

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

VINÍCIUS FUJITA

**A Mineração Artesanal (Garimpo) do Ouro no Brasil: Bases Legais, Impactos da
Contaminação por Mercúrio e Tecnologias Inovadoras de Remediação**

São Paulo

2024

VINÍCIUS FUJITA

A Mineração Artesanal (Garimpo) do Ouro no Brasil: Bases Legais, Impactos da Contaminação por Mercúrio e Tecnologias Inovadoras de Remediação

Versão Corrigida

Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do título de Especialista em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields.

Orientador: Fabio Netto Moreno

São Paulo

2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

Fujita, Vinícius

A Mineração Artesanal (Garimpo) do Ouro no Brasil: Bases Legais, Impactos da Contaminação por Mercúrio e Tecnologias Inovadoras de Remediação / V. Fujita -- São Paulo, 2024.

37 p.

Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields)) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Poli-Integra.

1.Mineração - Impactos socioambientais 2.Áreas contaminadas - gerenciamento 3.Metil-mercúrio 4.Novas técnicas de remediação I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Poli-Integra II.t.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todos que tornaram possível a realização desta monografia. Em primeiro lugar, agradeço ao meu orientador, Fabio Netto Moreno, por sua orientação perspicaz, apoio e dedicação ao longo deste processo.

Além disso, sou imensamente grato à minha família, cujo apoio e incentivo constante me deram força e determinação. A todos os que, de várias maneiras, contribuíram para este projeto, meu mais sincero obrigado.

Um agradecimento especial ao meu amor, Vanda Dias, por me aceitar e apoiar.

RESUMO

FUJITA, Vinícius. A Mineração Artesanal (Garimpo) do Ouro no Brasil: Bases Legais, Impactos da Contaminação por Mercúrio e Tecnologias Inovadoras de Remediação. 2024. 37 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

A mineração artesanal de ouro no Brasil é uma atividade da qual muitas pessoas tiram seu sustento, principalmente na região Norte do país. No entanto trata-se de uma atividade com sérios impactos negativos ao meio ambiente e, principalmente à saúde humana das comunidades expostas. A contaminação por mercúrio é uma das principais preocupações associadas a essa prática, já que o metal pesado é frequentemente utilizado na extração de ouro, podendo se espalhar pelo solo, água e ar. Ao ser introduzido ao meio ambiente o mercúrio passa por diversos processos físico-químicos até chegar a forma de metil-mercúrio, altamente tóxico para os seres vivos, uma vez que o contaminante tende a se bioacumular nos organismos e biomagnificar na cadeia trófica. Com base neste tema atual, esta monografia propõe um levantamento bibliográfico das bases Legais da mineração artesanal no Brasil, os impactos provocados pela contaminação por Mercúrio, proveniente dessa atividade e as principais tecnologias inovadoras de remediação do mercúrio.

Palavras chave: avaliação de risco à saúde humana, metil-mercúrio, novas técnicas de remediação, mineração – impactos socioambientais e áreas contaminadas – gerenciamento.

ABSTRACT

FUJITA, Vinícius. The Artisanal Gold Mining (*Garimpo*) in Brazil: Legal Framework, Impacts of Mercury Contamination, and Innovative Remediation Technologies. 2024. 37 p. Monograph (MBA in Contaminated Area Management, Sustainable Urban Developm– Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

The artisanal gold mining in Brazil is an activity from which many people derive their livelihoods, especially in the northern region of the country. However, it is an activity with serious negative impacts on the environment and, especially, the human health of exposed communities. Mercury contamination is one of the main concerns associated with this practice, as the heavy metal is frequently used in gold extraction, potentially spreading through soil, water, and air. When introduced into the environment, mercury undergoes various physicochemical processes until it reaches the form of methylmercury, highly toxic to living organisms, as the contaminant tends to bioaccumulate in organisms and biomagnify in the food chain. Based on this current theme, this monograph proposes a bibliographic survey of the Legal Bases of artisanal mining in Brazil, the impacts caused by mercury contamination resulting from this activity, and the main innovative technologies for mercury remediation...

Keywords: human health risk assessment, methylmercury, new remediation techniques, mining - socio-environmental impacts, contaminated areas - management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Linha do tempo das principais Legislações Ambientais Brasileiras.....	10
Figura 2 – Número de ocorrência de estudos desde 1989.	12
Figura 3 – Diagrama de rede de <i>keywords</i>	13
Figura 4 – Foto do processo de queima da amálgama.....	15
Figura 5 – Ciclo biogeoquímico do mercúrio.	20
Figura 6 – Representação das reações químicas para formação do Metil-mercúrio.	21
Figura 7 – Mecanismos de fitorremediação de metais pesados	25
Figura 8 – Diagrama esquemático da interação entre biochar e contaminantes.....	27
Figura 9 – Mecanismos da nanoremediação para tratamento de áreas contaminadas.	28
Figura 10 – Ilustração da remediação eletrocinética aplicada em solo	31

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	9
2.	JUSTIFICATIVA	11
3.	OBJETIVOS	11
4.	MÉTODOS	12
5.	REVISÃO DE LITERATURA	13
5.1.	Breve histórico da mineração de ouro no Brasil e da mineração artesanal do ouro	13
5.2.	Bases legais da mineração	16
5.3.	O ciclo biogeoquímico do mercúrio e sua toxicidade	19
5.4.	A Convenção de Minamata	22
5.5.	Tecnologias inovadoras na remediação de ambientes contaminados pelo mercúrio	23
5.5.1.	<i>Fitorremediação</i>	23
5.5.2.	<i>Imobilização por carvão orgânico (biochar)</i>	26
5.5.3.	<i>Nanotecnologia</i>	27
5.5.4.	<i>Remediação eletrocinética</i>	30
6.	CONCLUSÕES	33
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34

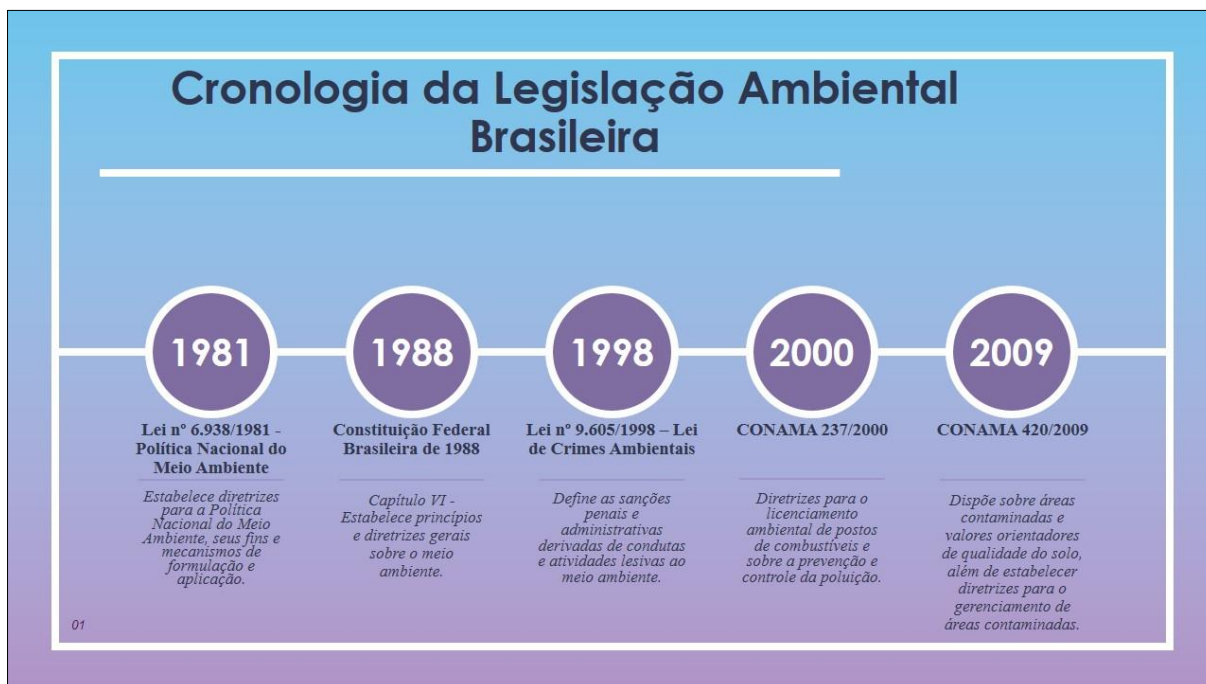
1. INTRODUÇÃO

O Brasil passou por um intenso processo de industrialização, principalmente entre as décadas de 30 e 80 (SUZIGAN, 2012), que trouxe um grande desenvolvimento ao país, mas também introduziu alguns problemas que persistem até os dias atuais. Um desses problemas é a contaminação do solo e águas subterrâneas por substâncias advindas da disposição de resíduos e rejeitos em solos ou do lançamento de efluentes industriais em corpos hídricos, durante muitas décadas, já que à época não se conhecia bem a nocividade dos contaminantes presentes nestes materiais (CANARIO & BETTINE, 2020). Além disso, a inexistência de uma legislação ambiental madura também permitia que essas práticas fossem realizadas indiscriminadamente (Canario & Bettine, 2020).

As primeiras preocupações para com o meio ambiente começaram a surgir a partir da década de 60, com a publicação do livro Primavera Silenciosa (*Silent Spring*), publicado em 1962 por Rachel Carson, que chamou a atenção para os perigos ambientais e humanos do uso indiscriminado de pesticidas, e acabou incentivando mudanças revolucionárias nas leis que afetam o ar, terra e água (RACHEL, 1962). Já na década de 70, pode-se citar dois desastres ambientais, de *Love Canal*, em Nova Iorque/EUA, e *Lekkerkirk*, em Roterdã/Holanda, que também lançaram preocupações mais amplas sobre a contaminação do solo e água subterrânea (CANARIO & BETTINE, 2020).

