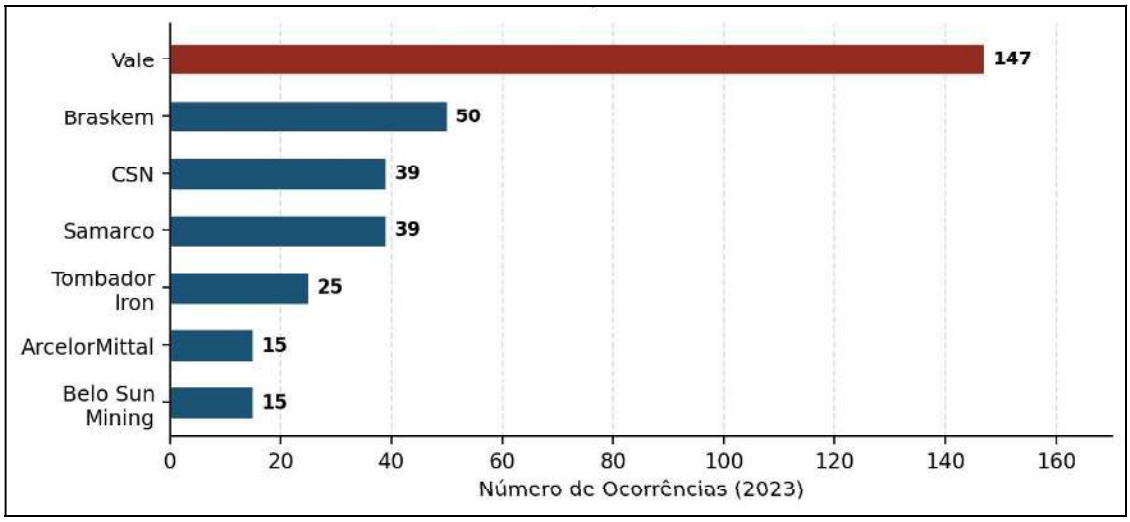
O Gráfico 3 detalha as empresas com maior número de conflitos registrados. A Vale lidera com 147 ocorrências, dado que contrasta com sua posição de maior mineradora da América Latina e uma das maiores do mundo, com operações em mais de 30 países. A Braskem aparece em segundo lugar com 50 registros, majoritariamente relacionados ao afundamento do solo em Maceió/AL causado pela extração de sal-gema, que forçou a remoção de mais de 55 mil pessoas de seus lares. CSN e Samarco registram 39 conflitos cada; a Samarco, controlada pela Vale e pela BHP Billiton, ainda carrega o passivo do desastre de Mariana (Cruz, 2025).

A presença de empresas de grande porte e reconhecimento internacional nesse ranking problematiza a narrativa simplificadora que associa os danos da mineração exclusivamente ao garimpo ilegal. As maiores mineradoras formais, com acesso às mais avançadas tecnologias de gestão de risco, sistemas de certificação ambiental e relatórios de sustentabilidade auditados, continuam protagonizando conflitos de grande escala. Isso sugere que o problema é sistêmico e estrutural, enraizado em modelos de negócio que externalizam custos socioambientais, em

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

estruturas de governança corporativa com insuficiente prestação de contas e em sistemas de regulação com capacidade fiscalizatória aquém das necessidades (Mancini; Sala, 2018).

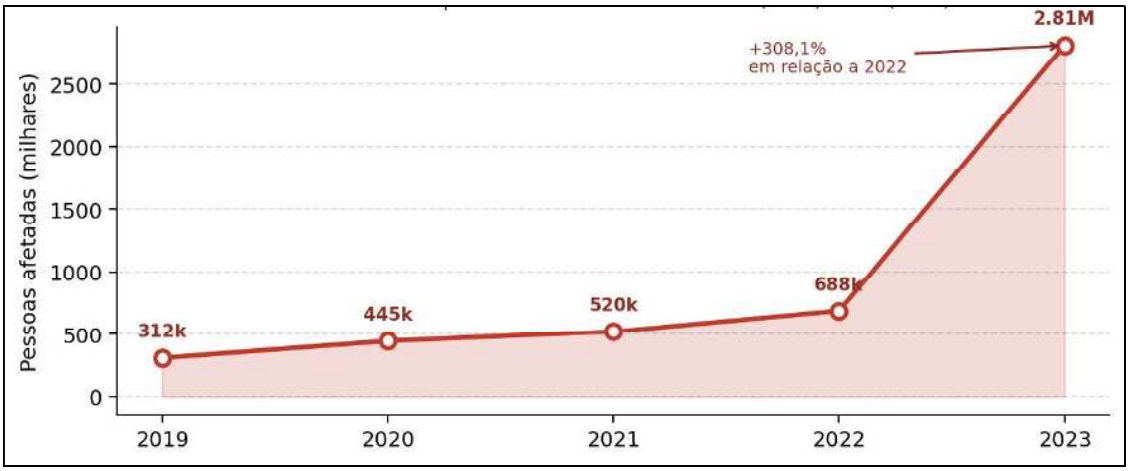
Gráfico 3. Empresas mineradoras com maior número de conflitos registrados no Brasil (2023)



Fonte: Adaptado de Cruz (2025).

A evolução do contingente populacional afetado entre 2019 e 2023 é apresentada no Gráfico 4. O salto de 688 mil para 2,81 milhões de pessoas em 2023, crescimento de 308,1% em apenas um ano, é o dado mais alarmante do relatório. Ele sugere que, embora o número de conflitos tenha se mantido relativamente estável em relação a 2022, houve uma mudança na escala dos episódios, com eventos de grande magnitude afetando contingentes populacionais muito maiores.

Gráfico 4. Evolução do contingente populacional afetado por conflitos minerários no Brasil (2019–2023)



Fonte: Elaborado pelos autores com base em Cruz (2025).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A distribuição geográfica dos conflitos reflete padrões históricos de concentração da mineração. Minas Gerais respondeu por 31,9% das ocorrências em 2023, proporção que está diretamente relacionada às consequências persistentes dos rompimentos de barragem em Mariana (2015) e Brumadinho (2019). O rompimento da Barragem de Fundão, da Samarco, em novembro de 2015, lançou aproximadamente 40 milhões de metros cúbicos de rejeitos de mineração no Rio Doce, causando a morte de 19 pessoas e o maior desastre ambiental da história brasileira, com impactos sobre 663 km de corpos d'água e mais de 300 toneladas de peixes mortos. O rompimento da Barragem B1 da Vale, em Brumadinho, em janeiro de 2019, vitimou 272 pessoas, sendo a maior tragédia de barragem do país em número de vítimas humanas.

