



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**  
**ESCOLA DE MINAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS**



**PROCEDIMENTOS E TÉCNICAS PARA A RECUPERAÇÃO DE  
SOLOS CONTAMINADOS POR METAIS PESADOS EM ÁREAS DE  
MINERAÇÃO NO BRASIL**

**HYASINTHE EVRAD SIMIKE BOULOU**

Ouro Preto/MG

Março de 2023

HYASINTHE EVRAD SIMIKE BOULOU

**PROCEDIMENTOS E TÉCNICAS PARA A RECUPERAÇÃO DE  
SOLOS CONTAMINADOS POR METAIS PESADOS EM ÁREAS DE  
MINERAÇÃO NO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas. Área de concentração: Sustentabilidade e meio ambiente.

**Orientador:** Prof. Dr. JOSÉ FERNANDO MIRANDA  
(DEMIN/EM/UFOP)

Ouro Preto/MG  
Março de 2023

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

B764p Boulou, Hyasinthe Evrad Simiké.  
Procedimentos e técnicas para a recuperação de solos contaminados por metais pesados em áreas de mineração no Brasil. [manuscrito] / Hyasinthe Evrad Simiké Boulou. - 2023.  
54 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Miranda.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.  
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Mineração. 2. Solos - Contaminação. 3. Metais pesados. 4. Tratamento do Solo. 5. Normas técnicas. I. Miranda, José Fernando. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.88

Bibliotecário(a) Responsável: Soraya Fernanda Ferreira e Souza- SIAPE: 1.763.787



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
REITORIA  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



## FOLHA DE APROVAÇÃO

Hyasinthe Evrad Simike Boulou

Procedimentos e Técnicas Para a Recuperação de Solos Contaminados por Metais Pesados em Áreas de Mineração, no Brasil.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas

Aprovada em 06 de março de 2023

### Membros da banca

Dr. - José Fernando Miranda - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)

Dr<sup>a</sup> - Lia de Mendonça Porto - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Dr - Hernani Mota de Lima - Universidade Federal de Ouro Preto

José Fernando Miranda, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 24/04/2023



Documento assinado eletronicamente por **Jose Fernando Miranda, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 24/04/2023, às 14:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0513957** e o código CRC **186142A9**.

## **AGRADECIMENTOS**

Dedico esse trabalho a meus ancestrais, meus pais Maryam Abaga, Mamma e Joseph Boulou Nguizi, a todos os membros do meu grupo familiar, a Minso Biloa Christine, mãe da minha querida filha Woudnang, a Wendy Andrade, por todo apoio que deles recebi durante todo esse tempo de estudos.

Agradeço a meu Professor orientador José Fernando Miranda por me acompanhar nessa caminhada e pela sua paciência, agradeço a meu Professor Hernani Mota de Lima, a minha Professora Rosa Malena Fernandes Lima e a meu Professor Paulo Henrique Vieira Magalhães por estarem ao meu lado quando precisava de ajuda e pelas dicas.

Agradeço a todos meus amigos pela solidariedade, pela amizade, pelos bons momentos, pelo apoio moral e psicológico, enfim por sempre estarem comigo em qualquer situação.

Agradeço a esse país de adoção, o Brasil, por me acolher e me dar todas as oportunidades para eu poder me formar numa das instituições universitárias mais refinadas do país, a Universidade Federal de Ouro Preto e sua gloriosa Escola de Minas.

## RESUMO

A contaminação de solos por metais pesados pode ser oriunda de processos de mineração inerentes à extração de minérios sulfetados ou de minérios associados aos sulfetos, quanto no descarte de resíduos tanto na lavra – estéreis, bem como do beneficiamento – rejeitos, os quais contém metais pesados. Estes elementos químicos apresentam uma densidade relativamente alta, sendo considerados tóxicos, mesmo em concentrações baixas. A recuperação e/ou a neutralização desses elementos minerais, vêm preocupando a sociedade e os governos devido à contaminação ambiental causada em áreas de mineração, Isso levou à adoção de normas reguladoras mais rígidas, a fim de incentivar e promover a sustentabilidade dos processos produtivos industriais e de extração destes bens minerais. O objetivo deste trabalho é fazer uma avaliação das principais tecnologias de remediação para recuperação de solos contaminados com metais pesados em áreas de mineração no Brasil. Baseando-se na literatura existente, são apresentados os conceitos relacionados à contaminação de solos por metais pesados, as principais causas dessa contaminação em área de mineração, suas implicações, a rota de gerenciamento e as diferentes técnicas de remediação aplicadas para essa área. O estudo mostrou que uma caracterização bem-sucedida de áreas contaminadas por metais pesados permite a elaboração de um plano eficiente de recuperação, com a aplicação das técnicas de remediação adequada.

**Palavras-chave:** Contaminação, metais pesados, normas reguladoras, sustentabilidade, mineração, técnicas, recuperação.

## Abstract

Contamination of soils by heavy metals can come from mining processes inherent to the extraction of sulfide ores or ores associated with sulfides, as well as from the disposal of waste both from mining – sterile, and from processing – tailings, containing heavy metals. These chemical elements have a relatively high density and can be considered toxic, even at low concentrations. The recovery and/or neutralization of these mineral elements has been worrying society and governments due to the environmental contamination caused in mining areas and this has led to the adoption of stricter regulatory standards in order to encourage and promote the sustainability of industrial production processes and extraction of these mineral goods. The purpose of this study is to evaluate the main remediation technologies for the recovery of soils contaminated with heavy metal in mining areas in Brazil. Based on the existing literature, concepts related to soil contamination by heavy metals are presented, the main causes of this contamination in the mining area, its implications and the different remediation techniques applied to this area. The study showed that a successful characterization of areas contaminated by heavy metals allows the elaboration of an efficient recovery plan, with the application of appropriate remediation techniques.

**Keywords:** contamination, heavy metals, regulatory standards, sustainability, mining, techniques, recovery.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Estimativa de áreas contaminadas no Brasil	11
<b>Figura 2:</b> Origem da Contaminação das Áreas Contaminadas no Brasil	11
<b>Figura 3:</b> Impactos de contaminantes e resíduos devido à mineração/Fundição	14
<b>Figura 4:</b> Fluxograma do gerenciamento das áreas contaminadas	30
<b>Figura 5:</b> Etapas do Gerenciamento de Áreas Contaminadas (GAC)	31
<b>Figura 6:</b> Estação de tratamento das águas ácidas oriundas da DAM do CIPC	34
<b>Figura 7:</b> Localização da Bacia Carbonífera de Santa Catarina	35
<b>Figura 8:</b> Representação esquemática do processo de lavagem de solos contaminados	37
<b>Figura 9:</b> Os principais processos relacionados com as técnicas de fitorremediação	41
<b>Figura 10:</b> Estrutura básica de um cogumelo	43
<b>Figura 11:</b> Alguns exemplos de bioacumuladores	45

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Alguns metais pesados e seus efeitos nocivos sobre a saúde	20
<b>Tabela 2:</b> Valores Orientadores para solos e água subterrânea no Estado de São Paulo	23
<b>Tabela 3:</b> Valores Orientadores para solos e água subterrânea no Estado de Minas Gerais	24
<b>Tabela 4:</b> Algumas bactérias e suas respostas respectivas a metais pesados	42
<b>Tabela 5:</b> Fungos e suas respostas a metais pesados	44

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- Ag – Prata (*argentum*)
- Al – Alumínio (*alumen*)
- ANM – Agência Nacional de Mineração
- As – Arsênio (*arsenicum*)
- Cd – Cádmio (*cadmium*)
- CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
- Co – Cobalto (*cobaltum*)
- CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente
- COPAM – Conselho Estadual de Política Ambiental
- Cr – Cromo (*chromium*)
- Cu – Cobre (*cuprum*)
- DAM – Drenagem Ácida de Mina
- DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral
- FEAM – Fundação Estadual de Meio Ambiente
- Hg – Mercúrio (*hydrargyrum*)
- Mg – Magnésio (*magnesium*)
- Mn – Manganês (*manganum*)
- Mo – Molibdênio (*molybdenum*)
- Ni – Níquel (*niccolum*)
- NRM – Normas Reguladoras de Mineração
- ONU – Organização das Nações Unidas
- Pb – Chumbo (*plumbum*)
- PFM – Plano de Fechamento de Minas
- PRAD – Plano de Recuperação das Áreas Degradadas
- Sb – Antimônio (*stibium*)
- Se – Selênio (*selenium*)
- Sn – Estanho (*stannum*)
- Sr – Estrôncio (*strontium*)
- Te – Telúrio (*tellurium*)
- V – Vanádio (*vanadium*)
- Zn – Zinco (*zincum*)