No Brasil, também na década de 60, começa a se disseminar informações referentes a contaminação de trabalhadores na região de Franca/SP, por chumbo (VERIDIANA, 2024). O que desencadeou o desenvolvimento dos primeiros mecanismos de conscientização e preservação do meio ambiente e da saúde humana. A **Figura 1**, ilustra uma linha do tempo, com o surgimento das principais legislações ambientais brasileiras desde a Política Nacional do Meio Ambiente.

Figura 1 – Linha do tempo das principais Legislações Ambientais Brasileiras.



Fonte: adaptado de Canario & Bettine (2020).

Somente a partir dos anos 2000, no Brasil, é que o Gerenciamento de Áreas Contaminadas passa a ser considerado, devido às frequentes contaminações apresentadas nos postos de combustíveis, com a publicação da CONAMA 237/2000, e anos depois, com a publicação da CONAMA 420/2009, passa a dispor valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas, além de estabelecer diretrizes mais assertivas para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas (CANÁRIO & BETTINE, 2020). À partir daí novas tecnologias começaram a surgir para o diagnóstico, monitoramento e remediação das áreas contaminadas.

Contudo, o Brasil ainda apresenta desafios no Gerenciamento de Áreas Contaminadas. Um tema que vem ganhando destaque nos últimos anos são os impactos causados pelo garimpo artesanal de ouro na região norte do Brasil. De acordo com Queiroz et. al. (2022) o garimpo na região vem crescendo devido ao aumento no valor do ouro e à diminuição da rigidez nas políticas e fiscalizações ambientais. Um dos problemas causados pelo garimpo artesanal é justamente a contaminação por mercúrio, que atinge o solo, as águas superficiais e subterrâneas, os animais e, conseqüentemente, as comunidades lindeiras às atividades garimpeiras (QUEIROZ et. al, 2022).

Neste sentido, o objetivo desta monografia é realizar um levantamento bibliográfico da mineração artesanal de ouro na região Norte do Brasil, descrever as bases legais da atividade

de mineração brasileiras e da contaminação ambiental associada ao uso do mercúrio, visando identificar os riscos à saúde humana e ao meio ambiente pela exposição a esse elemento. Além disso, buscou-se também selecionar e descrever tecnologias inovadoras de remediação de áreas contaminadas para fins de redução/eliminação dos riscos pela exposição a essa substância.

2. JUSTIFICATIVA

A mineração artesanal, também conhecida no Brasil como garimpo, é definida por Moreno et. al. (2009) como qualquer atividade de mineração que não segue a abordagem técnica convencional adotada pelas empresas de mineração organizadas. O histórico da mineração artesanal no Brasil apresentou um relaxamento das políticas ambientais, e até mesmo um incentivo à exploração descontrolada das regiões de floresta amazônica. Com isso muitas atividades extrativistas, dentre elas o garimpo de ouro, foram atraídas para a região Norte do Brasil, conhecida historicamente pela sua riqueza em minérios valiosos, como o ouro (COSTA & RIOS, 2022).

Embora o país tenha construído um sólido arcabouço legal para mitigar o impacto das da mineração artesanal, conforme será apresentado no Capítulo 5.2, o garimpo de ouro ainda vem provocando a contaminação do solo, das águas e das comunidades limítrofes na região Norte, devido principalmente ao emprego de mercúrio no processo de extração do ouro (QUEIROZ et. al, 2022). Sendo assim, é importante analisar os marcos legais da mineração no Brasil, avaliarmos quais os impactos ambientais provocados pelo emprego do mercúrio no garimpo de ouro, identificar os riscos à saúde humana e ao meio ambiente e levantar as principais tecnologias inovadoras de remediação, para fins de redução/eliminação dos riscos impostos pelo mercúrio.

3. OBJETIVOS

O objetivo desta monografia será de realizar uma revisão bibliográfica, visando apresentar as bases legais para a atividade da mineração artesanal (garimpo) no Brasil, identificar os riscos à saúde humana e ao meio ambiente provocados pela contaminação por mercúrio gerada pelo garimpo do ouro na região Norte do país, assim como selecionar e descrever tecnologias inovadoras para a remediação de ambientes contaminados por mercúrio.

4. MÉTODOS

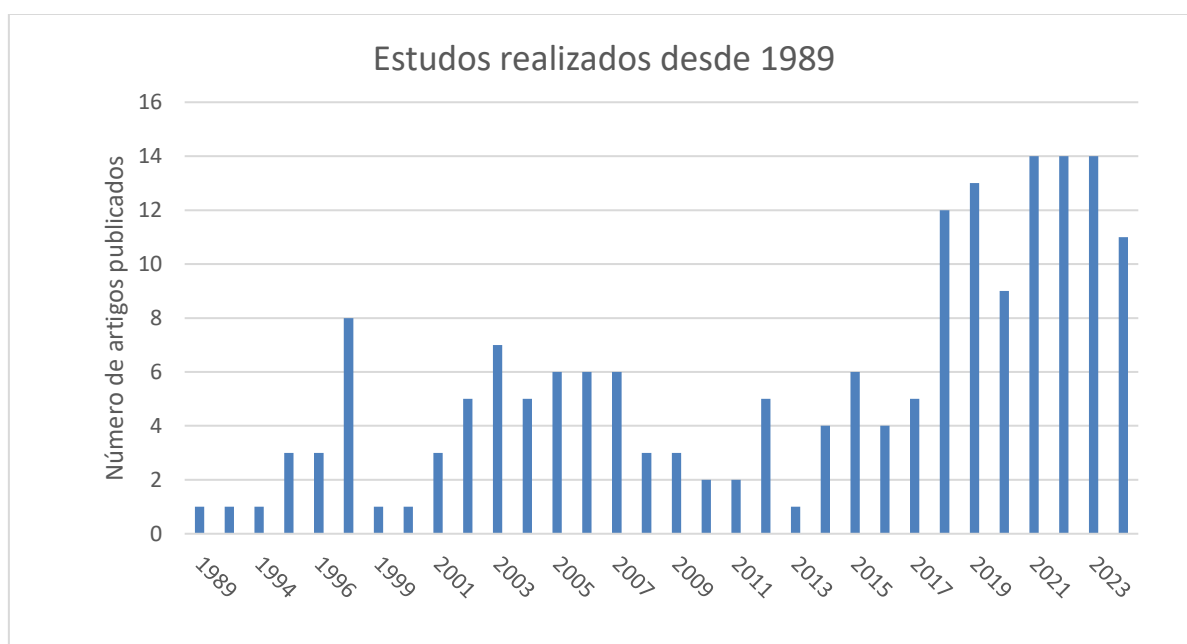
Para o levantamento bibliográfico foram utilizados os sites de pesquisa *Science Direct*, *Scopus*, *Google Acadêmico*, *PubMed* e o banco de dados de produções acadêmicas da USP (*Digital Library of Academic Works*).

Para a realização das pesquisas foram priorizadas (porém não limitadas à), as produções acadêmicas do período de 2019 até 2024. As palavras chave utilizadas para as pesquisas bibliográficas foram: avaliação de risco à saúde humana, metil-mercúrio, novas técnicas de remediação, mineração – impactos socioambientais e áreas contaminadas – gerenciamento. Ao todo foram reunidos sessenta artigos acadêmicos acerca do tema sugerido.

Além disso, uma segunda pesquisa foi realizada no banco de dados de artigos acadêmicos *PubMed*, que compreende mais de 36 milhões de citações de literatura biomédica do *Medline*, revistas de ciências biológicas e livros online, com o intuito de verificar quantos estudos foram realizados com o tema mineração de ouro na região norte do Brasil, e gerar um diagrama das palavras chave mais frequentes. Para a realização da pesquisa foram utilizadas as palavras chave: *Mercury*, *gold* e *amazon*, unidas pelo operador lógico “AND”, exigindo que todas as condições sejam verdadeiras. A partir da pesquisa foram obtidos 168 artigos publicados desde 1989. A

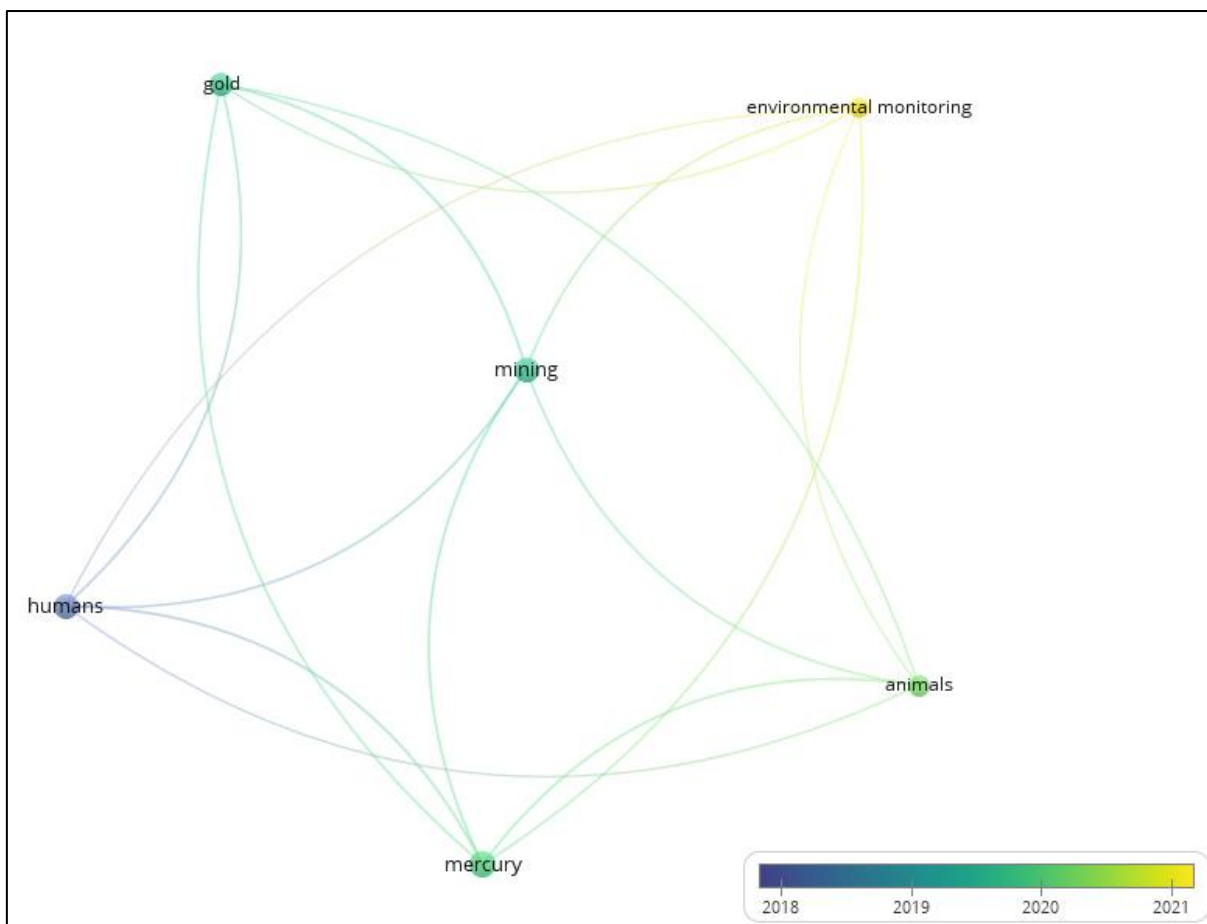
Figura 2 apresenta o gráfico com o número de ocorrência dos artigos em cada ano, desde 1995.