Pará e Bahia aparecem em segundo e terceiro lugar, com 13,7% e 9% dos conflitos, respectivamente. No Pará, a combinação de grandes operações industriais como as da Vale em Carajás, com a expansão do garimpo ilegal na Amazônia gera um cenário de conflitos fundiários, contaminação de recursos hídricos e violência contra povos indígenas que não encontra paralelo em outras regiões do país. Em 2023, foram registrados 96 conflitos envolvendo territórios indígenas e 60 associados a comunidades quilombolas, confirmando o padrão de que os impactos negativos da mineração recaem de forma desproporcional sobre as populações mais vulneráveis e com menor acesso a mecanismos de defesa de seus direitos (Pamplona; Lopes; Bittencourt, 2021).

3.3. Impactos ambientais no ciclo de vida da mineração do ouro

A mineração do ouro gera impactos ambientais distintos em cada fase de seu ciclo produtivo. Na fase de prospecção e pesquisa, a movimentação de solo para perfurações geológicas, a instalação de acampamentos e o uso de helicópteros já perturbam ecossistemas frágeis, especialmente em áreas de floresta tropical ou de Cerrado. A Resolução CONAMA nº 237/1997 enquadra essas atividades como potencialmente causadoras de impactos, exigindo licença prévia antes de sua realização.

Na fase de lavra a céu aberto (método predominante na mineração aluvionar de ouro), os impactos são os mais visíveis e extensos. A supressão de vegetação nativa para a abertura das cavas e das vias de acesso elimina habitats e compromete a conectividade dos ecossistemas. A remoção da camada orgânica do solo que acumulou matéria orgânica durante décadas ou séculos, destrói a microbiota responsável pela ciclagem de nutrientes, tornando o terreno virtualmente estéril para a recolonização vegetal natural. A exposição do solo aos processos erosivos provoca o assoreamento de rios e córregos, com impactos sobre a qualidade da água, a navegabilidade e a biodiversidade aquática (Gomide, 2018; Nery, 2018).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Viana e Bursztyn (2010) documentaram que, em Minas Gerais, a regularização ambiental das minerações de médio e pequeno porte apresenta avanços significativos no plano formal, mas ainda enfrenta desafios consideráveis na implementação efetiva dos planos de recuperação. Em seu estudo sobre 14 mineradoras do estado, os autores constataram que, embora todas possuíssem PRAD aprovado, apenas 43% tinham implementado plenamente as medidas previstas no documento. Essa lacuna entre o planejado e o executado é característica estrutural do sistema de licenciamento ambiental no Brasil, onde a fiscalização pós-licença é sistematicamente mais fraca do que a análise de documentos na fase de aprovação.

Na fase de beneficiamento, as principais preocupações ambientais são o consumo elevado de água, a geração de rejeitos com metais pesados e o uso de reagentes químicos na separação do ouro. O cianeto, utilizado no processo de lixiviação em heap leaching, é altamente tóxico e pode contaminar aquíferos em caso de vazamentos. Os rejeitos de beneficiamento são geralmente depositados em barragens, estruturas que representam risco permanente de ruptura catastrófica. A regulação das barragens de rejeito foi significativamente endurecida após Brumadinho, com a Resolução ANM nº 95/2022 proibindo o método de alteamento a montante — o mesmo utilizado nas barragens de Mariana e Brumadinho — e exigindo a descaracterização ou adaptação de todas as barragens construídas por esse método até 2027 (Matta, 2001; Gomide, 2018).

Os impactos hídricos da mineração merecem atenção especial. A extração de ouro aluvionar, realizada diretamente nos leitos de rios e igarapés, produz turbidez extrema nas águas a jusante dos pontos de dragagem, comprometendo a fotossíntese de algas e macrófitas aquáticas, reduzindo o oxigênio dissolvido e destruindo os habitats de peixes e invertebrados bentônicos. A alteração do perfil do leito do rio pela dragagem modifica o regime hidráulico local, acelerando a erosão das margens e o assoreamento de trechos a jusante. Em rios de pequeno porte, como os igarapés amazônicos, o impacto de uma única draga pode comprometer quilômetros de curso d'água, impacto desproporcional à escala da operação individual, mas cumulativamente devastador quando centenas de dragas operam simultaneamente na mesma bacia hidrográfica (Viana; Bursztyn, 2010; Nery, 2018).

A questão dos passivos ambientais históricos da mineração representa outro desafio de grande magnitude. Estima-se que existam no Brasil mais de 3.500 áreas degradadas por atividades minerárias paralisadas ou abandonadas sem a devida recuperação ambiental. Essas áreas (concentradas em Minas Gerais, Pará, Mato Grosso e Goiás) incluem cavas abertas inundadas, pilhas de estéril instáveis, taludes de corte erodidos e solos contaminados por metais pesados. A responsabilização pelo passivo de empresas já encerradas é frequentemente inviável na prática, recaindo sobre os municípios e o estado o ônus da remediação. A criação de fundos setoriais para financiar a recuperação de passivos ambientais orfanados financiados por

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

percentual da CFEM ou por contribuições do setor é uma proposta recorrente na literatura especializada que ainda aguarda implementação no Brasil (Gomide, 2018).

3.4. Mercúrio na MAPE: mecanismos de contaminação e dispersão ambiental

A amalgamação com mercúrio é o método mais difundido na mineração artesanal de ouro por sua simplicidade operacional e baixo custo. O mercúrio líquido é misturado diretamente ao sedimento aurífero ou ao concentrado obtido por lavagem gravitacional; o amalgama Hg-Au formado é então coletado e aquecido com maçarico, vaporizando o mercúrio e deixando o ouro metálico. Esse processo libera vapores de mercúrio diretamente para o ar em quantidades que, em ambientes fechados ou de baixa ventilação, rapidamente atingem concentrações perigosas para a saúde humana (Pamplona; Lopes; Bittencourt, 2021).

As perdas de mercúrio durante o processo são substanciais. A eficiência do processo de amalgamação raramente ultrapassa 50-60%, o que significa que para cada grama de mercúrio que permanece no amalgama, pelo menos um grama é perdido nos rejeitos ou na água. A "farinha de mercúrio" (gotículas ultrafinas formadas durante a moagem do minério) é especialmente difícil de controlar: não coalesce facilmente, pode ser carreada pela água por longas distâncias e penetra nos sedimentos de fundo dos rios, onde é metilada por bactérias anaeróbicas. Rejeitos de amalgamação podem conter entre 50 e 5.000 mg de mercúrio por kg de material, configurando passivos ambientais de elevada periculosidade (Costa *et al.,* 2020; Castro *et al.,* 2020).