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	9
1.1. APRESENTAÇÃO	9
<b>2. OBJETIVOS</b>	12
2.1. OBJETIVO PRINCIPAL	12
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	13
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	13
3.2. A DEGRADAÇÃO AMBIENTAL PELA MINERAÇÃO, LEGISLAÇÃO BRASILEIRA PARA AS ÁREAS DEGRADADAS	14
3.3. CONTAMINAÇÕES DE SOLOS PELA MINERAÇÃO	17
3.3.1. METAIS PESADOS	19
3.3.2. CONTAMINAÇÃO DE SOLOS POR METAIS PESADOS DECORRENTES DA MINERAÇÃO	20
3.3.3 VALORES DE REFERÊNCIAS DE METAIS PESADOS ACEITÁVEIS	22
<b>4. ROTA DE GERENCIAMENTO DE SOLOS CONTAMINADOS POR METAIS PESADOS EM ÁREA DE MINERAÇÃO</b>	25
4.1. PROCESSOS DE IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS CONTAMINADAS	26
4.2. PROCESSOS DE REABILITAÇÃO DE ÁREAS CONTAMINADAS	27
<b>5. PROCEDIMENTOS E TÉCNICAS DE RECUPERAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS POR METAIS PESADOS EM ÁREA DE MINERAÇÃO</b>	32
5.1. TÉCNICAS DE REMEDIAÇÕES CONVENCIONAIS	32
5.2. TÉCNICAS DE REMEDIAÇÕES BIOLÓGICAS	38
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	46
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	48

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. APRESENTAÇÃO

Sendo uma das atividades antrópicas fornecedora de matérias primas para as indústrias de manufatura de bens de consumo diversos e, ao mesmo tempo, gerando polêmicas devido aos impactos ambientais inerentes às suas atividades, a mineração se apresenta como indispensável e necessária para a civilização desde a antiguidade até os dias atuais. Ela pode ser entendida como o conjunto de atividades econômicas e/ou processos industriais e tecnológicos que permitem explorar, extrair e processar o mineral de interesse.

Considerando as degradações ambientais antrópicas, a ONU, com o intuito de mitigar ou erradicar os danos causados pelas atividades industriais e domésticas, fixou os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, comumente conhecidos como ODS, os quais se propõe a serem atingidos até 2030 (ONU, 2015).

A mineração possui impactos transversais a diversos desses ODSs, onde suas ações podem ser positivas conforme detalhado abaixo (PNUD, 2016):

- ODS 6 - Água Potável:
  - Reciclar e/ou recuperar metais das águas residuais;
- ODS 11 - Cidades e Comunidades Sustentáveis:
  - Reaproveitar os resíduos de mineração;
  - Recuperar as áreas transformando-as para outras finalidades;
- ODS 12 - Consumo e Produção Responsáveis:
  - Minimizar a produção de rejeitos, efluentes e emissões;
- ODS 13 - Ação Contra a Mudança Global do Clima:
  - Planejar soluções para os impactos no âmbito das minas e das comunidades;
  - Fortalecer planos emergenciais de resposta.

A contaminação ambiental de um solo, decorrente das atividades de mineração pode acontecer através de vários fenômenos como, por exemplo:

- Na extração mineral de grandes extensões de terras quando da supressão de vegetação da área onde será implementada;

- Em queimadas de grandes proporções em áreas revegetadas, como pilhas de estéreis, provocando a exposição dos solos a processos erosivos e de carreamento de sedimentos para canais de drenagem. Caso estes sedimentos contenham elementos contaminantes, pode-se desencadear a contaminação;
- Na disposição de resíduos industriais diversos como substâncias químicas tóxicas como o arsênio, mercúrio, cádmio e os elementos pesados e ou contaminantes;
- Além da elaboração de produtos derivados de petróleo como as embalagens, óleos de motores ou simplesmente a gasolina e suas emissões gasosas na atmosfera etc.

Nas regulamentações brasileiras no âmbito do setor ambiental, artigo 225, § 2º da Constituição Federal de 1988, estipula-se que *“Aquele que explorar recursos minerais fica obrigado a recuperar o ambiente degradado, de acordo com a solução técnica exigida pelo órgão público competente, na forma da lei” (Brasil, 1988).*

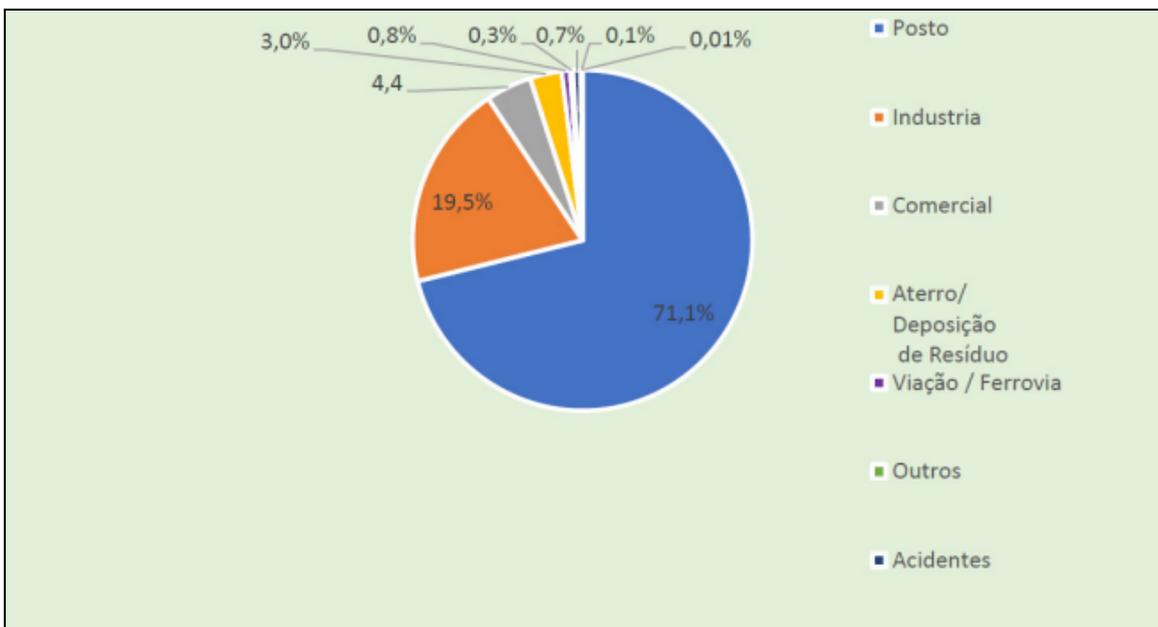
Nessa perspectiva, a contaminação de solos devido aos metais pesados em áreas de mineração acontece através da disposição e exposição de rejeitos ricos em substâncias sulfetadas em pilhas de estéril, ou em barragens de rejeitos sujeitas aos fenômenos de erosões diversas. Dessa maneira, recomenda-se fazer previamente, um levantamento dos níveis de degradação causados pelos contaminantes para depois elaborar os procedimentos e técnicas de recuperação desses solos afetados. As **Figuras 1 e 2** apresentam respectivamente a estimativa de áreas contaminadas e a origem dessa contaminação no Brasil.

**Figura SEQ Figura 1\* ARABIC 1: Estimativa de áreas contaminadas no Brasil**



Fonte: Brasil, 2020.

**Figura 2: Origem da Contaminação das Áreas Contaminadas no Brasil**



Fonte: Brasil, 2020.

A partir da **Figura 2**, podemos observar que os postos de combustíveis com 71,1% e indústrias, entre outras as químicas, metalúrgicas com 19,5%, totalizam 90,6% das origens das contaminações, perfazendo juntas as maiores fontes de contaminação de áreas no Brasil. Apenas 9,4% representam as outras fontes poluidoras enumeradas, mas esse valor não pode ser negligenciado devido aos danos causados, se levarmos em conta a proporção territorial que esse valor poderia representar num país continental como o Brasil.

Com relação à **Figura 1**, ela aponta respectivamente os estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro como as principais regiões com os maiores números de áreas contaminadas no Brasil. Por outro lado, ambas as figuras acima por si só, não apresentam a distribuição das fontes poluidoras por Estado.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO PRINCIPAL**

Avaliar as principais tecnologias de remediação na recuperação de solos contaminados com metais pesados decorrentes da mineração no Brasil.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Apresentar os procedimentos de gerenciamento de solos contaminados por metais pesados;

Descrever as técnicas remediadoras para recuperação de solos contaminados por metais pesados;

Apresentar estudos de caso de aplicação de algumas técnicas remediadoras para solos poluídos por metais pesados.