Figura 2 – Número de ocorrência de estudos desde 1989.



A partir desta pesquisa no *PubMed*, foi elaborado também um diagrama de rede das palavras chave que apresentaram maior frequência dentre os 168 artigos obtidos, além de mostrar a relação entre elas. Para elaboração desse diagrama foi utilizado o software livre *VOSviewer* versão 1.6.20. A **Figura 3** ilustra esse diagrama.

Figura 3 – Diagrama de rede de *keywords*.



Através da análise da pesquisa realizada, nota-se a as palavras chaves mais frequentes são: *Gold, mining, environmental monitoring, humans, Mercury e animals*.

5. REVISÃO DE LITERATURA

5.1. Breve histórico da mineração de ouro no Brasil e da mineração artesanal do ouro

A exploração do território brasileiro em busca de ouro tem raízes históricas, conforme comenta Costa & Rios (2022). De acordo com os autores, “nos últimos 300 anos, o Brasil tem sido um dos mais importantes produtores de ouro do mundo”. O primeiro *boom* da exploração de minério ocorreu no início do século XVIII, com as expedições dos bandeirantes, partindo de São Paulo até as Minas Gerais (DA COSTA & RIOS, 2022). O crescente êxito na corrida pelo

ouro fez com as expedições avançassem Brasil adentro, rumo a Goiás, Mato Grosso até chegarem na região norte do Brasil, uma das principais regiões de exploração de ouro nos dias atuais (DA COSTA & RIOS, 2022). Contudo, de acordo com Furtado (2020), a garimpagem das regiões amazônicas tem início mais expressivo a partir de 1958.

A mineração artesanal é definida por Moreno (et. al. 2009) como quaisquer atividades de mineração executadas sem os critérios convencionais utilizados pelas grandes empresas mineradoras, com emprego de maquinário pesado (escavadeiras, perfuratrizes, britadores, caminhões, etc) e implementação de medidas de segurança e controle ambiental rigorosos. Como consequência dessa falta de critérios, vários impactos ambientais são desencadeados. O principal deles é a contaminação do meio ambiente por mercúrio metálico. A extração do ouro pode ocorrer através de dois principais processos: amalgamação e cianetação. A amalgamação, que é o método mais comumente empregado, consiste na adição de mercúrio líquido à rocha contendo o minério de ouro, formando uma liga metálica com o ouro denominada amálgama. Posteriormente o ouro é separado do mercúrio por meio da sua queima, restando somente o ouro puro (Veiga et al., 2006). Já a cianetação envolve a dissolução do ouro presente no minério usando uma solução de cianeto, geralmente cianeto de sódio ou cianeto de potássio, por um processo de lixiviação (MALONE, 2023). A **Figura 4** ilustra foto do processo de queima da amálgama para extração do ouro.

Figura 4 – Foto do processo de queima da amálgama.



Fonte: Sousa, 2019.

O problema da amalgamação é a falta de critérios para controle ambiental e de saúde e segurança no manuseio do mercúrio, que geralmente é feito *in situ*, liberando-se boa parte do mercúrio para o solo, águas e atmosfera. Uma vez inserido no meio ambiente o mercúrio passa por uma reação química convertendo-se em metil-mercúrio, que tende a se bioacumular em células dos organismos vivos e que rapidamente se biomagnifica na cadeia trófica (MORENO et. al., 2009). Monte Jr. et. al. (2023) citam que dentre os problemas causados pela contaminação por metil-mercúrio aos seres humanos, estão os danos irreversíveis ao sistema nervoso central, perda de visão periférica, comprometimento da coordenação motora, fraqueza muscular e deficiência de fala.

Nas regiões amazônicas a biomagnificação do mercúrio e a sua bioacumulação na cadeia trófica, especialmente na ictiofauna, apresenta especial agravante devido ao fato de as populações ribeirinhas possuírem hábitos alimentícios fortemente dependentes dos rios. De acordo com Santana (2022), o consumo anual de peixe pela população brasileira é em média 9 kg por habitante, ao passo que na região amazônica, esse consumo aumenta, com destaque para as comunidades ribeirinhas, chegando próximo dos 150 kg por pessoa ao ano. Portanto, é evidente que tais comunidades estão mais expostas ao risco de contaminação por mercúrio. De acordo com Gomes (2020), vários estudos relataram que amostras de cabelo de populações

ribeirinhas apresentavam concentrações de mercúrio, quase todas acima da concentração segura estabelecido pela OMS (Organização Mundial da Saúde).

Apesar dos sérios problemas de saúde provocados pelo uso descontrolado do mercúrio na mineração artesanal de ouro, poucos são os estudos de riscos à saúde humana e ao meio ambiente nas regiões do garimpo, em especial à região Norte do Brasil (GOMES et. al., 2023). Consequentemente, são praticamente inexistentes os procedimentos de redução, eliminação ou controle dos riscos à saúde e ao meio ambiente, provocados pela contaminação de mercúrio na região Norte do Brasil.

5.2. Bases legais da mineração

A primeira legislação brasileira que trata do tema mineração surgiu em 1940, através do Decreto-lei 1.985, de 29 de janeiro de 1940, o qual estabelece o Código de Minas, que define os direitos sobre as jazidas e minas. O código estabeleceu que os recursos minerários são de propriedade da União e, portanto, para sua exploração, seria necessária autorização de pesquisa e posteriormente de lavra, concedido pela União através do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), órgão responsável por regular e fiscalizar a atividade mineradora no Brasil

No entanto, o Código de Minas em seu Artigo 62º estabelecia que “são livres os trabalhos do gênero da faiscação do ouro aluvionar e garimpagem de diamantes em terras e águas de domínio público”. O Código definiu ainda a garimpagem, faiscação ou cata como:

- Garimpagem: o trabalho individual de quem utilize instrumentos rudimentares, aparelhos manuais ou máquinas simples e portáteis, na extração de pedras preciosas, semi-preciosas e minerais metálicos ou não metálicos, valiosos, em depósitos de eluvião ou aluvião, nos álveos de cursos d’água ou nas margens reservadas, bem como nos depósitos secundários ou chapadas (grupiaras), vertentes e altos de morros; depósitos esses genericamente denominados garimpos;
- Faiscação: o trabalho individual de quem utilize instrumentos rudimentares, aparelhos manuais ou máquinas simples e portáteis, na extração de metais nobres nativos em depósitos de eluvião ou aluvião, fluviais ou marinhos, depósitos esses genericamente denominadas faisqueiras;
- Cata: o trabalho individual de quem faça, por processos equiparáveis aos de garimpagem e faiscação, na parte decomposta dos afloramentos dos filões e veeiros, a extração de

substâncias minerais úteis, sem o emprego de explosivos, e as apure por processos rudimentares.

Em 1967, o Código de Minas tem seu texto alterado pelo Decreto-lei 227, de 28 de Fevereiro de 1967. Dentre outras alterações, o código estabelece que o aproveitamento definido e caracterizado como garimpagem, fискаção ou cata deveria ser realizado pelo regime de matrícula, no qual cada garimpeiro teria a autorização de aproveitamento registrada em matrícula pessoal, que deveria ser renovada anualmente.

Em 1989, o Código de Minas passa por nova alteração, através da lei nº 7.805, de 18 de julho de 1989, criando o regime de permissão de lavra garimpeira e extinguindo o regime de matrícula. A partir daí, o garimpeiro passa a necessitar de solicitação de permissão de lavra. Além disso, o Artigo 3º da lei estabelece que a permissão de lavra garimpeira passa a depender de prévio licenciamento ambiental, concedido pelo órgão ambiental competente.

Em resumo, a mineração garimpeira passa por três períodos no Brasil. O primeiro de ausência de necessidade de solicitação de autorização para a atividade garimpeira. O segundo, no qual o garimpeiro era obrigado a possuir uma matrícula, renovável a cada ano, na qual constava a autorização da atividade garimpeira. E o terceiro, e mais recente, que exige que o garimpeiro tenha uma permissão de lavra, sendo necessário um licenciamento ambiental prévio da atividade.

O Licenciamento Ambiental, por sua vez, fora estabelecido em 1997 através da Resolução CONAMA 237, de 19 de Dezembro de 1997, que dispõe sobre os procedimentos e critérios adotados para o licenciamento ambiental no Brasil. Conforme definição estabelecida no Art. 1º inciso I o Licenciamento Ambiental é:

Procedimento administrativo pelo qual o órgão ambiental competente licencia a localização, instalação, ampliação e a operação de empreendimentos e atividades utilizadoras de recursos ambientais, consideradas efetiva ou potencialmente poluidoras ou daquelas que, sob qualquer forma, possam causar degradação ambiental, considerando as disposições legais e regulamentares e as normas técnicas aplicáveis ao caso.