Uma vez depositado nos sedimentos fluviais, o mercúrio inorgânico é convertido em metilmercúrio (CH_3Hg^+) por bactérias sulfato-redutoras em condições anaeróbicas. O metilmercúrio é a forma mais biodisponível e tóxica do metal: sua lipossolubilidade permite que seja absorvido eficientemente pelo plâncton, transferido para invertebrados aquáticos, concentrado em peixes e amplificado nos níveis tróficos superiores, processo conhecido como biomagnificação. Peixes predadores de topo como o tucunaré, o filhote e o dourado, amplamente consumidos pelas populações ribeirinhas, podem apresentar concentrações de metilmercúrio 10.000 a 100.000 vezes superiores à da água em que vivem (Coelho; Lucas; Medeiros, 2020).

Pamplona, Lopes e Bittencourt (2021) descrevem três vias principais de entrada do mercúrio no ecossistema florestal: deposição úmida (dissolução na água da chuva), deposição por interceptação (adsorção em partículas interceptadas pelas folhas) e absorção foliar direta via estômatos. Essas vias garantem que a contaminação por mercúrio se propague muito além dos limites físicos das áreas garimpadas, atingindo ecossistemas que podem estar a centenas de quilômetros dos focos emissores. Estudos realizados na Amazônia detectaram concentrações elevadas de mercúrio em solos florestais e em folhedo a distâncias de até 200 km de áreas de garimpo ativo.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

3.5. Impactos do mercúrio na saúde humana: evidências científicas

A exposição ao mercúrio é reconhecida pela Organização Mundial da Saúde (OMS) como um dos dez maiores riscos à saúde pública no mundo. No contexto da MAPE, os garimpeiros representam o grupo mais diretamente exposto, mas os impactos se propagam para as famílias que vivem próximas aos locais de processamento do amalgama e para as populações ribeirinhas que consomem peixes contaminados.

O mercúrio elementar inalado pelos pulmões é absorvido em taxa superior a 80% e distribuído pela corrente sanguínea para o sistema nervoso central, rins, fígado e pulmões. A barreira hematoencefálica não representa obstáculo efetivo para o mercúrio elementar, que é oxidado nas células cerebrais em mercúrio iônico (Hg^{2+}), forma que não retorna ao sangue e se acumula progressivamente no tecido nervoso. Os efeitos neurológicos da exposição crônica ao vapor de mercúrio incluem a síndrome do eritrismo, caracterizada por irritabilidade, timidez patológica, insônia e dificuldade de concentração, e, em estágios mais avançados, tremores progressivos, ataxia, disartria e psicose tóxica (Murad, 2022).

Os rins são o segundo órgão mais afetado pela exposição ao mercúrio inorgânico. A nefropatia mercurial manifesta-se inicialmente como proteinúria subclínica detectável em exames de rotina, progredindo para síndrome nefrótica e insuficiência renal crônica em casos de exposição prolongada ou intensa. Estudos realizados em comunidades garimpeiras do estado do Mato Grosso detectaram proteinúria em mais de 40% dos garimpeiros examinados, proporção muito superior à observada em populações controle não expostas (Cunha; EARP, 2022).

Para gestantes, crianças e fetos, os riscos são ainda mais severos. O metilmercúrio atravessa a barreira placentária com facilidade e interfere nos processos de mielinização neural e diferenciação celular durante o desenvolvimento fetal. As consequências incluem: retardo mental, paralisia cerebral, surdez neurossensorial, cegueira e deformidades congênitas. O quadro clínico mais grave foi documentado na Doença de Minamata (Japão, 1956-1970), onde dezenas de crianças nasceram com malformações severas após suas mães consumirem peixe contaminado com metilmercúrio lançado pelos efluentes de uma indústria petroquímica. Estudos epidemiológicos em comunidades indígenas amazônicas próximas ao garimpo documentaram redução significativa do quociente de inteligência (QI) em crianças com exposição pré-natal ao metilmercúrio, em comparação com grupos controle de comunidades não afetadas (Coelho; Lucas; Medeiros, 2020).

Os efeitos sobre os ecossistemas são igualmente graves e multidimensionais. O mercúrio compromete: o crescimento e a reprodução do fitoplâncton, base das cadeias alimentares aquáticas; a função reprodutiva de peixes com feminização de machos e redução das taxas de fertilidade; a sobrevivência de larvas de anfíbios, considerados bioindicadores sensíveis de qualidade ambiental; e a saúde de aves piscívoras e mamíferos aquáticos como lontras e

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

ariranhas, espécies já ameaçadas pelo desmatamento e pela caça (Castro *et al.,* 2020). Costa *et al.*, (2020) documentaram que peixes consumidos por populações ribeirinhas no Amapá apresentavam concentrações de metilmercúrio acima dos limites estabelecidos pela ANVISA em comunidades próximas ao garimpo, configurando risco real de intoxicação para essas populações.

A dimensão econômica da contaminação por mercúrio é frequentemente negligenciada nas análises de custo-benefício da mineração artesanal. Cunha e Earp (2022) estimam que os custos de saúde associados ao envenenamento por mercúrio em comunidades garimpeiras incluindo tratamentos médicos, perda de produtividade, incapacidade laboral e mortalidade prematura superam em muitas regiões os benefícios econômicos gerados pelo próprio garimpo. Quando se adicionam os custos de remediação ambiental dos rios e solos contaminados e a perda de serviços ecossistêmicos (pesca, abastecimento de água, turismo ecológico), a equação econômica do garimpo informal torna-se francamente negativa para a sociedade como um todo, ainda que continue sendo positiva para os garimpeiros individuais no curto prazo. Esse paradoxo microeconômico racional individualmente, irracional coletivamente, é uma das manifestações mais claras do fenômeno das externalidades negativas, que justificam a intervenção regulatória do Estado para corrigir as distorções de mercado.

O diagnóstico clínico e laboratorial da intoxicação por mercúrio em populações garimpeiras e ribeirinhas permanece um desafio em regiões remotas da Amazônia. A dosagem de mercúrio em cabelo é o método mais sensível e não invasivo para avaliar a exposição crônica e requer laboratórios especializados que raramente estão disponíveis nos municípios mais afetados. Pamplona, Lopes e Bittencourt (2021) destacam que muitos casos de intoxicação crônica por mercúrio são diagnosticados erroneamente como doenças neurológicas de outra etiologia, subestimando sistematicamente a prevalência real da intoxicação mercurial nessas populações. A ampliação da rede de diagnóstico laboratorial para o mercúrio e a capacitação de profissionais de saúde das equipes de atenção básica para o reconhecimento dos sinais clínicos de intoxicação mercurial são medidas de saúde pública de baixo custo e alto impacto potencial que deveriam integrar os planos nacionais de ação no âmbito da Convenção de Minamata.