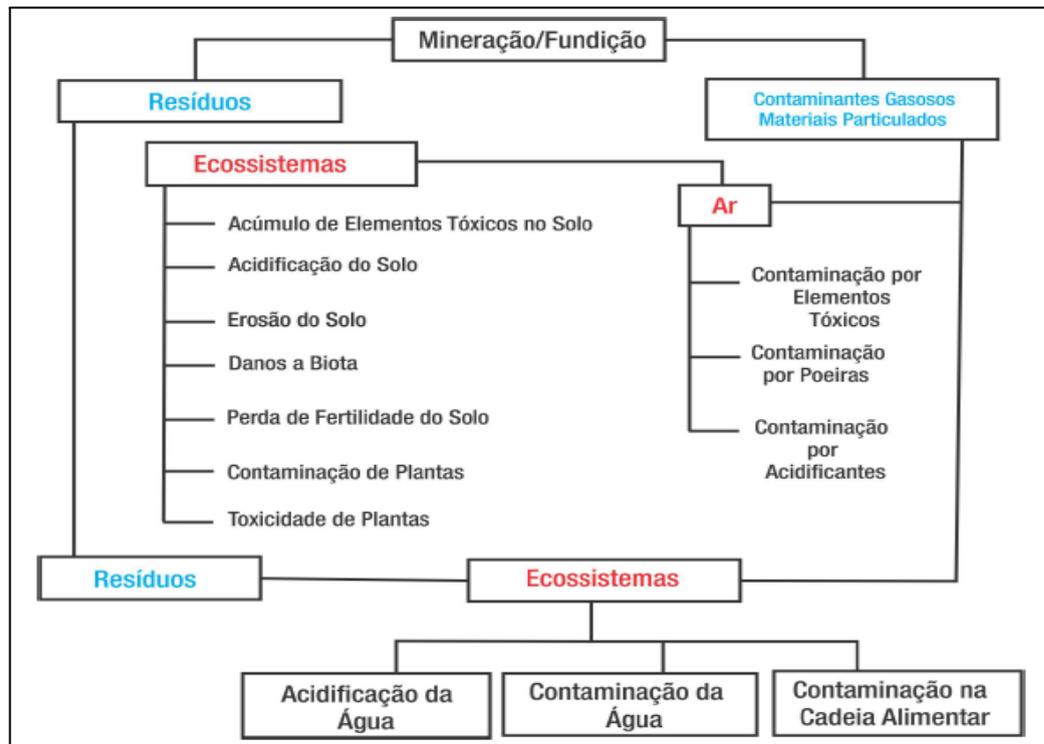
### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Inicialmente, buscou-se levantar a questão da presença de metais pesados nos compartimentos terrestres: água, sedimento e solo. Os processos de exploração de minerais minérios pesados fazem parte da mesma metodologia de extração de outros recursos minerais. Dessa forma, considerando os baixos teores nas jazidas, bem como a forma de tratamento deles, são geradas grandes quantidades de elementos ou compostos considerados estéreis ou rejeitos. Alguns desses resíduos podem conter minerais sulfetados em proporções variadas ou simplesmente traços. Ao serem dispostos em pilhas ou em barragens de rejeitos, podem sofrer intemperismo químico e constituir fontes poluidoras dos diferentes compartimentos terrestres como os solos, facilitado por estarem em contato direto com essas pilhas ou barragens e outros fatores como as condições meteorológicas e atmosféricas (Fungaro e Izodoro, 2006).

Somando as fontes poluidoras associadas aos fatores e condições climáticas, espera-se então a curto, médio ou longo prazo uma possível contaminação desses solos em área de mineração dos minérios apresentados. Isto com o potencial de causar perda parcial ou total da fauna e flora local, em razão do acúmulo desses elementos tóxicos e nocivos em solos, podendo causar também a redução da qualidade dos recursos hídricos devido às fortes concentrações de íons metálicos em suspensão, além da contaminação dos sedimentos depositados em rios, afetando dessa maneira os seres aquáticos e, por conseguinte toda a cadeia trófica (Santos, 2017). A **Figura 3** mostra os impactos de contaminantes e resíduos por ação da mineração /Fundição.

**Figura 3:** Impactos de contaminantes e resíduos devido à mineração/Fundição



Fonte: Dudka & Adriano, 1997.

A partir da figura apresentada, observamos que os resíduos provenientes da mineração/fundição, impactam tanto os ecossistemas terrestres e aquáticos quanto a cadeia trófica. Apesar de ser relevante, a contaminação do ar ambiente mostrada não constitui o foco principal neste estudo.

### 3.2. A DEGRADAÇÃO AMBIENTAL PELA MINERAÇÃO, LEGISLAÇÃO BRASILEIRA PARA AS ÁREAS DEGRADADAS

A degradação ambiental pela mineração de uma forma geral, se dá quando as condições físicas, químicas ou biológicas das áreas envolvidas nas operações de lavra e tratamento de minérios extraídos encontram-se em desequilíbrio ecológico. E isto ocorre seja pela remoção da cobertura vegetal e pela alteração de horizontes de solos na fase de preparação da lavra, seja pelas instalações da planta de beneficiamento, de equipamentos diversos, disposição de estéril e rejeitos em pilhas ou barragens, entre outros.

A legislação neste âmbito, visa preservar esses ambientes de danos, seja de forma corretiva ou preventiva. A proposta de restauração da área degradada exige a elaboração de um Plano de Fechamento da Mina (PFM) ou de um Plano de Recuperação das Áreas Degradadas (PRAD), estudos prévios ao licenciamento ambiental (Sponchiado, 2020).

Nessa perspectiva de preservação ambiental, o artigo 225 da Constituição da República Federativa do Brasil de 1988 determina em seu *caput* que:

*“Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações”.*

De acordo com Farias (2016), o artigo 47 do Código de Mineração estipula que:

*“Ficará obrigado o titular da concessão, além das condições gerais que constam deste Código, ainda, às seguintes, sob pena de sanções previstas no Capítulo V:*

*(...)*

*V – Executar os trabalhos de mineração com observância das normas regulamentares;*

*(...)*

*VII – Não dificultar ou impossibilitar, por lavra ambiciosa, o aproveitamento ulterior da jazida;*

*VIII – Responder pelos danos e prejuízos a terceiros, que resultarem, direta ou indiretamente, da lavra;*

*IX – Promover a segurança e a salubridade das habitações existentes no local;*

*X – Evitar o extravio das águas e drenar as que possam ocasionar danos e prejuízos aos vizinhos;*

*XI – Evitar poluição do ar, ou da água, que possa resultar dos trabalhos de mineração;*

*XII – Proteger e conservar as Fontes, bem como utilizar as águas segundo os preceitos técnicos quando se tratar de lavra de jazida da Classe VIII”.*

Além da aprovação do DNPM, atual ANM, Farias (2016) apresenta que:

*“A mineração está sujeita ao licenciamento ambiental, exigência prevista para as atividades efetiva ou potencialmente poluidoras segundo o artigo 10 da Lei 6.938/81. O conceito de poluição foi previsto no artigo 3º desse diploma legal:*

*III - poluição, a degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que direta ou indiretamente:*

*a) prejudiquem a saúde, a segurança e o bem-estar da população;*

- b) criem condições adversas às atividades sociais e econômicas;
- c) afetem desfavoravelmente a biota;
- d) afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente;
- e) lancem matérias ou energia em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos”.