No anexo 1 da CONAMA 237/1997 são estabelecidas as atividades ou empreendimentos que devem ser sujeitos ao licenciamento ambiental, sendo a extração e tratamento mineral listada em primeiro. Neste sentido, a CONAMA 237/1997 representa um marco legal no Brasil para a mineração.

Os requisitos legais para obtenção de uma licença ambiental para garimpo de ouro podem variar de acordo com a legislação específica de cada estado ou município, bem como as características do empreendimento e o potencial de impacto ambiental da atividade. No entanto, de maneira geral, os principais requisitos costumam incluir:

- Regularização ambiental: O interessado deve estar regularizado junto aos órgãos ambientais competentes, como a Secretaria de Meio Ambiente estadual ou municipal, e possuir todos os documentos e registros necessários para operar legalmente.
- Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e Relatório de Impacto Ambiental (RIMA): Para empreendimentos de maior porte ou com potencial significativo de impacto ambiental, pode ser exigida a elaboração de um Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e seu respectivo Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), que avaliam os possíveis impactos da atividade sobre o meio ambiente e propõem medidas de mitigação. No caso da mineração artesanal estudos mais simplificados podem ser exigidos pelos órgãos, a depender dos impactos avaliados.
- Plano de Controle Ambiental (PCA): O Plano de Controle Ambiental (PCA) é um documento técnico que detalha as medidas preventivas, corretivas e mitigadoras que serão adotadas para minimizar os impactos ambientais causados pela atividade de garimpo de ouro.
- Plano de fechamento de mina: após exaurido o minério da cava explorada, a mesma necessita de um plano de fechamento de mina

Finalmente, em 2009, é criada a Resolução CONAMA 420, de 28 de dezembro de 2009, outro marco na legislação ambiental brasileira, já que estabeleceu diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas em decorrência de atividades antrópicas. Essa resolução estabelece diretrizes para eliminar o perigo ou reduzir o risco à saúde humana; eliminar ou minimizar os riscos ao meio ambiente; evitar danos aos demais bens a proteger; evitar danos ao bem estar público durante a execução de ações para reabilitação; e possibilitar o uso declarado ou futuro da área, observando o planejamento de uso e ocupação do solo.

Não obstante, a CONAMA 420 ainda estabelece a Avaliação de Risco para a saúde humana, processo sistemático e científico que tem como objetivo identificar, caracterizar e quantificar os riscos à saúde associados à exposição a determinados agentes químicos, físicos ou biológicos presentes no ambiente.

Neste sentido, a Resolução CONAMA 420 é fundamental para orientar as ações de controle e monitoramento da qualidade do solo e águas subterrâneas, contribuindo para a prevenção,

identificação e remediação de áreas contaminadas por substâncias químicas resultantes de atividades antrópicas.

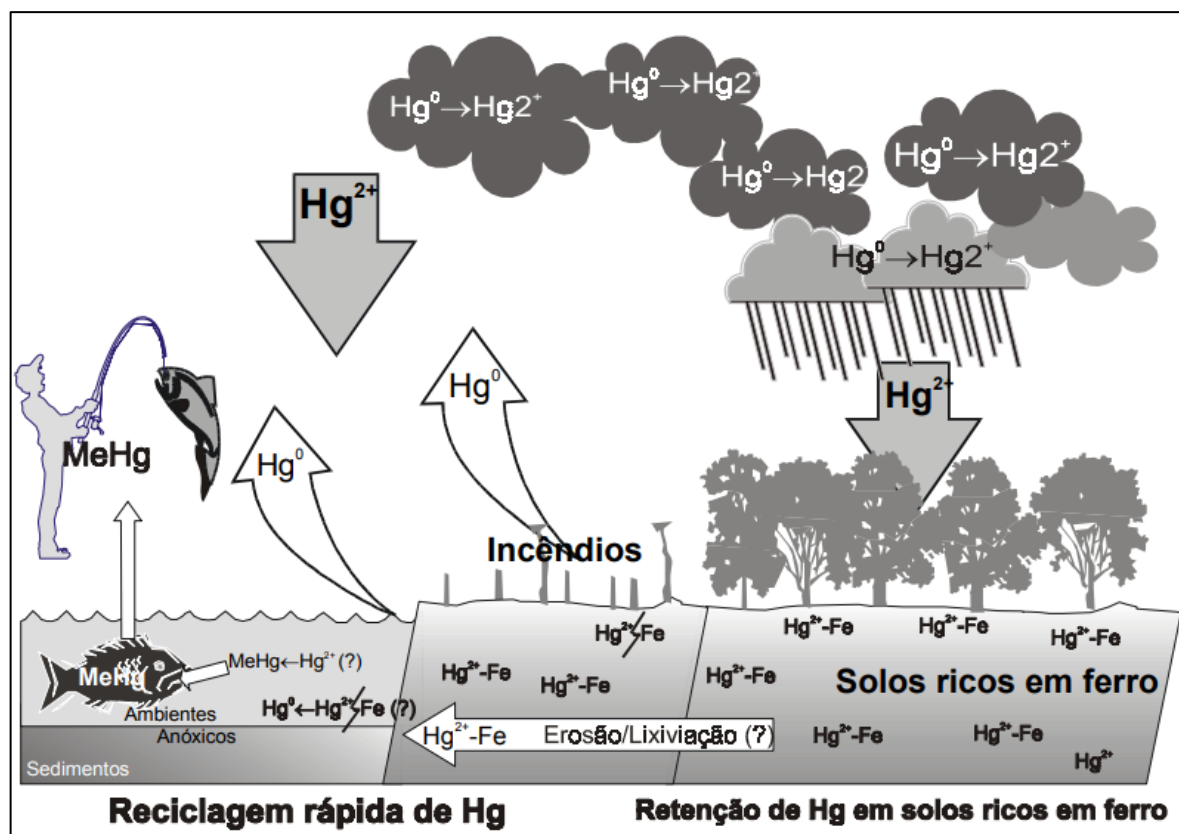
5.3. O ciclo biogeoquímico do mercúrio e sua toxicidade

O ciclo biogeoquímico do mercúrio é um dos mais complexos que ocorrem na natureza. Seja por fontes naturais, como as atividades vulcânicas, ou introduzidos no ambiente pela atividade humana, como no garimpo do ouro, o mercúrio possui a capacidade de se dispersar para a atmosfera, água e solo (WASSERMAN et. al., 2001), conforme apresentado abaixo:

- Emissão atmosférica: por apresentar uma baixa pressão de vapor, o mercúrio tende a ser emitido para a atmosfera na forma elementar (Hg^0) e ao se oxidar assume a forma iônica de Hg^{2+} . Na forma iônica o mercúrio é facilmente depositado no solo por meio de processos atmosféricos (precipitações, poeiras, deposição seca).
- Deposição e acúmulo no solo: ao ser liberado para o solo, especialmente em ambientes de climas tropicais, como é o caso da região amazônica, o mercúrio tende a se ligar com ferro e hidróxidos de alumínio, acumulando-se no solo e posteriormente sendo carregados para ambientes aquáticos, por meio da erosão e lixiviação (MORENO et. al., 2009).
- Ambientes aquáticos: nos ambientes aquáticos, o mercúrio forma complexos com constituintes orgânicos dissolvidos e pode ser transportado por longas distâncias, contribuindo para sua disseminação. Uma vez na água, o mercúrio na forma iônica pode ser convertido em qualquer das suas formas podendo ser reintroduzidos à atmosfera, água ou solo.

A **Figura 5** ilustra o ciclo biogeoquímico em ambientes de clima tropicais.

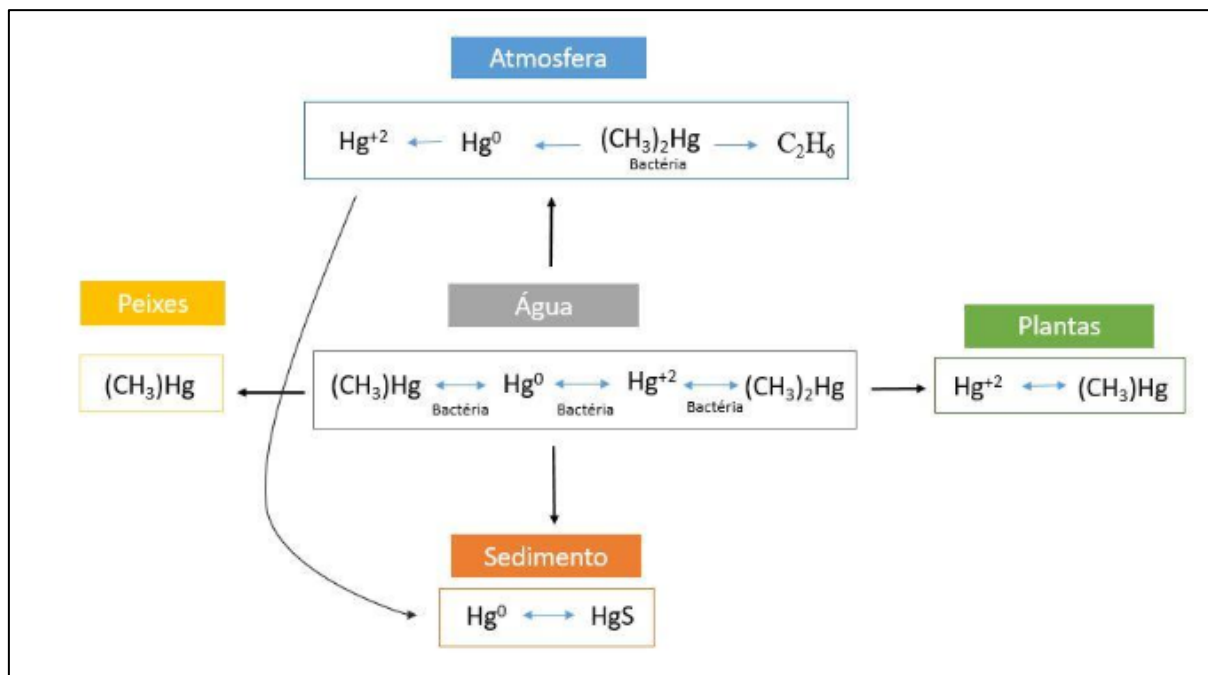
Figura 5 – Ciclo biogeoquímico do mercúrio.