3.6. Regulação internacional: A Convenção de Minamata e seus desdobramentos

A Convenção de Minamata sobre Mercúrio, adotada em Kumamoto (Japão) em outubro de 2013 e em vigor desde agosto de 2017, é o instrumento multilateral mais abrangente já negociado para o controle global do mercúrio. O Brasil ratificou a Convenção em 2017 e está juridicamente vinculado às suas obrigações. O art. 7 exige que os Estados Partes elaborem e implementem Planos Nacionais de Ação (PNA) para a MAPE, com metas de redução progressiva do uso do mercúrio, cronograma de implementação e mecanismos de monitoramento (Coelho; Lucas; Medeiros, 2020).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

O Anexo C da Convenção de Minamata lista práticas que os PNA devem eliminar: a amalgamação de minério inteiro (whole ore amalgamation), que é especialmente ineficiente e poluente; o aquecimento aberto de amalgamas sem dispositivos de captura de vapores; o processamento de amalgamas em áreas residenciais; e o uso de cianeto para recuperar ouro de rejeitos ricos em mercúrio, prática que combina os riscos dos dois metais. A Convenção prevê ainda mecanismos de transferência de tecnologia e apoio financeiro para países em desenvolvimento, reconhecendo que a transição para métodos livres de mercúrio requer capacitação técnica e recursos que muitos países não possuem internamente.

No contexto brasileiro, o Plano Nacional de Gestão do Mercúrio foi elaborado para cumprir as obrigações da Convenção, mas sua implementação tem enfrentado desafios significativos. O garimpo ilegal em terras indígenas, especialmente nos territórios Yanomami e Kayapó, no estado de Roraima e no sul do Pará, continuou se expandindo nos anos seguintes à ratificação da Convenção, atingindo proporções que, em 2022-2023, foram caracterizadas por organismos internacionais de direitos humanos como crise humanitária. A falta de fiscalização efetiva, associada à dificuldade logística de atuação em áreas remotas da Amazônia, compromete seriamente a implementação das obrigações assumidas pelo Brasil perante a Convenção de Minamata (Pamplona; Lopes; Bittencourt, 2021).

A Convenção de Minamata também estabelece obrigações específicas para o controle das emissões atmosféricas de mercúrio provenientes de processos industriais. O art. 8 exige que as partes adotem medidas de controle de emissões para as maiores fontes pontuais, incluindo usinas termelétricas a carvão, processos de cimentação, produção de metais ferrosos e não ferrosos, e indústrias de cloro-álcalis. No Brasil, a Resolução CONAMA nº 382/2006 estabelece limites máximos de emissão para fontes estacionárias, mas a regulação específica das emissões de mercúrio dessas fontes ainda carece de maior detalhamento e de mecanismos de monitoramento contínuo comparáveis aos adotados por países europeus e pela América do Norte (PNUMA, 2019).

O Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) estima que as emissões globais de mercúrio para a atmosfera atingiram cerca de 2.220 toneladas em 2015, das quais aproximadamente 38% são provenientes da MAPE, confirmando essa atividade como a maior fonte individual de poluição mercurial do planeta. Para fins de comparação, a combustão de carvão responde por cerca de 24% e a metalurgia de metais não ferrosos por 10% das emissões globais. O relatório "Global Mercury Assessment 2018" do PNUMA projeta que, sem medidas adicionais de controle, as emissões da MAPE continuarão crescendo em paralelo com o aumento dos preços do ouro e a expansão da atividade nos países em desenvolvimento (PNUMA, 2019). Esse cenário reforça a urgência da implementação efetiva dos Planos Nacionais de Ação

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

previstos pela Convenção de Minamata, com especial atenção ao Brasil, que combina extensa área de ocorrência de ouro aluvionar com uma das maiores populações de garimpeiros do mundo.

A efetividade da Convenção de Minamata depende, em última análise, da capacidade dos Estados Partes de transformar obrigações internacionais em políticas públicas concretas. Coelho, Lucas e Medeiros (2020) identificaram três fatores críticos para o sucesso da implementação: (i) a formalização dos garimpeiros, que os integre ao sistema de saúde, previdência e proteção ambiental sem criminalizar a atividade de subsistência; (ii) a disponibilidade de alternativas tecnológicas viáveis e acessíveis para a extração de ouro sem mercúrio; e (iii) a criação de mercados para o "ouro limpo", com diferencial de preço para o produto certificado como livre de mercúrio. Esses três fatores se reforçam mutuamente: sem alternativas tecnológicas, a formalização é inviável; sem mercados para o ouro limpo, o diferencial econômico necessário para a transição não existe. A articulação dessas condições requer um esforço de política pública que transcende qualquer ministério ou agência isolada, exigindo coordenação interministerial e cooperação internacional.

3.7. Tecnologias de monitoramento e caminhos para a mineração sustentável

O avanço tecnológico oferece ferramentas promissoras para o monitoramento da mineração e a prevenção de impactos. O sensoriamento remoto por satélite é o instrumento mais eficaz para a detecção do desmatamento associado ao garimpo em escala regional. O sistema DETER, do INPE, monitora alertas de desflorestamento na Amazônia com frequência de atualização de 24 horas e resolução espacial de 3,7 hectares. O projeto MapBiomas Mineração identificou, em 2022, mais de 200 mil hectares de áreas garimpadas na Amazônia Legal, com crescimento de 38% em relação a 2020. A disponibilização pública desses dados é fundamental para o acionamento de operações de fiscalização, mas a resposta operacional das forças de segurança e dos órgãos ambientais continua sendo lenta e fragmentada.

Para o monitoramento de barragens de rejeitos, a tecnologia LiDAR (Light Detection and Ranging) e os sistemas InSAR (Interferometria de Radar de Abertura Sintética) permitem detectar deslocamentos milimétricos em estruturas críticas com frequência de atualização de dias ou semanas, muito superior aos métodos tradicionais de monitoramento topográfico. A ANM passou a exigir, após Brumadinho, o monitoramento contínuo por sensores automáticos em todas as barragens classificadas como de alto risco, com transmissão de dados em tempo real para um sistema centralizado de monitoramento. A implementação efetiva desse sistema ainda está em andamento, mas representa um avanço regulatório significativo (Matta, 2001).

Para a MAPE, alternativas ao mercúrio testadas em campo incluem: a concentração por flotação de espuma, que utiliza reagentes coletores para separar o ouro por diferença de tensão superficial; a separação gravimétrica em espirais e cones de Knelson, que exploram a diferença

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

de densidade entre o ouro e os minerais de ganga; e o uso de jigs centrífugos, que aumentam a força gravitacional efetiva e melhoram a eficiência de recuperação de partículas finas. O Programa Global de Mercúrio do PNUMA financia projetos de implementação dessas tecnologias em comunidades garimpeiras no Brasil, Peru, Colômbia e países africanos, com resultados documentados de redução das emissões de mercúrio em 50-90% em comunidades participantes (Murad, 2022).