A despeito da exigência de recuperar a área degradada pela atividade minerária prevista no texto constitucional, faltava um instrumento jurídico que viabilizasse esse objetivo (Farias, 2016). Por essa razão, foi editado o Decreto 97.632/89 instituindo o PRAD:

*“Art. 1º. Os empreendimentos que se destinam à exploração de recursos minerais deverão, quando da apresentação do Estudo de Impacto Ambiental - EIA e do Relatório do Impacto Ambiental - RIMA, submeter à aprovação do órgão ambiental competente, plano de recuperação de área degradada.*

*Parágrafo único. Para os empreendimentos já existentes, deverá ser apresentado ao órgão ambiental competente, no prazo máximo de 180 (cento e oitenta) dias, a partir da data de publicação deste Decreto, um plano de recuperação da área degradada” (Brasil, 1989).*

As Normas Reguladoras de Mineração (NRM), de acordo com Flores e Lima (2012), apresentam os termos da NRM 20, que estabelece que:

*“O fechamento de mina deverá ser precedido de comunicação prévia e de pleito ao Ministro de Estado de Minas e Energia, através de requerimento justificativo acompanhado de instrumentos comprobatórios nos quais constem:*

- a) Relatório dos trabalhos efetuados;
- b) Caracterização das reservas remanescentes;
- c) Plano de desmobilização das instalações e equipamentos que compõem a infraestrutura do empreendimento mineiro, indicando o destino a ser dado a eles;
- d) Atualização de todos os levantamentos topográficos da mina;
- e) Planta da mina na qual constem as áreas lavradas recuperadas, áreas impactadas recuperadas e por recuperar, áreas de disposição do solo orgânico, estéril, minérios e rejeitos, sistemas de disposição, vias de acesso e outras obras civis;
- f) Programa de acompanhamento e monitoramento relativo a sistemas de disposição e de contenção, taludes em geral, comportamento do lençol freático, drenagem das águas;
- g) Plano de controle da poluição do solo, atmosfera e recursos hídricos, com caracterização de parâmetros controladores;
- h) Plano de controle de lançamento de efluentes, com caracterização de parâmetros controladores;
- i) Medidas para impedir o acesso à mina de pessoas estranhas e interditar com barreiras os acessos às áreas perigosas;

j) *Definição dos impactos ambientais nas áreas de influência do empreendimento, levando em conta os meios físicos, bióticos e antrópico;*

k) *Aptidão e intenção de uso futuro da área;*

l) *Conformação topográfica e paisagística, levando em conta aspectos sobre a estabilidade, controle de erosões e drenagem;*

m) *Relatório das condições de saúde ocupacional dos trabalhadores durante a vida útil do empreendimento mineiro; e*

n) *Cronograma físico e financeiro das atividades propostas.*

*Por fim, esse plano de fechamento deve ser atualizado regularmente a medida do possível e estar disponível na mina para fins de fiscalização”.*

### 3.3. CONTAMINAÇÕES DE SOLOS PELA MINERAÇÃO

Os fatores envolvidos na degradação de solos relatados no capítulo anterior como a disposição das pilhas de minério e de rejeitos, as barragens de rejeito, a retirada da cobertura vegetal e dos horizontes de solos em áreas de mineração, que juntos combinados com alguns agentes atmosféricos ou erosivos como a água, participam na lixiviação e poluição de solos com a liberação de substâncias tóxicas.

Desse modo, a fim de promover a proteção do meio ambiente, elaborou-se a nível Estadual, caso de Minas Gerais, seguindo o incentivo das Regulamentações ambientais federais, um conjunto de instrumentos legais que foi concebido pela Fundação Estadual de Meio Ambiente (FEAM) e submetido ao Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM), que após aprovação, foi divulgado na forma de Deliberação Normativa (COPAM Nº 116, 27 de junho de 2008). Ressaltam-se algumas passagens tiradas dessa Deliberação que se encaixam ao assunto tratado:

*“Art. 1º - Para fins de aplicação desta Deliberação Normativa e de seus anexos ficam definidos os seguintes conceitos:*

*[...]*

**III. Área contaminada:** *área, terreno, local, instalação, edificação ou benfeitoria que contenha quantidades ou concentrações de substâncias químicas, comprovadas por estudos, que causem ou possam causar danos à saúde humana, ao meio ambiente ou a outro bem a proteger.*

*[...]*

**VI. Atividade com potencial de contaminação:** *atividade em que ocorre o manuseio, processamento, armazenamento, disposição e transporte de substâncias químicas que possam acarretar danos à saúde humana e ao meio ambiente.*

*[...]*

**IX. Contaminação:** *introdução no meio ambiente de organismos patogênicos, substâncias tóxicas ou outros elementos, em concentrações que possam afetar a saúde humana, meio*

ambiente ou a outro bem a proteger. É um caso particular de poluição.

**X. Fonte de Contaminação:** local onde foi gerada a contaminação ou onde funcionou ou funciona uma atividade potencialmente contaminadora, origem dos contaminantes liberados para os meios impactados.

[...]

**XVIII. Responsável pela área:** pessoa física ou jurídica, de direito público ou privado, responsável legal, direta ou indiretamente, pela atividade causadora da contaminação, o proprietário ou o detentor da posse efetiva da área suspeita de contaminação ou contaminada” (Minas Gerais, 2008).

O artigo 4º, por sua vez declara que são consideradas áreas suspeitas de contaminação do solo e água subterrânea por substâncias químicas:

**I** – Área que teve ou tem disposição diretamente no solo, sem proteção, de matérias-primas, insumos e produtos, contendo pelo menos uma das substâncias químicas listadas no item 9 (nove) do Formulário de Cadastro de Áreas Suspeitas de Contaminação e Contaminadas por Substâncias Químicas;

**II** – Área onde ocorreu acidente com derrame no solo de qualquer uma das substâncias químicas listadas no item 9 (nove) do Formulário de Cadastro de Áreas Suspeitas de Contaminação e Contaminadas por Substâncias Químicas;

**III** – Área onde foi detectado vazamento, infiltração ou acidente em tubulações, tanques e equipamentos de qualquer uma das substâncias químicas listadas no item 09 (nove) do Formulário de Cadastro de Áreas Suspeitas de Contaminação e Contaminadas por Substâncias Químicas;

**IV** – Área onde é detectada a presença de substância química, identificada por meio da presença física na superfície ou subsuperfície do solo ou a constatação de odores provenientes do solo.

**V** – Área que teve ou tem disposição diretamente no solo, sem proteção, ou onde ocorreu vazamento, infiltração ou acidente com derrame no solo de resíduos perigosos ou não inertes, conforme classificação da Norma Técnica NBR 10.004/2004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas, ou daquela (s) que lhe suceder;

**VI** – Área com indícios de contaminação de espécies animais e vegetais ou de seres humanos em decorrência da contaminação do solo e águas subterrâneas;

**VII** – Área que apresenta outras evidências de contaminação do solo ou das águas subterrâneas” (Minas Gerais, 2008).

Por fim, os artigos 7º e 8º fixam respectivamente:

“O COPAM e os órgãos componentes do Sistema Estadual do Meio Ambiente - Sistema poderão, a qualquer momento, sendo identificada uma área contaminada ou sob suspeita de

*contaminação, indicar ações emergenciais e institucionais a serem adotadas visando a resguardar a proteção da saúde humana, dos recursos naturais e de outros bens a proteger;*

*E o não cumprimento do disposto nesta Deliberação sujeitará os infratores à aplicação das penalidades e sanções previstas em lei” (Minas Gerais, 2008).*

### 3.3.1. METAIS PESADOS

Os metais pesados, de acordo com Dias (2021), formam um conjunto de elementos químicos cuja principal característica dos seus átomos, é a faculdade de perder elétrons e de formar então cátions, devido a sua baixa energia de ionização, podem ser definidos considerando os atributos ou propriedades como:

- *“Capacidade de formar sulfetos e hidróxidos insolúveis em água;*
- *Capacidade de formar sais que, em solução aquosa, dissolvem-se e colorem a água;*
- *Têm uma elevada massa atômica, com referência, a massa atômica do sódio, que é 23 g/mol;*
- *Têm um elevado número atômico, com referência, o número atômico do cálcio, que é 20;*
- *Têm elevada massa específica ou densidade, em torno de 3,5 a 7,0g/cm<sup>3</sup>;*
- *São de fácil absorção por um organismo vivo” (Dias, 2021).*

Levando em conta essas características apresentadas: Sr, V, Cr, Mo, Ni, Cu, Pb, Hg, Cd, Mn, Co, Zn, Sn, Sb, Te, Se, As, esses são alguns exemplos desses metais pesados.

Os principais minerais pesados mais comuns são: Pirita ( $\text{FeS}_2$ ), Esfalerita ( $\text{ZnS}$ ), Calcocita ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), Marcassita ( $\text{FeS}_2$ ), Cinábrio ( $\text{HgS}$ ), Millerita ( $\text{NiS}$ ), Molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ), Bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ), Calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), Cobaltita ( $(\text{Co}, \text{Fe})\text{AsS}$ ), Arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ), Pentlandita ( $(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$ ). Os metais pesados na sua forma iônica têm um papel importante em várias funções bioquímicas e fisiológicas no organismo humano, em concentrações baixas, no entanto, quando excedem os valores limites acima do permitido, eles ficam nocivos, podendo causar alguns danos na saúde (Jaishankar *et al.*, 2014). A **Tabela 2** apresenta alguns metais pesados e seus principais riscos à saúde humana.