Fonte: WASSERMAN et. al., 2001

As formas iônicas e elementares do mercúrio, conforme apresentado por Wasserman (2001), não apresentam alta toxicidade. O problema ocorre quando o mercúrio iônico passa por um processo de biotransformação, no qual bactérias específicas de ambientes anóxicos, o convertem em metil-mercúrio (CH_3Hg), através de um processo metabólico de defesas das bactérias para detoxicação. A partir daí, o metil-mercúrio é altamente tóxico e capaz de se bioacumular nos tecidos dos organismos à medida que passa por sucessivos níveis tróficos (NASCIMENTO, 2024). A **Figura 6** representa as reações químicas pelas quais o mercúrio passa até ser convertido em metil-mercúrio.

Figura 6 – Representação das reações químicas para formação do Metil-mercúrio.



Fonte: PONTES, 2017.

Os problemas da exposição ao metil-mercúrio no organismo humano, conforme já apresentado no item 5.1, vão desde danos irreversíveis ao sistema nervoso central, perda de visão periférica, comprometimento da coordenação motora, fraqueza muscular e deficiência de fala. A principal fonte de exposição humana ao metil-mercúrio é através do consumo de peixes e outros organismos contaminados.

Portanto, fica claro que a exposição ao mercúrio impõe sérios problemas de saúde pública, especialmente para as populações ribeirinhas da região norte do Brasil, mais vulneráveis por dependerem diretamente do consumo de pescado na região. De acordo com Junior et. al. (2023), diversos autores realizaram estudos que evidenciaram:

(...) elevada concentração de Hg na bacia do rio Madeira, tanto em algumas espécies de peixes quanto na sua população ribeirinha, que apresentam níveis de concentração deste metal acima dos valores máximos permitidos segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS) e a Agência Brasileira de Vigilância Sanitária (ANVISA), que corresponde a 7,0 mg/kg no cabelo e 10,0 µg/L no sangue e urina (WHO, 2008)

Não obstante, Junior et. al. (2023) informa que entre 60 e 100% do mercúrio total encontrado no pescado Amazônico está na forma de metil-mercúrio, com média de aproximadamente 79% na região do Alto/Médio rio Madeira.

No entanto, apesar dos seus impactos ambientais, poucos são os estudos de avaliação de riscos à saúde humana e ao meio ambiente nas regiões do garimpo (Gomes et. al., 2023). Neste sentido, é evidente a necessidade de investigações ambientais (por exemplo investigação detalhada e avaliação de risco à saúde humana e ao meio ambiente) de forma a subsidiar a tomada de decisão para ações de intervenção pelo poder público em sítios de mineração artesanal do ouro desativados/abandonados visando mitigar ou reduzir o risco à saúde humana e ao ecossistema, principalmente no entorno de cavas abandonadas. Políticas públicas e fiscalização mais eficientes, que inibam o uso ilegal do mercúrio no garimpo de ouro, também são importantes para a sustentabilidade da atividade na região.

Cabe ressaltar que o garimpo artesanal não é uma atividade ilegal no Brasil. De acordo com Veiga et. al. (2002), em 1990, cerca de 1,6 milhão de pessoas dependiam da mineração artesanal na América Latina. Conforme apresentado no Capítulo 5.2, a mineração artesanal possui suas bases legais no Brasil, às quais autorizam a mineração artesanal.

5.4. A Convenção de Minamata

Os primeiros problemas de saúde provocados pela contaminação por metil-mercúrio foram percebidos por volta de 1950, quando habitantes da cidade de Minamata, no Japão, começaram a apresentar fortes sintomas de convulsões, surtos de psicose, perda de consciência e febre (OMS, 2021.). A princípio, não se conhecia a causa do surgimento desses sintomas. De acordo com a OMS (2021):

Cerca de 5.000 pessoas foram atingidas. Além das vítimas que ficaram com sequelas graves, estima-se que o número de mortos tenha chegado a 900 pessoas. Minamata ficou conhecido como um dos maiores desastres ambientais do planeta.

Em 1956 descobriu-se que os casos foram provocados devido ao consumo de peixes da baía de Minamata contaminados por metil-mercúrio, o qual fora introduzido ao ecossistema por uma empresa de produção de PVC, que utilizava o mercúrio em seu processo de produção e realizava o descarte indiscriminado dos resíduos (OMS, 2021).

O desastre tomou tamanha proporção que em 2013, décadas depois, a cidade de Kumamoto, também no Japão, sediou a Conferência Diplomática para a assinatura da Convenção de Minamata sobre Mercúrio, envolvendo 140 países no âmbito do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), incluindo o Brasil. No entanto, no Brasil, a Convenção só seria promulgada em 2018 (OMS, 2021)

Apesar de a convenção impor metas de redução da utilização do mercúrio ao Brasil, até 2020, muitas atividades de mineração de ouro ainda utilizam da substância. De acordo com a OMS (2021), uma carga de cerca de 1,7 tonelada de mercúrio foi interceptada em 2018, a qual seria revendida para empresa supostamente fantasma na região de Cuiabá/MT.

5.5. Tecnologias inovadoras na remediação de ambientes contaminados pelo mercúrio

A remediação de ambientes contaminados pelo mercúrio é desafiadora devido a complexidade geoquímica desse elemento, principalmente devido ao seu potencial de volatilização para a atmosfera e da capacidade de biotransformação em metil-mercúrio e de sua biomagnificação na cadeia trófica. Nesse sentido, as tecnologias convencionais de remediação são muito custosas e questionáveis no longo prazo. Por exemplo, as técnicas de remediação *ex-situ* como a escavação, a separação física e tratamentos hidrometalúrgicos são custosos, especialmente se a contaminação por mercúrio ocorrer em grandes áreas, ou mesmo abaixo do nível d'água subterrâneo.

O tratamento térmico (aquecimento do solo combinado com extração de vapores do solo), por sua vez, pode ser eficaz para a remoção de mercúrio em meios sólidos, mas é tecnicamente complicado e caro. Além disso, o aquecimento do solo libera mercúrio como vapor para o meio ambiente e pode ter efeitos deletérios nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (Meagher et al., 2000).

A estabilização química, extração eletrolítica e lixiviação química, embora caras, têm se mostrado eficazes na limpeza de meios contaminados por mercúrio (Hinton et al., 2001). Outros métodos, como o uso de revestimentos plásticos impermeáveis e o enterramento de contaminantes, apenas adiam a limpeza para uma data posterior (Meagher et al., 2000).

Essa seção descreve tecnologias inovadoras para a remediação do mercúrio em solos e águas superficiais e subterrâneas que poderão, no futuro, ser utilizadas para remover a massa ou conter a dispersão do mercúrio em ambientes a contribuir para reduzir ou eliminar os riscos à saúde humana e ao meio ambiente.

5.5.1. Fitorremediação

De acordo com Gatliff (2016), a fitorremediação é uma técnica cuja aplicação iniciou-se na década de 1990. Na definição do autor, trata-se de uma técnica que se aproveita das propriedades das plantas para degradar, extrair, conter ou imobilizar contaminantes do solo e da água subterrânea, promovendo assim a remediação da área contaminada.

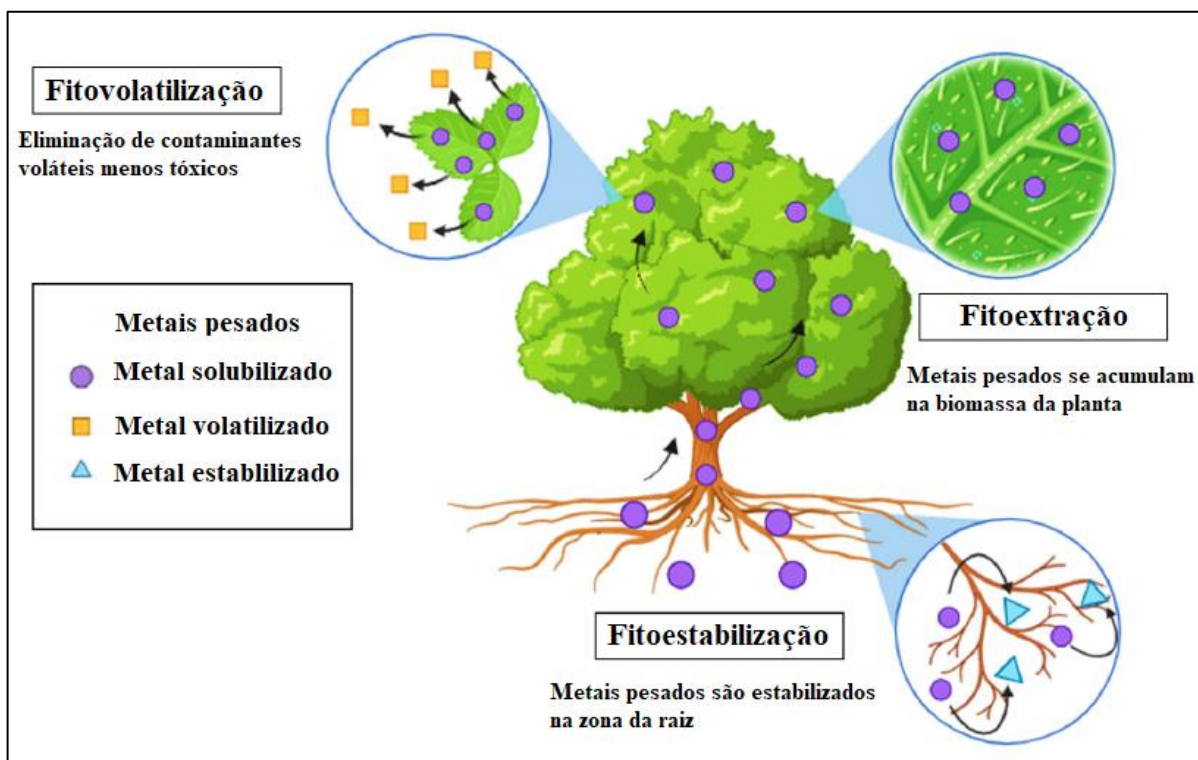
A fitorremediação pode ser empregada na remediação de solos e água subterrânea contaminadas por hidrocarbonetos, compostos clorados e nitroaromáticos (contaminantes orgânicos), metais pesados, metalóides, radionuclídeos e sais (MORENO, et. al., 2009).