A digitalização da cadeia de custódia do ouro, rastreamento desde a mina até o produto final emerge como instrumento complementar de combate ao garimpo ilegal e de promoção da transparência. Iniciativas como o *Responsible Gold Mining Principles* (RGMPs), da *World Gold Council*, e a *Responsible Minerals Initiative* estabelecem padrões para certificar que o ouro comercializado globalmente seja proveniente de operações que respeitam critérios sociais, ambientais e de governança. A blockchain tem sido testada como tecnologia de rastreabilidade, permitindo que cada lote de ouro carregue consigo um registro imutável de sua origem, métodos de extração e impactos socioambientais verificados. No Brasil, a implementação desses sistemas enfrenta o desafio de integrar o garimpo artesanal frequentemente informal e geograficamente disperso em plataformas digitais desenvolvidas para operações formais de maior escala.

A inteligência artificial e o aprendizado de máquina (machine learning) têm sido aplicados ao setor minerário em múltiplas frentes. Na detecção de garimpo ilegal, algoritmos de visão computacional treinados com imagens de satélite são capazes de identificar padrões característicos do garimpo aluvionar como a coloração turva dos rios a jusante das dragas, as áreas de solo exposto em formato circular e a presença de embarcações com precisão superior a 90% em estudos piloto realizados no Pará e no Mato Grosso. No monitoramento de barragens, modelos preditivos treinados com séries históricas de dados geotécnicos e hidrológicos podem identificar anomalias que precederiam rupturas com antecedência suficiente para acionar planos de emergência. Na gestão ambiental das minas, algoritmos de otimização permitem reduzir o consumo de água, energia e reagentes químicos, diminuindo simultaneamente os custos operacionais e o impacto ambiental (MAPBIOMAS, 2022).

A remediação de áreas contaminadas por mercúrio é um desafio técnico e econômico de grande magnitude. As técnicas convencionais como escavação e disposição controlada dos solos contaminados, estabilização química dos sedimentos são eficazes, mas extremamente custosas, especialmente em ambientes fluviais de difícil acesso como os da Amazônia. Tecnologias emergentes de fitorremediação que utilizam plantas hiperacumuladoras de mercúrio para extrair o metal dos solos e sedimentos, têm sido estudadas como alternativa mais sustentável e economicamente viável. Espécies como Thlaspi caerulescens e algumas variedades de girassol demonstraram capacidade de acumular mercúrio em concentrações muito superiores à do solo

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

em que crescem, embora sua aplicação em escala nas condições tropicais amazônicas ainda requeira mais pesquisa (Costa *et al.,* 2020).

No horizonte de médio prazo, a transição energética global que demanda volumes crescentes de cobre, lítio, cobalto, manganês e outros minerais para a fabricação de baterias, painéis solares e turbinas eólicas pode paradoxalmente intensificar as pressões sobre os ecossistemas e as comunidades onde esses minerais ocorrem. O chamado "dilema verde" (a contradição entre a necessidade de mineração para produzir tecnologias limpas e os danos socioambientais dessa mesma mineração) emerge como um dos grandes desafios éticos e políticos do século XXI. Para o Brasil, país dotado de enormes reservas de minerais estratégicos, esse dilema é especialmente relevante: a decisão sobre como, onde e em que condições explorar esses recursos definirá não apenas a trajetória econômica do país, mas também o destino de ecossistemas únicos e de populações que os habitam há milênios (Mancini; Sala, 2018).

3.8. Impactos sobre povos indígenas e comunidades tradicionais

A invasão de territórios indígenas pelo garimpo constitui um dos capítulos mais graves da história socioambiental brasileira recente. A Terra Indígena Yanomami, com mais de 9,6 milhões de hectares no estado de Roraima e no noroeste do Amazonas, foi palco de uma das maiores crises humanitárias provocadas pela mineração ilegal no Brasil. No início de 2023, imagens divulgadas pela mídia internacional revelaram crianças Yanomami em estado avançado de desnutrição e malária, em consequência direta da destruição dos rios e dos recursos alimentares pelo garimpo. Estimativas do Instituto Socioambiental (ISA) indicaram a presença de mais de 20.000 garimpeiros ilegais no território Yanomami entre 2019 e 2022, o maior número já registrado desde a grande invasão dos anos 1980-1990 (Pamplona; Lopes; Bittencourt, 2021).

As consequências do garimpo ilegal para os Yanomami são multidimensionais. A dragagem dos rios destrói os pesqueiros, principal fonte proteica das comunidades. O desmatamento associado ao garimpo compromete a disponibilidade de caça e de plantas medicinais utilizadas pelos pajés. O mercúrio contamina os rios e os peixes, introduzindo na cadeia alimentar indígena o metal tóxico que, ao longo de gerações, acumula-se nos organismos. A presença massiva de garimpeiros introduz doenças contra as quais os Yanomami têm baixa imunidade histórica, como malária, gripe, sarampo e COVID-19. E a violência associada ao garimpo (assassinatos de lideranças, abuso sexual de mulheres, tráfico de drogas) desestrutura o tecido social das comunidades (Cunha; EARP, 2022).

A situação dos Yanomami não é exceção, mas paradigma. Os povos Kayapó, no sul do Pará, enfrentam invasões garimpeiras em seus rios, especialmente o Fresco, o Itacaiúnas e o Cumaru, com impactos documentados sobre a qualidade da água e a saúde dos ribeirinhos. O povo Munduruku, no médio Tapajós, registrou concentrações de mercúrio acima dos limites

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

seguros em mais de 60% dos indivíduos testados em estudos do INPA e da FIOCRUZ, incluindo mulheres grávidas e crianças. A pesquisadora Claudia do Valle Gaspar, do INPA, documentou que mulheres Munduruku apresentavam, em média, concentrações de mercúrio nos cabelos três vezes superiores ao limite estabelecido pela OMS para grupos vulneráveis evidência contundente da gravidade da contaminação e da inefetividade dos mecanismos de proteção vigentes (Coelho; Lucas; Medeiros, 2020).

A Convenção nº 169 da Organização Internacional do Trabalho (OIT), ratificada pelo Brasil em 2002, garante aos povos indígenas e tribais o direito à consulta prévia, livre e informada sobre quaisquer medidas legislativas ou administrativas que possam afetá-los. Esse direito é diretamente relevante para o licenciamento de atividades minerárias em territórios ou áreas de influência indígena. Entretanto, na prática, a aplicação da consulta prévia no contexto da mineração brasileira tem sido precária: os processos de consulta frequentemente ocorrem de forma tardia, com comunidades já confrontadas com fatos consumados, e sem tradução adequada dos documentos técnicos para as línguas indígenas (Pamplona; Lopes; Bittencourt, 2021).