**Tabela 1:** Alguns metais pesados e seus efeitos nocivos sobre a saúde

<b>Metais Pesados</b>	<b>Efeitos Tóxicos</b>
Cádmio	Câncer de pulmão e próstata; lesões nos rins.
Arsênio	Câncer (Seios paranasais).
Níquel	Câncer de pulmão e seios paranasais.
Cobalto	Fibrose pulmonar (endurecimento do pulmão) que pode levar à morte.
Cromo	Asma (bronquite); câncer.
Mercúrio	Intoxicação do sistema nervoso central.
Chumbo	Cólicas abdominais, tremores, fraqueza muscular, lesão renal e cerebral.

**Fonte:** Araújo, Pinto Filho e Oliveira, 2010.

### 3.3.2. CONTAMINAÇÃO DE SOLOS POR METAIS PESADOS DECORRENTES DA MINERAÇÃO

A contaminação de solos por metais pesados em áreas de mineração acontece essencialmente devido ao descarte ou disposição inadequados de minérios ou rejeitos e substâncias associadas potencialmente tóxicas em pilhas de estéril ou barragens, onde alguns desses minérios ou rejeitos sulfetados, encontram-se expostos às condições atmosféricas (Fungaro e Izodoro, 2006). E isto constitui as principais fontes responsáveis pelo fenômeno de Drenagem Ácida de Mina (DAM), levando à contaminação das águas tanto de superfície quanto de subsuperfície e solos próximos da região afetada (Andrade *et al.*, 2009).

#### 3.3.2.1 DRENAGEM ÁCIDA DE MINA

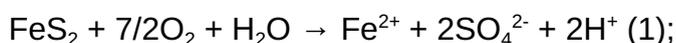
Uma das maiores preocupações em relação à contaminação de solos devido a exploração de minérios sulfetados ou minérios associados a sulfetos é o chamado

fenômeno de Drenagem Ácida de Mina. Considerando a exposição de alguns sulfetos como a pirita ( $\text{FeS}_2$ ) ou a arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ), em condições atmosféricas, com a água da chuva ( $\text{H}_2\text{O}$ ) e o ar ambiente ( $\text{O}_2$ ), ambos, favorecendo a oxidação desses elementos e a mesma, ampliada pela presença de algumas bactérias como a *Acidithiobacillus ferrooxidans*, capazes de oxidar o Enxofre (S) e o Ferro (Fe).

Por outro lado, essa oxidação pode gerar uma água de baixa qualidade por ser muito ácida ( $\text{pH} < 3$ ), contendo uma concentração alta de Sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), de íons Férricos ( $\text{Fe}^{3+} / \text{Fe}^{2+}$ ), de metalóides e elementos traços associados (Co, Sb, Cr, Mo, Te), entre outros (Blowes, Jambor e Hanton-Fong, 1998). Considerando a alta acidez da água, favorecendo a solubilidade e a dissolução de metais como Zn, Cu, Ni, participando desse modo, no aumento do nível de toxicidade de solos e águas contaminados, (Barnhisel *et al.*, 1982 **apud** Bitencourt *et al.*, 2015).

→ A Pirita e a Marcassita, por apresentarem a mesma fórmula química,  $\text{FeS}_2$ , por serem os mais abundantes e presentes nas rochas de interesse, contribuem com a maior parte da água ácida.

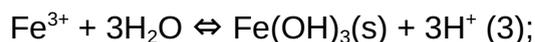
A primeira reação inicia-se com a oxidação de  $\text{FeS}_2$  como segue:



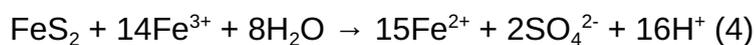
Depois o  $\text{Fe}^{2+}$  é oxidado em  $\text{Fe}^{3+}$ , conforme equação (2)



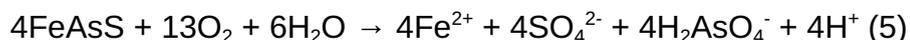
Da reação (2), por hidrólise e acelerada pela ação das bactérias citadas, é gerado o hidróxido de Ferro, e os prótons liberados acidificam o meio (Singer e Stumm, 1970), considerando a equação (3)



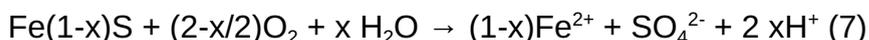
Com os valores de pH muito baixo ( $< 2,3$ ), não acontece a hidrólise na (3), elevando assim a concentração de  $\text{Fe}^{3+}$  e que acaba oxidando a Pirita de acordo com a equação (4):



→ A oxidação da Arsenopirita está apresentada pelas equações (5) e (6), podendo ser responsável pela geração de ácido e do As como contaminantes.



→ A Pirrotita pode ser encontrada em resíduos de minérios sulfetados. Ela participa por parte do processo de acidificação das águas de drenagem de minas tanto como a Pirita, mas podendo em certos aspectos apresentar maior taxa de oxidação, mais alta que a própria Pirita, nas etapas iniciais do intemperismo, como mostrada equação (7):



→ No entanto, todos os minerais sulfetados não sofrem a reação de hidrólise ácida, é o caso da Galena (PbS), da Calcocita (CuS) e da Esfarelita (ZnS), como apresentado nas equações (8) (9) e (10) (Mello, Dias e Corrêa, 2003):



A Galena é responsável por fornecer o Chumbo (Pb), que após concentração, contamina as áreas das regiões exploradas e as em torno delas, e quanto à Esfalerita, ela pode ser a fonte de Cádmio (Cd) e de Tálcio (Tl), ambos perigosos para o meio ambiente, o Zn é tóxico apenas em níveis altos acima dos limites admitidos (Martins, 2005).

### 3.3.3 VALORES DE REFERÊNCIAS DE METAIS PESADOS ACEITÁVEIS

Os valores de referência sobre os níveis de contaminação de solos e águas subterrâneas foram determinados, elaborados e definidos tanto pelo COPAM no caso do Estado de Minas Gerais quanto pela Diretoria Colegiada da CETESB, para diversas substâncias químicas e contidos respectivamente na Deliberação

Normativa COPAM nº 166, de 29 de junho de 2011, que estabelece os valores de Referência de Qualidade dos Solos, e no artigo 1º da Decisão de Diretoria nº 125/2021/E, de 09 de dezembro de 2021, dispendo sobre a Aprovação da Atualização da Lista de Valores Orientadores para solos e água subterrânea.

Em seguida, apresentam-se os valores orientadores para solos e água subterrânea para substâncias inorgânicas (Metais Pesados), adaptados a partir das Normas citadas logo acima, nas **Tabelas 2 e 3**:

**Tabela 2:** Valores Orientadores para solos e água subterrânea no Estado de São Paulo

Substância	CAS Nº	Solo (mg kg <sup>-1</sup> peso seco)					Água Sub.
		VRQ	VP	VI			(µg L <sup>-1</sup> )
				Agrícola	Residencial	Industrial	VI
<b>INORGÂNICOS</b>							
Antimônio <sup>(1)</sup>	7440-36-0	<0,5	2	5	10	25	6
Arsênio <sup>(1)</sup>	7440-38-2	3,5	15	35	55	150	10
Bário	7440-39-3	75	120	500	1300	7300	700
Boro	7440-42-8	-	-	-	-	-	2400
Cádmio	7440-43-9	<0,5	1,3	3,6	14	160	3
Chumbo	7439-92-1	17	72	150	240	4400	10
Cobalto <sup>(1)</sup>	7440-48-4	13	25	35	65	90	70
Cobre <sup>(2)</sup>	7440-50-8	35	60	760	2100	10000 <sup>(a)</sup>	2000
Crômio total <sup>(1)</sup>	7440-47-3	40	75	150	300	400	50
Crômio hexavalente	18540-29-9	-	-	0,4	3,2	10	-
Mercurio	7439-97-6	0,05	0,5	1,2	0,9	7	1
Molibdênio	7439-98-7	<4	5	11	29	180	30
Níquel <sup>(2)</sup>	7440-02-0	13	30	190	480	3800	70
Nitrato (como N)	14797-55-8	-	-	-	-	-	10000
Prata <sup>(1)</sup>	7440-22-4	0,25	2	25	50	100	50
Selênio	7782-49-2	0,25	1,2	24	81	640	40
Zinco	7440-66-6	60	86	1900	7000	10000 <sup>(a)</sup>	1800

Onde: **VRQ** – Valor de Referência de Qualidade; **VP** – Valor de Prevenção; **VI** – Valor de Intervenção.