De acordo com Montreemuk (2023), existem três processos possíveis para a fitorremediação de solos contaminados por metais pesados, conforme apresentado abaixo:

- Fitoextração – também conhecida como fitoacumulação, é um processo de deslocamento do metal pesado do solo ou água para estruturas do tecido celular das plantas, como membrana celular, parede celular, vacúolos dentre outras estruturas, visando a sua remoção do meio contaminado.
- Fitoestabilização – processo de imobilização dos metais pesados nas estruturas rizóferas das plantas minimizando, portanto, a mobilidade dos metais na água subterrânea e sua biodisponibilidade.
- Fitovolatilização – trata-se da acumulação de metais pesados nas folhas das plantas, onde são transformados em substâncias voláteis menos nocivas e posteriormente liberadas para a atmosfera através da evapotranspiração.

A **Figura 7** ilustra os processos de fitorremediação citados acima:

Figura 7 – Mecanismos de fitorremediação de metais pesados



Fonte: Adaptado de Montreemuk et. al. (2023)

No entanto, não são todas as plantas capazes de remediar os ambientes contaminados por metais pesados. Sitarska et. al. (2023) citam, por exemplo, que os metais pesados, como é o caso do mercúrio, exercem um efeito prejudicial na estrutura e funcionamento das plantas, devido à acumulação nos tecidos, afetando a capacidade de absorção de nutrientes e a síntese dos pigmentos necessários para a assimilação. Morita (2022) cita as seguintes plantas mais comuns utilizadas na fitorremediação: girassol, alfalfa, erva sal, salicórnia, álamos, salgueiro, lentilha-de-água, cairuçu, juncos, bambus, dentre outros, cada qual com suas aplicações e características específicas.

Já Sitarska et. al. (2023), demonstraram que as espécies *Lemna minor*, reconhecida como uma espécie hiperacumuladora de metais pesados e *Salvinia natans*, menos conhecida por sua capacidade de acumulação, conseguem realizar com êxito a fitorremediação de mercúrio em ambientes aquáticos. Ambas as espécies vegetais demonstraram notável resistência ao mercúrio presente no ambiente aquático, suportando concentrações de até 0,30 mgHg/dm³. Além disso, o estudo demonstrou que a remoção de mercúrio variou entre 68 a 94% para *Lemna minor* e 61-91% para *Salvinia natans*. No entanto, ao cultivar ambas espécies em conjunto, a remoção do mercúrio variou entre 82 e 96%, sugerindo boa sinergia entre as espécies.

Apesar de promissora, por apresentar relativos baixos custos de investimento, agregar benefícios ecológicos ao ambiente e ter boa aceitação por parte da população, a técnica leva muito tempo para a conclusão do processo de remediação (LIU et. al., 2018). Além disso, a técnica é mais adequada para áreas cuja a contaminação é mais superficial, sendo pouco eficaz em contaminações mais profundas, dadas as limitações das raízes das espécies remediadoras.

5.5.2. Imobilização por carvão orgânico (*biochar*)

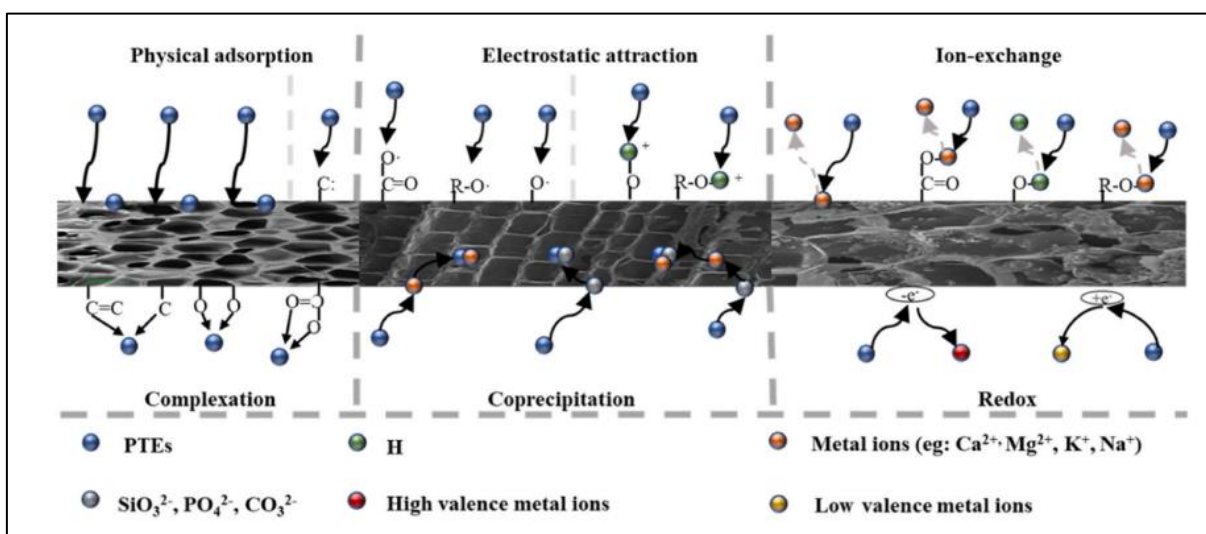
Outra tecnologia que vem ganhando destaque na remediação de contaminação de solo e águas subterrâneas por mercúrio é a imobilização em carvão orgânico (*biochar*). De acordo com Abhishek (2022), o *Biochar* é um tipo de carvão produzido em ambiente anóxico, por meio de rotas termoquímicas, como pirólise, gaseificação e carbonização hidrotérmica. Dentre suas características o *biochar* apresenta estrutura altamente porosa, proporcionando grande superfície de contato e forte capacidade de adsorção (ABHISHEK, 2022). Tais características tornam o *biochar* um ótimo produto para remediação de áreas contaminadas por metais pesados, como o mercúrio.

O princípio do *biochar* está na diminuição da biodisponibilidade do mercúrio no solo ao promover a sua imobilização, que pode ocorrer por meio de adsorção química (i.e. precipitação e troca iônica) como da adsorção física (adsorção nos poros ativados). Conforme apresenta Gao (2023), o *biochar* pode ser preparado a partir de madeira, palha e outras matérias orgânicas. Além disso, o *biochar* possui taxas de imobilização de metais pesados que superam as dos minerais argilosos, óxidos metálicos e fosfatos, comumente usados na imobilização de metais pesados (GAO, 2023).

De acordo com Rizwan (2024), o *biochar* pode ser combinado com outras substâncias capazes de aumentar a quantidade de sítios ativos para a imobilização de metais pesados específicos. Em outras palavras, o melhoramento do *biochar* pode torna-lo seletivo para a adsorção de determinados metais pesados de interesse. Estudos indicam que o *biochar* é capaz de remediar o mercúrio principalmente através de interações superficiais com íons metálicos via troca iônica e complexação com grupos funcionais como COOH, OH, -SH, NH₂ e R-OH. As interações químicas entre o mercúrio e os mencionados grupos funcionais envolvem quimissorção, quelação, atração eletrostática e troca iônica (RIZWAN, 2024). Já os processos que envolvem adsorção física dependem de fatores como a superfície específica de contato, a energia de superfície e o volume dos poros do *biochar*. A **Figura 8** ilustra um diagrama

esquemático da interação entre o *biochar* e elementos potencialmente tóxicos presentes no solo e águas subterrâneas.

Figura 8 – Diagrama esquemático da interação entre biochar e contaminantes..



Fonte: Wu et. al. (2024)

Apesar de promissora, a remediação de áreas contaminadas por *biochar* apresenta dois grandes desafios, conforme informa Rizwan et. al. (2024). O primeiro é que metais em solos contaminados precisam estar na forma de de oxiânions (íon poliatômico carregado negativamente que contém oxido) ou de metais catiônicos, ou seja a remediação pode demandar adição de químicos. O segundo é que com o envelhecimento do *biochar*, micro e nanopartículas contendo metais podem migrar no perfil do solo e contaminar a água subterrânea e, de acordo com o autor, não existe uma solução efetiva para o problema. Neste sentido, Rizwan et. al. (2024) sugere que mais estudos referentes a tecnologia em questão são necessários.

5.5.3. Nanotecnologia

A nanotecnologia é uma área multidisciplinar que envolve a manipulação e o controle de materiais em uma escala nanométrica (10^{-9} m). Apesar de muitos autores considerarem Richard Feynman como o pai da nanotecnologia por propor, na segunda metade do século XX, a possibilidade de manipular átomos e moléculas individualmente, Rafique et. al. (2020) citam que há registros do emprego da nanotecnologia desde o século XV, quando Paracelsus, usou nanopartículas de ouro para tratar pacientes de diversas enfermidades.

O desenvolvimento da tecnologia trouxe avanços significativos na síntese e manipulação de materiais nanométricos, de modo que novas aplicações passaram a existir na medicina,

eletrônica, computação quântica, engenharia, dentre outras. Na área ambiental não foi diferente. De acordo com Liu et. al. (2022), a nanotecnologia vem ganhando força na remediação de solos e águas contaminados por metais pesados, devido às características dos nanomateriais como grande área superficial, alta capacidade de adsorção, taxa de difusão rápida, funcionalidades de superfície ajustáveis e significativa reatividade química. O autor cita como exemplo a remoção de mercúrio divalente por nanopartículas magnéticas revestidas com prata nanométrica e funcionalizado com 1-mercaptopetano sódico sulfonato com uma eficiência de 100% de remoção em apenas 30 segundos.

Outra vantagem dos nanomateriais é que eles podem ser empregados em aplicações que envolvem interações de água e gás, através dos pequenos poros do solo, possibilitando o tratamento de solos mais finos (ALI et. al., 2023).