Mancini e Sala (2018) propõem que a avaliação de impacto social de projetos minerários deve incorporar indicadores específicos para comunidades indígenas e tradicionais, incluindo: alterações nos padrões de uso e manejo dos recursos naturais; impactos sobre a segurança alimentar e nutricional; mudanças nas práticas culturais e espirituais associadas ao território; e alterações nos indicadores de saúde, com especial atenção aos grupos mais vulneráveis: gestantes, lactantes, crianças menores de cinco anos e idosos. A ausência desses indicadores nos EIA convencionais é uma lacuna metodológica que contribui para a invisibilidade dos impactos sobre essas populações nos processos de licenciamento.

3.9. O Paradoxo regulatório: entre a norma e a efetividade

A análise do marco regulatório da mineração no Brasil revela um paradoxo: o país possui um dos arcabouços normativos mais abrangentes e detalhados do mundo para o setor, mas a efetividade desse arcabouço é sistematicamente comprometida por fatores institucionais, políticos e econômicos que limitam sua implementação prática. O Quadro 1 sintetiza os principais instrumentos legais vigentes e suas respectivas lacunas de efetividade.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Quadro 1. Principais instrumentos legais da mineração no brasil e lacunas de efetividade

Instrumento	Objetivo Principal	Lacuna de Efetividade
CF/1988 – Art. 225	Proteção constitucional do meio ambiente	Princípios gerais carecem de regulamentação específica para mineração
Código de Mineração (DL 227/1967)	Regular regimes de exploração mineral	Linguagem desatualizada; não prevê mecanismos de responsabilidade ambiental modernos
Res. CONAMA 1/1986	Estabelecer critérios para EIA/RIMA	EIA avalia impactos ex ante, mas fiscalização ex post é insuficiente
Res. CONAMA 237/1997	Procedimentos de licenciamento ambiental	Sobreposição de competências entre ANM e órgãos ambientais gera conflitos
Decreto 97.632/1989 (PRAD)	Recuperação de áreas degradadas	Implementação efetiva monitorada em apenas ~43% dos casos (VIANA; BURSZTYN, 2010)
NRM (Portaria 237/2001)	Normas técnicas e de segurança	Fiscalização insuficiente; capacidade da ANM aquém das necessidades
Convenção de Minamata (2017)	Controlar uso e emissões de mercúrio	Garimpo ilegal continua expandindo; PNGM com implementação precária
Lei 13.575/2017 (ANM)	Reestruturar fiscalização mineral	Quadro de pessoal reduzido; recursos limitados para fiscalização em campo

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

O Quadro 1 evidencia que as lacunas de efetividade não são aleatórias: elas seguem um padrão consistente de fragilidade na fiscalização ex post (após a concessão da licença), insuficiência de recursos humanos e financeiros para os órgãos reguladores, conflitos de competência entre instâncias federal e estadual, e desatualização de instrumentos legais concebidos em contextos socioeconômicos muito diferentes do atual. Farias (2007) observa que a capacidade institucional do IBAMA e das agências estaduais de meio ambiente foi progressivamente corroída nas últimas décadas, com redução de pessoal, sucateamento de equipamentos e contingenciamento orçamentário, justamente no período em que a atividade mineradora se expandia aceleradamente.

Um segundo fator estrutural é a captura regulatória, fenômeno pelo qual as indústrias reguladas exercem influência desproporcional sobre os reguladores, moldando normas e interpretações em seu favor. Na mineração brasileira, esse fenômeno se manifesta na transição frequente de executivos entre empresas mineradoras e órgãos reguladores (fenômeno conhecido como "porta giratória"), no financiamento de campanhas eleitorais por empresas do setor, e na influência sobre a formulação de normas técnicas que deveriam ser elaboradas com base exclusivamente em critérios científicos e de proteção ambiental. Mancini e Sala (2018) documentaram padrões semelhantes em outros países produtores de minerais, sugerindo que a captura regulatória é um problema sistêmico do setor minerário global, não uma particularidade brasileira.

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Um terceiro fator é a assimetria de informação entre as empresas mineradoras que possuem dados técnicos detalhados sobre suas operações, riscos e passivos ambientais e os órgãos reguladores e as comunidades afetadas, que dependem das informações fornecidas pelas próprias empresas para avaliar os impactos e tomar decisões. Essa assimetria é agravada pela complexidade técnica dos EIA, cujos documentos frequentemente ultrapassam milhares de páginas e requerem conhecimento especializado para análise, tornando a participação informada das comunidades e dos órgãos com menor capacidade técnica extremamente difícil. A exigência de publicização dos dados de monitoramento ambiental em formatos acessíveis ao público, implementada em alguns estados, é um passo importante para reduzir essa assimetria, mas ainda está longe de ser universal no Brasil (Gomide, 2018).

A superação do paradoxo regulatório requer, portanto, não apenas o aperfeiçoamento das normas, mas uma transformação mais profunda no sistema de governança do setor minerário. Essa transformação inclui: o fortalecimento da independência e da capacidade técnica dos órgãos reguladores; a criação de mecanismos de responsabilização efetiva, inclusive criminal, para gestores de empresas que negligenciam a segurança ambiental; a ampliação da participação social nos processos de licenciamento e monitoramento; e o desenvolvimento de sistemas de informação ambiental que permitam o acompanhamento público e em tempo real das condições operacionais e ambientais das minas em atividade. Barbosa (2008) argumenta que essa transformação é, em última análise, uma questão de vontade política e de correlação de forças sociais: enquanto os benefícios econômicos da mineração estiverem concentrados em poucos atores com grande poder de influência política, e os custos socioambientais forem dispersos sobre populações com limitada capacidade de pressão, a mudança estrutural será lenta e resistida.

4. CONSIDERAÇÕES

Este artigo demonstrou que a mineração do ouro no Brasil é atravessada por uma tensão estrutural profunda entre sua expressiva relevância econômica e seus elevados custos socioambientais. O faturamento de R$ 270,8 bilhões em 2024 e a geração de mais de dois milhões de empregos diretos coexistem com 901 conflitos socioambientais que afetaram 2,81 milhões de cidadãos e produziram 41 desfechos fatais no mesmo período. Essa equação evidencia que o modelo minerário vigente não distribui de forma equitativa os benefícios e os ônus da atividade, transferindo os ganhos para acionistas e consumidores globais enquanto concentra os impactos negativos sobre as comunidades locais mais vulneráveis. O ouro responsável por 8,81% do faturamento mineral brasileiro e por 20% do ouro no mercado mundial originário da MAPE tem, portanto, um custo social e ambiental que o preço de mercado não captura.