(1) Mantidos os valores orientadores da Resolução CONAMA 420/2009.

(2) Mantidos os valores de prevenção da Resolução CONAMA 420/2009.

**Fonte:** São Paulo, 2021.

**Tabela 3:** Valores Orientadores para solos e água subterrânea no Estado de Minas Gerais

Substâncias	CAS n°	Valor de					Água Subterrânea (µg.L <sup>-1</sup> ) <sup>(1)</sup>
		Referência de qualidade	Solo (mg.kg <sup>-1</sup> de peso seco) <sup>(3)</sup>				
			Prevenção <sup>(1)</sup>	Investigação <sup>(1)</sup>			
			Agrícola	Residencial	Industrial	Investigação	
<b>Inorgânicos</b>							
Alumínio <sup>(5)</sup>	7429-90-5	-	-	-	-	-	3500
Antimônio <sup>(4)</sup>	7440-36-0	<b>0,5</b>	2	5	10	25	5
Arsênio <sup>(4)</sup>	7440-38-2	<b>8</b>	15	35	55	150	10
Bário <sup>(4)</sup>	7440-39-3	<b>93</b>	150	300	500	750	700
Boro	7440-42-8	<b>11,5</b>	-	-	-	-	500
Cádmio <sup>(4)</sup>	7440-48-4	<b>&lt;0,4</b>	1,3	3	8	20	5
Chumbo <sup>(4)</sup>	7440-43-9	<b>19,5</b>	72	180	300	900	10
Cobalto	7439-92-1	<b>6,0</b>	25	35	65	90	5
Cobre <sup>(4)</sup>	7440-50-8	<b>49</b>	60	200	400	600	2.000
Cromo <sup>(2)</sup>	7440-47-3	<b>75</b>	75	150	300	400	50
Ferro <sup>(5)</sup>	7439-89-6	-	-	-	-	-	2450
Manganês <sup>(5)</sup>	7439-96-5	-	-	-	-	-	400
Mercúrio <sup>(4)</sup>	7439-97-6	<b>0,05</b>	0,5	12	36	70	1
Molibdênio	7439-98-7	<b>&lt;0,9</b>	30	50	100	120	70
Níquel	7440-02-0	<b>21,5</b>	30	70	100	130	20
Nitrato (como N) <sup>(4)</sup>	797-55-08	-	-	-	-	-	10.000
Prata	7440-22-4	<b>&lt;0,45</b>	2	25	50	100	50
Selênio <sup>(4)</sup>	7782-49-2	<b>0,5</b>	5	-	-	-	10
Vanádio	7440-62-2	<b>129</b>	-	-	-	-	-
Zinco <sup>(5)</sup>	7440-66-6	<b>46,5</b>	300	450	1000	2000	1050

(2) Em função da concentração de cromo obtida, após análise estatística, ser superior ao VP estabelecido pela Resolução CONAMA 420/2009, adotou-se para o VRQ o valor de VP dessa Resolução.

(4) Valores máximos permitidos oriundos da Portaria N°518/2004 do Ministério da Saúde (Tabela N°3) com base em risco à saúde humana.

(5) Estes valores são diferentes da Tabela N° 5 da Portaria N°518 do Ministério da Saúde, pois foram calculados com base em risco à saúde humana, de acordo com o escopo desta resolução.

**Fonte:** Minas Gerais, 2011.

Os Valores Orientadores para solos e água apresentados nas **Tabelas 2 e 3**, seguem uma metodologia definida pela Resolução CONAMA N° 420, de 28 de dezembro de 2009. Em primeiro lugar, observa-se que os valores de referência de

qualidade para algumas substâncias variam de uma tabela para a outra, conforme a Resolução citada acima que concede aos Estados definirem seus valores de referência de qualidade. Em segundo lugar, os valores de Prevenção e de Investigação (solos e água) de algumas substâncias variam também, mas quando comparamos os valores do Minas Gerais referentes a esses critérios com os do CONAMA 420/2009, percebemos que são muito próximos para maioria dessas substâncias, mas diferentes por muito a dos do São Paulo e isto devido aos cálculos feitos conforme a atualização da legislação que define os padrões de valores com base em risco à saúde humana, para essas substâncias (São Paulo, 2021).

#### **4. ROTA DE GERENCIAMENTO DE SOLOS CONTAMINADOS POR METAIS PESADOS EM ÁREA DE MINERAÇÃO**

O empreendimento relacionado com elementos sulfetados pode ser fonte de contaminação de solos localizados em área de operações mineiras, desse modo surge a necessidade de elaborar uma metodologia de gerenciamento de solos afetados por metais pesados provenientes dessa atividade. Tal procedimento tem a finalidade de mitigar ou neutralizar os danos ambientais causados.

Dessa maneira, de acordo com São Paulo (2021), um conhecimento prévio das causas e características do tipo de contaminantes dos solos poluídos, é fundamental, pois irá definir as medidas corretivas e preventivas certas a serem empregadas posteriormente. Para isso, estabelecem-se os processos de identificação e de recuperação/reabilitação desses solos, consistindo respectivamente, na localização e na implementação de medidas remediadoras nessas áreas contaminadas (solos) por metais pesados.

Por conseguinte, a rota de gerenciamento pode ser apresentada sucintamente, baseando-se em São Paulo (2021) e Brasil (2009), adaptada para situações de contaminação de solos por metais pesados em áreas de mineração e classificada em:

- Processos de identificação de áreas contaminadas e;
- Processos de reabilitação de áreas contaminadas.

#### 4.1. PROCESSOS DE IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS CONTAMINADAS

##### a) Identificação de Áreas (solos) com potencial de Contaminação

A identificação de solos potencialmente afetados, pode ser feita a partir das informações existentes (denúncia, convocação, desativação, etc.) sobre as atividades que são ou foram desenvolvidas numa dada região de interesse, e avalia-se o potencial gerador de áreas contaminadas – solos, pelo órgão ambiental gerenciador, é responsável por acordar uma classificação Potencial de Contaminação (AP), em caso da existência de uma fonte poluidora nessa área.

##### b) Avaliação Preliminar

A avaliação preliminar tem o objetivo de conduzir uma investigação das áreas classificadas como AP na etapa anterior. Essa fase permitiria, entre outros, identificar as fontes de contaminação potenciais, identificar as substâncias químicas de interesse, constatar situações que permitirão suspeitar da existência de contaminação nos compartimentos do meio ambiente (solos), verificar a necessidade de realização da etapa de Investigação Confirmatória, propor uma nova classificação. Desse modo, uma nova classificação é feita de acordo com as informações obtidas nessa etapa, que poderia ser Área Suspeita de Contaminação (AS) ou Área Contaminada (AC) ou permanecer no estado de AP caso não haja preocupação suficiente quanto à gravidade da poluição.

##### c) Investigação Confirmatória

A execução de um diagnóstico sobre a área classificada como AS, faz-se necessário com a finalidade de confirmar ou não uma possível presença de contaminantes nos compartimentos do meio ambiente – solos, proveniente de fontes poluidoras devido ao empreendimento, de mineração de metais pesados. Essa investigação é realizada em zonas bem localizadas daqueles compartimentos, e isto é feito a partir de uma investigação direta, ou seja, são coletadas amostras tiradas do ambiente analisado, para determinação das concentrações das substâncias nelas

presentes. Após confirmação feita, determina-se uma nova classificação, que seria Área Contaminada sob Investigação (ACI) e registradas no Cadastro de Áreas Contaminadas (ACs) e Reabilitadas, pelo mesmo órgão já visto.

#### d) Investigação Detalhada

A definição das características das fontes de contaminação primárias e das poluições nos compartimentos do meio ambiente citado, constitui a finalidade. Para tal investigação, é feita uma análise e interpretações baseando-se nas amostras recolhidas anteriormente, destas, fornecem-se informações quanto à quantidade, à repartição e ao mecanismo de propagação das substâncias identificadas, naqueles compartimentos do meio ambiente – solos. Essa responsabilidade cabe ao interessado legal que deve indicar um terceiro para efetivação desta etapa.

#### e) Avaliação de Risco

Ela tem o propósito de avaliar se sim ou não a área classificada como ACI, tem a necessidade de recorrer à implementação de uma ação mitigadora ou de intervenção para reabilitação ou uso futuro da mesma. Essa etapa baseia-se então, na identificação e caracterização dos riscos aceitáveis ou dos danos causados aos bens devido ao contato com as substâncias determinadas, e isto realizado por um responsável técnico designado pelo interessado legal. Caso não seja evidenciado ainda nenhum risco, essa área – solos passa simplesmente a ser monitorada, caso contrário propõe-se uma nova classificação, Áreas Contaminadas com Risco Confirmado (ACRi).