De acordo com Ali et. al. (2023), os mecanismos de remediação de áreas contaminadas com o emprego da nanotecnologia envolvem seis princípios, conforme apresentado na **Figura 9**.

Figura 9 – Mecanismos da nanoremediação para tratamento de áreas contaminadas.



Fonte: adaptado de Ali et. al. (2023)

Ali et. al. (2023) informam que dentre os princípios apresentados na **Figura 9**, os mais indicados para a remoção de metais pesados são:

- Adsorção: capaz de remediar efluentes contaminados por metais pesados, devido a sua fácil implementação, flexibilidade e possibilidade de recuperação dos metais pesados após o processo de remediação.
- Precipitação química: através da reação química de metais pesados presentes na água, fazendo com que os mesmos se precipitem e sedimentem, facilitando sua posterior separação da água.
- Filtração: a microfiltração, ultrafiltração e osmose reversa se apresentam eficientes na remoção de metais pesados da água.
- Trocas iônicas: por se apresentar em estado iônico em fase aquosa, muitos metais pesados podem ser removidos da água através de trocas iônicas.
- Coagulação e floculação: a coagulação aglomera partículas finas, por meio de um agente coagulante e posteriormente a floculação torna essas partículas em flóculos mais facilmente sedimentáveis, facilitando portanto a separação dos flóculos da água.

A **Tabela 1** indica alguns dos nanomateriais utilizados na remediação de mercúrio e sua eficiência de remoção.

Tabela 1 – Principais nanomateriais utilizados na remoção de mercúrio.

Nanomateriais	Eficiência de Remoção (%)	Capacidade de Remoção (mg/g)	Mecanismo
Ferro zerovalente	-	80	Atividade fotocatalítica
Fe ₃ O ₄ /SiO ₂	50	17	Adsorção
Fe ₃ O ₄ /SiO ₂ /NH/CS ₂ Na	74	25	Adsorção e oxidação
α-MnO ₂ unidimensional	90	-	
γ-MnO ₂ unidimensional	70	-	
CNFs e AuNPs	91	-	Eletrolise
13.2% TiO ₂ (8,827 nm) e 86.8% TiO ₂ (10.19 nm)	-	163,9	adsorção
9.1 nm, TiO ₂ SSA > 210 m ² /g	-	101,1	adsorção
Fe ₃ O ₄ , sílica	90	-	adsorção
Nanotubos de carbono com paredes múltiplas	100	-	adsorção

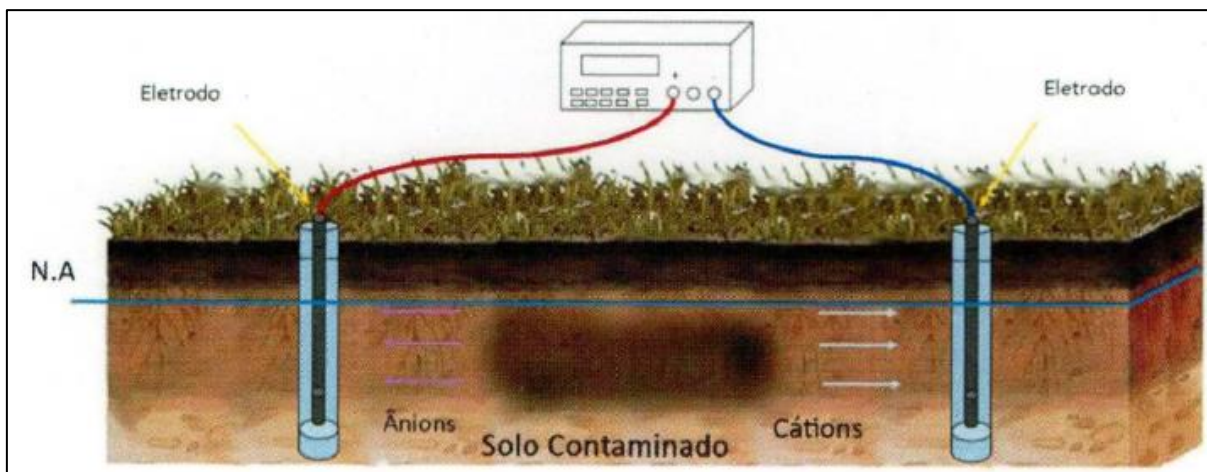
Nanomateriais	Eficiência de Remoção (%)	Capacidade de Remoção (mg/g)	Mecanismo
Nanopartículas de núcleo magnético revestidas com prata metálica e funcionalizado com sódio	80	-	adsorção
Nanopartículas de Óxido de ouro-grafeno-óxido de ferro	50	5,89	adsorção
Carvão sintético derivado de zeólitas revestida com nanopartículas de prata	<99	-	adsorção
α -Fe ₂ O ₃ magnético	98	-	adsorção
Nanopartículas de prata	99	-	adsorção
Nanopartículas de alumínio-silicato por dendrímero à base de melamina Lcisteína ésteres metílicos	-	3079	adsorção
Selênio magnético nanocompósito	99	0	adsorção
Géis de nanopartículas de ZnS	85	0	Troca catiônica

Fonte: adaptado de Liu et. al. (2022)

5.5.4. Remediação eletrocinética

A remediação eletrocinética é um método utilizado para a remediação de solos contaminados por metais pesados, como o mercúrio (WANG et. al., 2020). O processo de remediação por meio da eletrocinética se inicia com a inserção de eletrodos no solo contaminado, os quais são conectados a uma fonte de tensão contínua. Ao se aplicar uma diferença de potencial entre os eletrodos, cria-se um campo eletromagnético no solo. Os metais pesados, por apresentarem cargas elétricas em fase aquosa são atraídos ou repelidos pelo campo elétrico e tendem a migrar em direção aos eletrodos (WANG et. al., 2020). Os metais pesados com cargas positivas são atraídos pelo cátodo, ao passo que os que apresentam carga negativa, são atraídos pelo ânodo. A **Figura 10** apresenta uma ilustração esquemática da remediação eletrocinética

Figura 10 – Ilustração da remediação eletrocinética aplicada em solo



Fonte: Hypolito e Sumi, 2021

De acordo com Hypolito & Sumi (2021), a remediação por método eletrolítico apresenta a vantagem de dispensar a adição de reagentes químicos para a remoção de metais pesados em águas contaminadas. Apesar disso, alguns estudos, como mostra Wang et. al. (2020), indicam que a adição de agentes químicos, capazes de aumentar a solubilidade dos metais pesados no solo, podem ser aplicados para aumento da eficiência do processo eletrolítico.

Os íons contaminantes presentes no solo são transportados pelo campo eletromagnético através de três mecanismos, conforme apresentado abaixo (SUN et. al., 2024):

- Eletro-migração: trata-se do transporte direto de partículas eletricamente carregadas no solo. Basicamente, partículas carregadas positivamente (cátions) são atraídas pelo cátodo, enquanto partículas carregadas negativamente (ânions) são atraídas pelo ânodo. De acordo com Sun et. al. (2023), como os íons só podem migrar através da fase aquosa dos poros do solo, a velocidade da eletro-migração dependerá da dimensão dos poros do solo, da geometria das partículas de solo e da umidade do solo.
- Eletro-osmose: no geral as partículas de solo são carregadas negativamente. Quando partículas carregadas positivamente são introduzidas ao solo, elas tendem a se adsorver no mesmo, formando uma camada dielétrica. O fluxo da água em contato com a camada carregada eletricamente do solo é chamado de Eletro-osmose. Esse fluxo é o responsável por transportar os íons.
- Eletroforese: trata-se da migração de colóides carregados eletricamente, devido ao campo eletromagnético imposto. De acordo com Sun et. al. (2023), esse tipo de transporte dos íons é menos expressivo, uma vez que os colóides apresentam dimensões relativamente maiores que os poros dos solos.

De acordo com Liu et. al. (2018), a remediação eletrocinética:

(...) é mais eficaz para remediar solos saturados ou parcialmente saturados (por exemplo, teor de umidade de 15–25%), de baixa permeabilidade, baixa condutividade elétrica e textura fina, removendo as frações solúveis em água e trocáveis de contaminantes metálicos. Materiais isolantes e condutivos, como cascalhos, depósitos de minério e objetos metálicos no solo, reduzem a eficácia da extração eletrocinética. Na prática, arranjos de eletrodos inertes feitos de cerâmica, carbono, grafite, titânio, aço inoxidável ou plástico são instalados em poços cerâmicos no solo contaminado com espaçamento de 1,0–1,5 m, com corrente contínua imposta de 1,0 – 1,5 V/cm ou 100 – 500 kWh/m³.

Além disso, Liu et. al. (2018) apresentam uma estimativa de custo para a aplicação da remediação eletrocinética variando entre 26 e 295 US\$ por metro cúbico de solo contaminado.

Conforme já mencionado, alguns aditivos químicos podem ser empregados para melhorar a eficiência da remediação eletrocinética. Liu et. al. (2018) citam os seguintes aditivos químicos mais utilizados: ácido etilenodiamino-tetra-acético (EDTA), ácido etilenodiaminodissuccínico (EDDS), ácido dietilenotriamina-penta-acético (DTPA), ácido nitrilotriacético (NTA), ácido acético (CH₃COOH), ácido cítrico ((HOOC-CH₂)₂C(OH)(COOH)) e iodeto de potássio (KI).

6. CONCLUSÕES

A mineração artesanal de ouro tem sido uma fonte de subsistência para muitas comunidades, especialmente nas regiões mais remotas e menos desenvolvidas do Brasil. No entanto, os impactos ambientais e de saúde associados a essa prática são significativos. A contaminação por mercúrio, um metal pesado muito empregado na extração artesanal de ouro, representa uma séria ameaça para os ecossistemas e para a saúde humana, devido à sua capacidade de se bioacumular nos organismos e biomagnificar na cadeia alimentar, eventualmente impactando comunidades inteiras que dependem da pesca para subsistência.