A análise do marco legal demonstrou que o Brasil possui um arcabouço normativo relativamente sofisticado: a Constituição Federal de 1988 garante proteção constitucional ao meio

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

ambiente; o Código de Mineração estabelece os regimes de exploração; as resoluções do CONAMA regulamentam o licenciamento ambiental; as NRM disciplinam as condições técnicas e de segurança; e a Convenção de Minamata impõe obrigações internacionais para o controle do mercúrio. O problema, portanto, não está na ausência de normas, mas na insuficiência de sua implementação e fiscalização. A recorrência de desastres como Mariana (2015) e Brumadinho (2019), ambos protagonizados por operadores que possuíam todas as licenças exigidas, demonstra que a existência formal de licenciamento não constitui garantia suficiente de segurança ambiental e comunitária. O Quadro 1, apresentado neste trabalho, sistematiza esse paradoxo: cada instrumento legal possui lacunas de efetividade específicas que se acumulam de forma sistêmica, criando janelas de risco que práticas negligentes inevitavelmente exploram.

A contaminação por mercúrio na MAPE representa uma crise de saúde pública de crescente gravidade. Os efeitos neurológicos, renais e reprodutivos documentados nas populações expostas são, em sua maioria, irreversíveis. Crianças com dano neurológico fetal causado pela exposição pré-natal ao metilmercúrio não se recuperarão plenamente, independentemente dos cuidados de saúde posteriores. Os estudos realizados junto a comunidades Munduruku e Yanomami nos quais mais de 60% dos indivíduos testados apresentavam concentrações de mercúrio acima dos limites seguros da OMS, revelam que povos inteiros têm sua saúde comprometida de forma permanente pela expansão do garimpo ilegal em seus territórios. Essa realidade transcende o domínio técnico-ambiental e constitui uma violação de direitos humanos que demanda resposta urgente do Estado brasileiro.

A dimensão ecossistêmica da contaminação mercurial igualmente merece atenção. A biomagnificação do metilmercúrio na cadeia alimentar aquática compromete a segurança alimentar de populações ribeirinhas que dependem do pescado como principal fonte proteica. O desmatamento associado ao garimpo, estimado em mais de 200 mil hectares na Amazônia Legal em 2022, segundo o MapBiomas, acelera a perda de biodiversidade e compromete os serviços ecossistêmicos que sustentam as economias locais: regulação hídrica, polinização, controle natural de pragas e sequestro de carbono. Esses impactos têm custos econômicos reais que raramente são contabilizados nas análises de custo-benefício da mineração, criando uma ilusão de rentabilidade que distorce as decisões de política pública (Mancini; Sala, 2018).

O presente estudo apresenta algumas limitações que devem ser reconhecidas. Por se tratar de revisão bibliográfica, não foram realizadas coletas de dados primários junto às comunidades afetadas, garimpeiros ou representantes empresariais, o que limitaria a capacidade de triangulação das informações e a captação de perspectivas locais não registradas na literatura acadêmica. Além disso, a produção científica brasileira sobre os impactos da mineração de ouro ainda apresenta lacunas em termos de dados epidemiológicos longitudinais sobre populações expostas ao mercúrio, estudos de avaliação de efetividade dos instrumentos de licenciamento e

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

pesquisas sobre a viabilidade econômica de alternativas ao mercúrio na MAPE. Essas lacunas devem orientar a agenda de pesquisa futura.

Com base na revisão realizada, propõem-se oito diretrizes estratégicas para a transição rumo a uma mineração de ouro mais sustentável no Brasil: (i) fortalecimento institucional dos órgãos de fiscalização ambiental e minerária, com investimento em sensoriamento remoto por satélite, inteligência artificial para análise de dados ambientais e ampliação do quadro de servidores especializados; (ii) integração obrigatória do planejamento de fechamento de mina desde a fase de licenciamento, com constituição de garantias financeiras suficientes para cobrir os custos de remediação e fechamento; (iii) substituição progressiva do mercúrio na MAPE por tecnologias de concentração gravimétrica, com programas de capacitação e apoio financeiro via mecanismos da Convenção de Minamata; (iv) implementação de planos territoriais de diversificação econômica em municípios dependentes da mineração, financiados por percentual específico da CFEM; (v) garantia de participação efetiva de comunidades afetadas (incluindo povos indígenas e quilombolas) nos processos de licenciamento, monitoramento e gestão dos recursos da CFEM, por meio de modelos de governança territorial participativa; (vi) adoção de critérios ESG *(Environmental, Social and Governance)* como requisito para o acesso a financiamento público e incentivos fiscais por parte das mineradoras, vinculando desempenho socioambiental verificável à obtenção de benefícios regulatórios; (vii) incorporação de princípios de economia circular ao setor mineral, incluindo o reaproveitamento de rejeitos, a valorização de subprodutos e a redução do consumo de água e energia nas operações de beneficiamento; e (viii) implementação de sistemas de rastreabilidade baseados em tecnologia blockchain para certificação da cadeia de custódia do ouro, permitindo ao consumidor final verificar a origem e os indicadores socioambientais associados ao metal adquirido.

Do ponto de vista acadêmico e profissional, este trabalho reafirma que a Engenharia de Minas do século XXI não pode ser reduzida à sua dimensão técnico-extrativista. O engenheiro de minas precisa ser capaz de navegar as complexidades jurídicas do licenciamento ambiental, de dialogar com comunidades em seus próprios termos e de propor soluções tecnológicas que conciliem viabilidade econômica com responsabilidade socioambiental. A formação universitária tem papel fundamental nessa transformação, e trabalhos como este que buscam integrar em uma perspectiva sistêmica as dimensões jurídica, econômica, ambiental e de saúde pública da mineração são contribuições ao amadurecimento dessa formação.

A evidência acumulada nesta revisão indica que os custos socioambientais da mineração aurífera no Brasil estão sistematicamente subestimados nos processos de tomada de decisão pública. A internalização desses custos nas análises de viabilidade e nas políticas setoriais, incluindo danos neurológicos por exposição ao mercúrio, passivos de remediação de longo prazo, impactos sobre serviços ecossistêmicos e externalidades sobre comunidades tradicionais, é

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

condição necessária para a formulação de políticas públicas que promovam uma distribuição mais equitativa dos benefícios e ônus da atividade minerária. A consolidação de indicadores socioambientais integrados e de mecanismos de responsabilização efetiva constitui, nesse sentido, uma agenda prioritária tanto para a pesquisa científica quanto para a gestão pública do setor mineral.