### 4.2. PROCESSOS DE REABILITAÇÃO DE ÁREAS CONTAMINADAS

#### a) Elaboração do Plano de Intervenção

Ela representa o começo da ação que visa reabilitar as ACs, dessa forma, a formulação do documento contendo tais medidas respeite os seguintes passos: A definição dos objetivos geral e específico do plano de recuperação; A elaboração

das ações mitigatórias a serem empregadas e a escolha das técnicas a serem adotadas em cada uma das medidas de intervenção estabelecidas, daí é feita uma nova classificação, Áreas Contaminadas em processo de Reutilização (ACRe). Para esse fim, usam-se as informações contidas nas fases anteriores e mais uma vez cabe ao responsável legal indicar um terceiro na execução desta etapa.

#### b) Execução do Plano de Intervenção

A execução do Plano de intervenção visa cumprir as ações mitigadoras definidas na etapa anterior, e compreende os seguintes pontos na sua realização, que pode ser feita separadamente ou em conjunto, conforme o que foi predefinido neste mesmo plano, são esses pontos:

- ✓ *“A concretização, operação e avaliação do desempenho das medidas de correção por tratamento ou por contenção;*
- ✓ *A efetivação das disposições de controle de engenharia;*
- ✓ *A execução das medidas de controle institucional” (São Paulo, 2021).*

Cabe ao responsável legal comprometer-se a escolher um responsável técnico para garantir a execução desse plano. Por outro lado, será proposta novas classificações como a Área Contaminada em processo de Recuperação (ACRe) e a Área em processo de Monitoramento para Encerramento (AME), feita pelo órgão ambiental gerenciador que irá registrar esses processos no cadastro de Áreas Contaminadas e Reabilitadas.

#### c) Monitoramento para encerramento

Considerando as áreas classificadas como AME, esta fase objetiva através de uma série de ações ou campanhas no campo, acompanhar, avaliar o andamento das operações de remediação realizadas, e determina a sua eficiência levando em conta o que foi projetado e o que se espera dessa projeção, dessa forma garantindo se todas as normas de segurança estão sendo observadas escrupulosamente pelo responsável legal, o mesmo deve escolher um terceiro para a sua execução. Cabe ao órgão ambiental gerenciador avaliar os relatórios neste processo, fazer o cadastro e propor uma nova classificação se há necessidade, neste caso a área – solo pode ser classificada como Áreas Reabilitadas (AR).

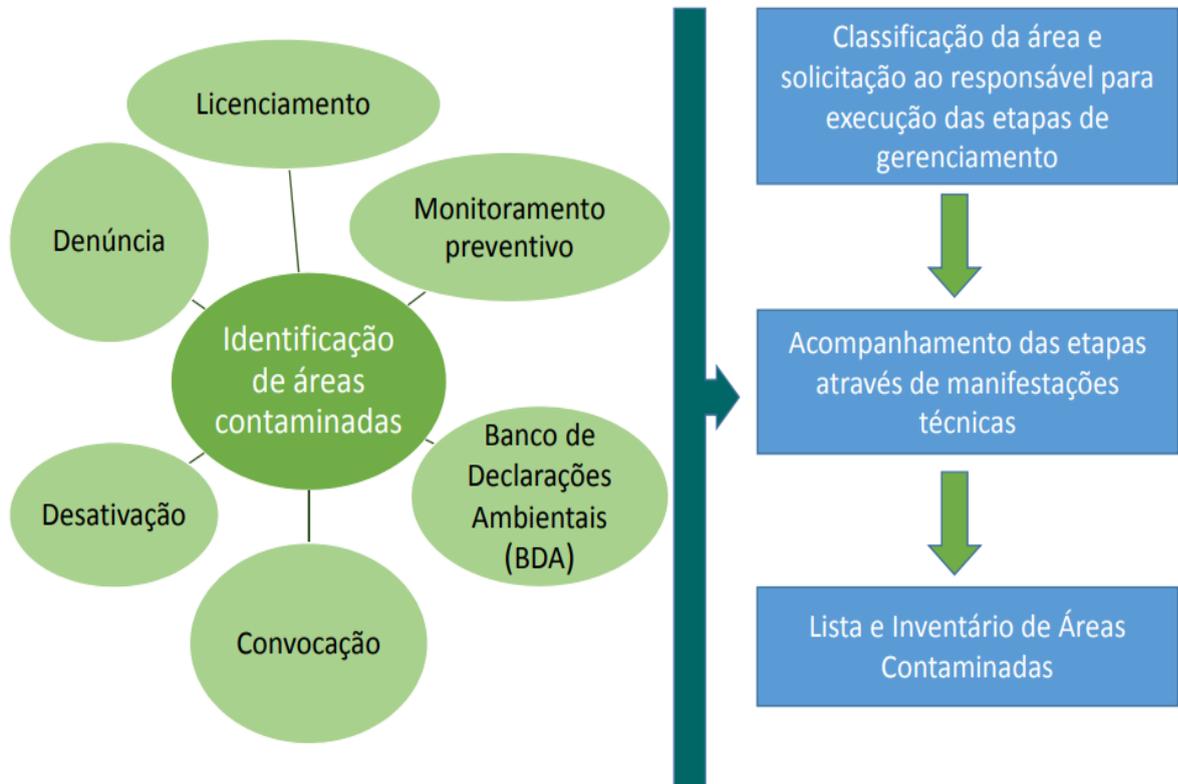
#### d) Emissão do Termo de Reabilitação para o Uso Declarado

O passo em questão visa à emissão do documento designado por Termo de Reabilitação para o Uso Declarado para uma AR estabelecida, este documento valida a classificação de uma área dada como AR, e é de a responsabilidade do órgão ambiental gerenciador produzir tal certificação, baseando-se nas informações fornecidas pelo interessado do empreendimento e seguindo metodicamente os passos que precedem a etapa da emissão de tal documento. São, entre outras, a descrição do conteúdo do Termo de Reabilitação para o Uso Declarado, a conservação da classificação da AR, a avaliação da exigência de dar continuidade com o Gerenciamento de Áreas Contaminadas (GAC) e a identificação dos responsáveis legais.