No entanto, é importante ressaltar que a mineração artesanal é uma atividade que possuiu suas bases legais. A evolução da legislação brasileira relacionada à mineração, especialmente no contexto da mineração artesanal de ouro, reflete um progresso significativo em termos de regulamentação e controle ambiental. A introdução de requisitos como a matrícula de garimpeiros, a permissão de lavra garimpeira e, posteriormente, a exigência de licenciamento ambiental demonstra uma preocupação crescente com a proteção do meio ambiente e a saúde pública.

Investigações ambientais, (por exemplo, investigação detalhada e avaliação de risco à saúde humana e ao meio ambiente) nas regiões impactadas pelo mercúrio do garimpo artesanal são essenciais para subsidiar a tomada de decisão para ações de intervenção pelo poder público em sítios de mineração artesanal do ouro desativados/abandonados visando mitigar ou reduzir o risco à saúde humana, principalmente no entorno de cavas abandonadas. No entanto, nota-se que tais investigações dificilmente ocorrem na região. A ilegalidade da maioria das atividades de mineração artesanal na região norte impede a fiscalização e controle da poluição pelos órgãos ambientais, bem como exigir do causador do dano ambiental, a execução das ações preconizadas na Resolução CONAMA nº 420/2009, para o gerenciamento da área contaminada e a sua reabilitação para uso declarado.

Felizmente, há avanços significativos no desenvolvimento de tecnologias inovadoras de remediação do mercúrio, como a fitorremediação, a nanotecnologia e a remediação eletrocinética que podem contribuir para a recuperação ambiental e a proteção da saúde das comunidades afetadas pela contaminação por mercúrio. No entanto, é crucial que as mesmas sejam implementadas de forma eficaz e abrangente, em conjunto com medidas preventivas, para mitigar os danos causados pela mineração artesanal de ouro e pela contaminação por mercúrio.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABHISHEK, Kumar et al. Biochar application for greenhouse gas mitigation, contaminants immobilization and soil fertility enhancement: A state-of-the-art review. **Science of the Total Environment**, v. 853, p. 158562, 2022.
- ALI, Qasim et al. Nanoremediation for heavy metal contamination: A review. *Hybrid Advances*, p. 100091, 2023.
- Brasil. Decreto-Lei 1985 de 19 de Outubro de 1940. Aprova o Código de Minas.
- Brasil. Decreto-Lei 227 de 28 de Fevereiro de 1967. Dá nova redação ao Decreto-lei nº 1.985, de 29 de janeiro de 1940. (Código de Minas).
- Brasil. Lei 7805, de 18 de Julho de 1989. Altera o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967, cria o regime de permissão de lavra garimpeira, extingue o regime de matrícula, e dá outras providências.
- Brasil. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução CONAMA Nº 237, de 19 de Dezembro de 1997. Dispõe sobre a revisão e complementação dos procedimentos e critérios utilizados para o licenciamento ambiental
- Brasil. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). 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 por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas.
- CANARIO, Paula Giovana Grangeiro; BETTINE, Sueli do Carmo. Gerenciamento de áreas contaminadas no Brasil: Uma análise crítica. **Geosciences**, v. 39, n. 03, p. 751-764, 2020.
- OMS. Convenção de Minamata sobre o Mercúrio: bibliografia anotada de recursos da OMS [Minamata convention on mercury: annotated bibliography of WHO information]. Genebra: Organização Mundial da Saúde; 2021.
- DA COSTA, Marco Aurélio; RIOS, Francisco Javier. The gold mining industry in Brazil: A historical overview. **Ore Geology Reviews**, v. 148, p. 105005, 2022.
- FURTADO, Huana da Silva. A Garimpagem de Ouro e suas Interfaces na Amazônia Brasileira. **Revista Labirinto (UNIR)**, v. 32, p. 242-261, 2020.
- GAO, Jun et al. Organic amendments for in situ immobilization of heavy metals in soil: A review. **Chemosphere**, p. 139088, 2023.
- GATLIFF, Edward et al. Phytoremediation of soil and groundwater: economic benefits over traditional methodologies. In: **Bioremediation and Bioeconomy**. Elsevier, 2016. p. 589-608.

GOMES, Diego Ferreira et al. Dynamics of (total and methyl) mercury in sediment, fish, and crocodiles in an Amazonian Lake and risk assessment of fish consumption to the local population. **Environmental monitoring and assessment**, v. 192, p. 1-10, 2020.

GOMES, Diego Ferreira et al. Ecological risk assessment for metals in sediment and waters from the Brazilian Amazon region. **Chemosphere**, v. 345, p. 140413, 2023.

HINTON, Jennifer; VEIGA, Marcello. Mercury contaminated sites: a review of remedial solutions. In: **Proceedings of the NIMD (National Institute for Minamata Disease)**. Forum Minamata, Japan. 2001.

HYPOLITO, Raphael; SUMI, Ernesto. Remediação Eletrocinética - Novas Técnicas. **Geosciences**, v. 40, n. 3, p. 763-770, 2021.

MEAGHER, Richard B. Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants. *Current opinion in plant biology*, v. 3, n. 2, p. 153-162, 2000.

MONTE Jr., Roberto Pinto Monte et al. Riscos Potenciais à Saúde Humana e Ambiental com o uso do Mercúrio na Atividade de Garimpo Artesanal de Ouro no Alto Rio Madeira, Amazônia Ocidental. **Revista Eletrônica Acervo Saúde**, v. 23, n. 6, p. e12840-e12840, 2023.

LIU, Lianwen et al. Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability. **Science of the total environment**, v. 633, p. 206-219, 2018.

LIU, Yonghua et al. Detection and remediation of mercury contaminated environment by nanotechnology: Progress and challenges. **Environmental Pollution**, v. 293, p. 118557, 2022.

MALONE, Aaron et al. Transitional dynamics from mercury to cyanide-based processing in artisanal and small-scale gold mining: Social, economic, geochemical, and environmental considerations. **Science of the Total Environment**, v. 898, p. 165492, 2023.

MEAGHER, R. B. et al. Engineered phytoremediation of mercury pollution in soil and water using bacterial genes. In: **Phytoremediation of contaminated soil and water**. CRC Press, 2020. p. 201-219.

MONTREEMUK, Jitchanok; STEWART, Thomas Neal; PRAPAGDEE, Benjaphorn. Bacterial-assisted phytoremediation of heavy metals: Concepts, current knowledge, and future directions. **Environmental Technology & Innovation**, p. 103488, 2023.

MORENO, Fabio N; SÍGOLO, Joel B; ANDERSON, Chris W. N.; STEWART, Robert B.; MEECH, John A.; ROBINSON, Brett H. Phytoremediation of mercury-contaminated Mine wastes. **Environmental and Regional Air Pollution**, p. 141-172, 2009.

MORITA, Alice Kimie Martins; MORENO, Fabio Netto. Fitorremediação aplicada a áreas de disposição final de resíduos sólidos urbanos. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 27, p. 377-384, 2022.

NASCIMENTO, Priscila Soares. **Ciclo do Mercúrio**. Info Escola. Disponível em: < <https://www.infoescola.com/meio-ambiente/ciclo-do-mercuro/>>. Acesso em: 24 de janeiro de 2024.

PONTES, Gabriela Cugler de et al. Concentração de mercúrio em pilhas de rejeitos de estações de tratamento de água (Lagoa de Juturnaíba, Brasil-RJ). Niterói: 2017

QUEIROZ, Julia et al. Socioeconomic cost of dredge boat gold mining in the Tapajós basin, eastern Amazon. **Resources Policy**, v. 79, p. 103102, 2022.

RACHEL, Carson et al. Silent spring. Penguin Books, 1962.

RAFIQUE, Muhammad et al. History and fundamentals of nanoscience and nanotechnology. In: Nanotechnology and photocatalysis for environmental applications. Elsevier, 2020. p. 1-25.

RIZWAN, Muhammad et al. Tuning active sites on biochars for remediation of mercury-contaminated soil: A comprehensive review. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 270, p. 115916, 2024.

SANTANA, Andréia. **Pescado: saiba mais sobre os cuidados na hora da compra e consumo da proteína**. Universidade Federal Rural da Amazônia, 14 de abril de 2022.

Disponível em:

<https://novo.ufra.edu.br/index.php?option=com_content&view=article&id=3148:pescado-saiba-mais-sobre-os-cuidados-na-hora-da-compra-e-consumo-da-proteina&catid=17&Itemid=121>. Acesso em: 10 de janeiro de 2024.

SITARSKA, Magdalena et al. Phytoremediation of mercury from water by monocultures and mixed cultures pleustophytes. **Journal of Water Process Engineering**, v. 52, p. 103529, 2023.

SOUSA, Ferdinando. **A mineração do ouro e o mercúrio**. Água, Vida & Cia, 03/07/2019. Disponível em: < <https://ferdinandodesousa.com/2019/03/07/a-mineracao-do-ouro-e-o-mercuro/>>. Acesso em: 09/01/2024.

SUN, Zeying et al. Electrokinetic remediation for the removal of heavy metals in soil: Limitations, solutions and prospection. **Science of The Total Environment**, p. 165970, 2023.

SUZIGAN, W. Industrialização brasileira em perspectiva histórica. **História Econômica & História de Empresas**, v. 3, n. 2, 2012.

VEIGA, Marcello Mariz da; SILVA, Alberto Rogério Benedito da; HINTON, Jennifer J. O garimpo de ouro na Amazônia: aspectos tecnológicos, ambientais e sociais, 2002.

VEIGA, Marcello M.; MAXSON, Peter A.; HYLANDER, Lars D. Origin and consumption of mercury in small-scale gold mining. **Journal of cleaner production**, v. 14, n. 3-4, p. 436-447, 2006.

WANG, Liuwei et al. Remediation of mercury contaminated soil, water, and air: A review of emerging materials and innovative technologies. **Environment international**, v. 134, p. 105281, 2020.

WASSERMAN, Julio Cesar; HACON, Sandra S.; WASSERMAN, Maria Angélica. O ciclo do mercúrio no ambiente amazônico. **Mundo & vida**, v. 2, n. 1/2, p. 46-53, 2001.

WU, Yi et al. Biochar application for the remediation of soil contaminated with potentially toxic elements: Current situation and challenges. **Journal of Environmental Management**, v. 351, p. 119775, 2024.