REFERÊNCIAS

BARBOSA, G. S. O desafio do desenvolvimento sustentável. **Revista Visões**, v. 1, n. 4, p. 1-14, jan./jun. 2008.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Diário Oficial da União, Brasília, 5 out. 1988.

BRASIL. **Decreto n. 62.934, de 2 de julho de 1968**. Regulamento do Código de Mineração. Diário Oficial da União, Brasília, 1968.

BRASIL. **Decreto n. 97.632, de 10 de abril de 1989**. Plano de Recuperação de Área Degradada – PRAD. Diário Oficial da União, Brasília, 1989.

BRASIL. **Decreto-Lei n. 227, de 28 de fevereiro de 1967**. Código de Mineração. Diário Oficial da União, Brasília, 1967.

BRASIL. **Lei n. 13.575, de 26 de dezembro de 2017**. Cria a Agência Nacional de Mineração (ANM). Diário Oficial da União, Brasília, 2017.

BRASIL. **Lei n. 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Política Nacional do Meio Ambiente. Diário Oficial da União, Brasília, 1981.

BRASIL. **Resolução ANM n. 95, de 7 de fevereiro de 2022**. Critérios para eliminação das barragens a montante. Brasília: ANM, 2022.

BRASIL. **Resolução CONAMA n. 1, de 23 de janeiro de 1986**. Critérios básicos para o EIA/RIMA. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 1986.

BRASIL. **Resolução CONAMA n. 237, de 19 de dezembro de 1997**. Procedimentos de licenciamento ambiental. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 1997.

CANÇADO TRINDADE, Antônio Augusto. **Tratado de Direito Internacional dos Direitos Humanos**. Porto Alegre: Sergio Fabris Editor, 1999. v. 2.

CASTRO, Karen Quintão et al. Mineração: desenvolvimento econômico versus desenvolvimento sustentável. **Observatorio de la Economía Latinoamericana**, n. 265, 2020.

COELHO, Yuri Cavaleiro de Macedo; LUCAS, Flávia Cristina Araújo; MEDEIROS, Priscila Sanjuan Sarmento. Percepção ambiental e mineração de agregados: o olhar da população urbano-rural de Ourém, Pará, Brasil. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 53, 2020.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

COSTA, O. C. *et al.* **Exposição ao mercúrio pelo consumo de peixes**: impacto à saúde das populações locais e economia pesqueira do Amapá. Nota Técnica. [S. l.]: WWF/IEPA/IEPÉ/FIOCRUZ, 2020.

CRUZ, José. Relatório detalha conflitos de mineração e impactos socioambientais no Brasil. **Novo Jornal**, 2025. Disponível em: https://www.novojornal.com.br. Acesso em: 24 set. 2025.

CUNHA, Ana Maria Botelho Marinho da; EARP, Márcia Viana de Sá. O setor mineral brasileiro e o impacto socioambiental causado pela exploração ilegal dos recursos minerais. **Revista Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos**, v. 16, n. 1, 2022.

DNPM – DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Portaria n. 237, de 18 de outubro de 2001**. Normas Regulamentadoras de Mineração (NRM). Brasília: DNPM, 2001.

FARIAS, Carlos Eugênio Gomes. **Mineração e o meio ambiente no Brasil**. Relatório preparado para o CGEE/PNUD, contrato 2002/001604. Brasília: CGEE, 2002.

FARIAS, Talden. **Licenciamento Ambiental**: aspectos teóricos e práticos. Belo Horizonte: Fórum, 2007.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2018.

GOMIDE, Carolina Siqueira et al. (Orgs.). **Dicionário crítico de mineração**. Marabá: iGuana, 2018.

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Economia Mineral do Brasil 2020**. Brasília: IBRAM, 2020.

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Mineração em Números 2025**. Brasília: IBRAM, 2025. Disponível em: https://ibram.org.br. Acesso em: 24 set. 2025.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Projeto DETER**: sistema de detecção do desmatamento em tempo real. São José dos Campos: INPE, 2023. Disponível em: http://www.inpe.br. Acesso em: 15 jan. 2026.

KILIAN, John-Mark. Addressing the social impact of mining activities on communities for sustainability. **Civil Engineering Journal**, v. 16, n. 8, p. 22-24, ago. 2008.

MANCINI, Lucia; SALA, Serenella. Social impact assessment in the mining sector: review and comparison of indicators frameworks. **Resources Policy**, v. 57, p. 98-111, 2018.

MAPBIOMAS. **MapBiomas Mineração 2022**: Mapeamento da mineração na Amazônia Legal. São Paulo: MapBiomas, 2022. Disponível em: https://mapbiomas.org. Acesso em: 20 jan. 2025.

MATTA, Paulo Magno da. **Reflexos da mineração na qualidade ambiental das cidades**. 2001. 35 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2001.

MURAD, Afonso Tadeu. O ciclo do ouro e seus impactos socioambientais: um drama humano e ecológico que atravessa fronteiras. **Fronteiras – Revista de Teologia da Unicap**, v. 5, n. 1, p. 16-41, 2022.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

NERY, M. A. C. Notas de aula – Pesquisa mineral, lavra e beneficiamento. *In:* **BNDES Setorial 47**: Mineração e Desenvolvimento Sustentável. Rio de Janeiro: BNDES, 2018. p. 340-341.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). **Mercury and health**. Genebra: WHO, 2017. Disponível em: https://www.who.int. Acesso em: 10 jan. 2026.

PAMPLONA, Danielle Anne; LOPES, Fernanda Oromi; BITTENCOURT, Gabriel de Oliveira. Extração de ouro e povos tribais: um estudo à luz dos entendimentos da Corte Interamericana e do exemplo brasileiro. **Homa Publica – Revista Internacional de Derechos Humanos y Empresas**, v. 5, n. 2, p. 085-085, 2021.

PNUMA – PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE. **Global Mercury Assessment 2018**. Nairobi: UNEP, 2019.

RIBEIRO, C. L. **Direito minerário aplicado**. Belo Horizonte: Del Rey, 2005.

VIANA, Mauricio Boratto; BURSZTYN, Maria Augusta Almeida. Regularização ambiental de minerações em Minas Gerais. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 63, n. 2, p. 363-369, abr./jun. 2010.

WORLD GOLD COUNCIL. **Gold Demand Trends**: Full Year 2022. Londres: World Gold Council, 2023. Disponível em: https://www.gold.org. Acesso em: 10 jan. 2026.

YIN, Robert K. **Estudo de caso**: planejamento e métodos. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

ZONTA, M.; TROCATE, C. (Orgs.). **Antes fosse mais leve a carga**: reflexões sobre o desastre da Samarco/Vale/BHP Billiton. Marabá: Editorial Iguana, 2016.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.