#### e) Acompanhamento da Medida de Controle de Engenharia ou da Medida de Controle Institucional

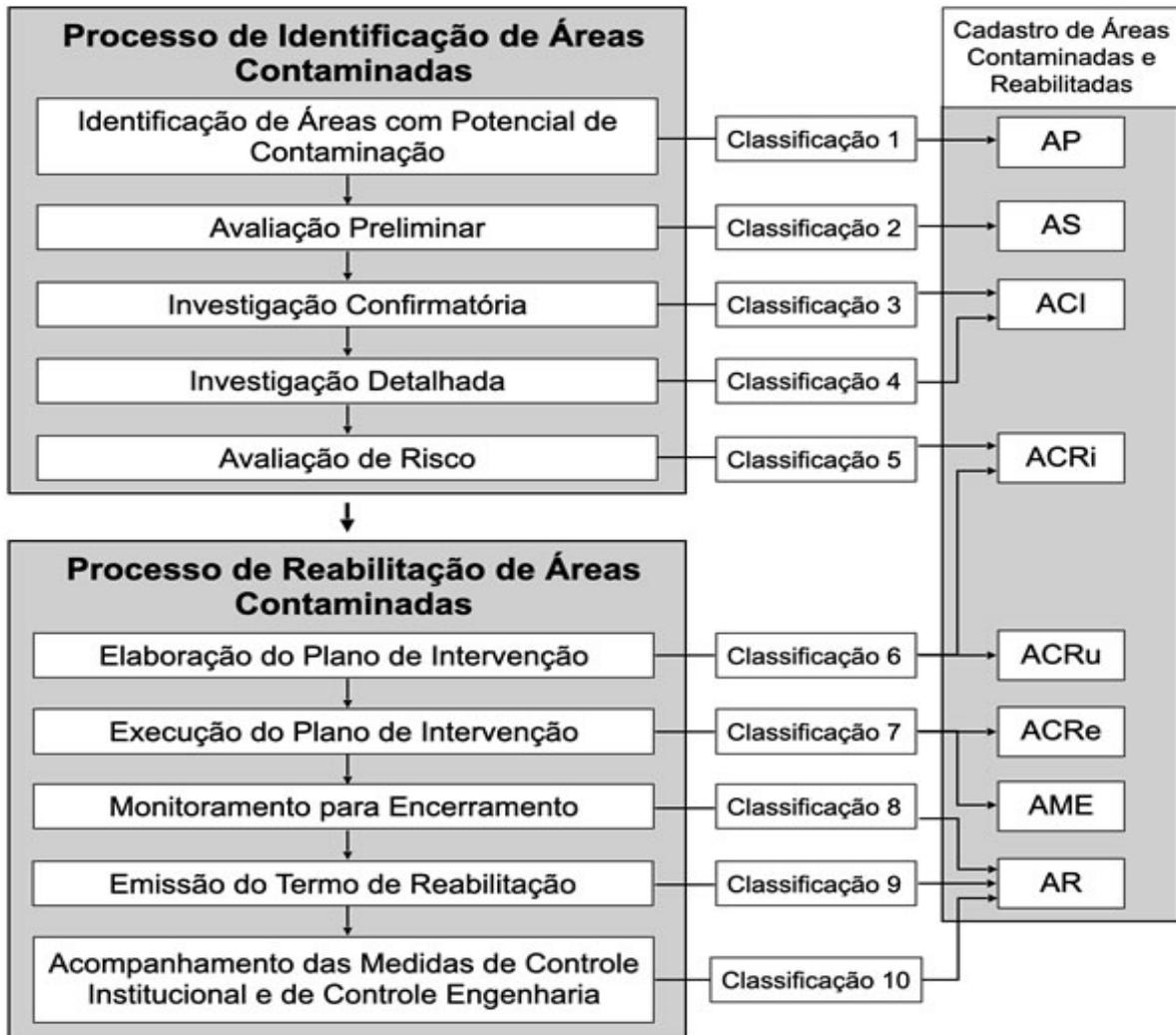
Por fim, esta última fase finaliza o GAC e tem o intuito de fazer uma avaliação do quanto foi eficiente às ações de controle de engenharia executadas e estimar se será preciso prosseguir. De outro modo, esta etapa envolve essencialmente entre outros, o acompanhamento das medidas realizadas, a consolidação da classificação como AR para Uso Declarado, e é de obrigação do responsável legal indicar um agente técnico para a efetivação desta etapa. Também, incumbe ao órgão ambiental gerenciador avaliar os relatórios no que diz respeito aos resultados apresentados pelo responsável das atividades, como a da mineração de metais pesados por exemplo. As **Figura 4** e **5** ilustram respectivamente o fluxograma do gerenciamento das áreas contaminadas e as etapas do GAC.

**Figura 4:** Fluxograma do gerenciamento das áreas contaminadas



**Fonte:** Minas Gerais, 2019.

Figura 5: Etapas do Gerenciamento de Áreas Contaminadas (GAC)



Fonte: São Paulo, 2021.

Por fim, a rota de gerenciamento de áreas contaminadas mostra-se importante pois normatiza as atitudes a serem tomadas pelos interessados no que se refere à poluição de solos em áreas de mineração. Os Estados de Minas Gerais e de São Paulo, são entre os precursores em termo de definição de regulamentações ao nível estadual em relação às áreas contaminadas, que através de seus órgãos de políticas ambientais respectivos (COPAM, CETESB), elaboraram as rotas de gerenciamento de áreas poluídas.

## 5. PROCEDIMENTOS E TÉCNICAS DE RECUPERAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS POR METAIS PESADOS EM ÁREA DE MINERAÇÃO

Após descrição dos procedimentos de gerenciamento de áreas contaminadas por metais pesados, apresentaremos neste capítulo os procedimentos e técnicas de recuperação de áreas afetadas e a adoção de medidas remediadoras que dependerão de alguns fatores como a natureza do (s) contaminante (s), as características do meio contaminado, o propósito da remediação, a localização da área poluída, a disponibilidade de verba a ser investida, entre outros fatores.

A recuperação pode ser entendida nesse contexto, como o restabelecimento da vegetação, das propriedades físico-químicas de solos e águas nas áreas de mineração, responsável por causar alterações ao meio ambiente local (Flores e Lima, 2012). A recuperação constitui-se por um conjunto de técnicas e medidas remediadoras que têm a finalidade de neutralizar, reverter ou mitigar os efeitos indesejáveis causados aos solos e outros compartimentos terrestres (Santos, 2017).

Assim sendo, podemos classificar as técnicas de remediação levando em conta a metodologia empregada para recuperação de solos poluídos em:

- Técnicas de remediações convencionais e;
- Técnicas de remediações biológicas ou biorremediações.

### 5.1. TÉCNICAS DE REMEDIAÇÕES CONVENCIONAIS

Essas técnicas consistem no uso de métodos físico-químicos, de contenção ou isolamento em caso extremo, para recuperação de solos contaminados por metais pesados em áreas de mineração no Brasil. Serão apresentadas logo em seguida, as descrições dos principais procedimentos usados nesse processo.

#### a) Neutralização da acidez

A DAM pode ser causada pela oxidação de sulfetos expostos e sujeitos às condições atmosféricas diversas e as águas ácidas decorrentes participam da poluição dos solos. Desse modo, as técnicas usadas na remediação ou controle desse fenômeno baseiam-se na neutralização da acidez, feita *in situ*, com o uso de enormes quantidades de substâncias de reação alcalina como o calcário ( $\text{CaCO}_3$ ), o

óxido/hidróxido de cálcio ou cal ( $\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), o carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). Essas apresentam um baixo custo além de não causarem risco ao meio ambiente, e são misturadas ao material gerador de drenagem ácida com a finalidade de reverter o pH do meio, impedindo pela mesma ocasião a solubilização ou a dissolução de metais pesados. O sucesso dessas reações depende de fatores como a morfologia do (s) sulfeto (s), a temperatura, a concentração de  $\text{O}_2$  e de  $\text{CO}_2$  no meio, o tamanho das partículas, a distribuição do material alcalino aplicado, entre outros (Mello, Duarte e Ladeira, 2014).

Considerando essa perspectiva, as águas ácidas resultantes da drenagem ácida da mina de urânio desativada do Complexo Industrial do Planalto de Poços de Caldas (CIPC), localizada na região sul de Minas Gerais, com potencial de contaminação de solos e águas de superfície e subterrânea, foram captadas, bombeadas e seguiu-se o processo de tratamento contínuo, empregando-se a cal, que além de neutralizar a acidez do meio, favorece a precipitação de metais pesados dissolvidos em forma de hidróxidos insolúveis (Mello, Duarte e Ladeira, 2014). A **Figura 6** apresenta uma estação de tratamento das águas ácidas oriundas de DAM do CIPC.

**Figura 6:** Estação de tratamento das águas ácidas oriundas da DAM do CIPC



**Fonte:** Mello, Duarte e Ladeira, 2014.

## b) Oxidação e estabilização químicas dos contaminantes

A oxidação química é usada para neutralizar ou remover a toxicidade dos poluentes nos solos/águas através da aplicação, *in situ*, superficialmente ou profundamente de oxidantes químicos, facilitando dessa forma, a decomposição, a redução ou eliminação da toxicidade dos contaminantes nesses ambientes afetados. São esses oxidantes, o ozônio ( $O_3$ ), os peróxidos ( $H_2O_2$ ), os permanganatos ( $HMnO_4$ ) e os persulfatos ( $Na_2S_2O_8$ ,  $K_2S_2O_8$ ). As principais limitações desta técnica residem, entre outras, na baixa permeabilidade do solo, também ela é fortemente dependente do pH, e pode impactar a microbiota conforme o oxidante empregado (Ferreira, 2018).

A estabilização, por sua vez, consiste na utilização de compostos orgânicos para mobilizar os metais do solo, feito no sítio, em que o solo poluído é misturado com estabilizantes, restringindo desse modo, a mobilidade desses contaminantes tratados. Os agentes alcalinos comumente usados nesse processo são o cimento e a cal, ambos têm o potencial de causar a cimentação das partículas poluidoras, levando conseqüentemente a uma redução da mobilidade dos contaminantes no solo (Rojas, Consoli e Heineck, 2008).

A mineração do carvão na bacia carbonífera Sul de Santa Catarina é considerada por décadas como uma região importante no que se refere à produção do carvão no Brasil. A geração de drenagem ácida, devido à exposição nas condições atmosféricas, de sulfetos em pilhas de rejeitos, acidificou as águas superficiais, causando uma redução de produtividade biológica nos rios, contaminando as águas subterrâneas e solos localizados nas regiões mineradas (Flores e Lima, 2012). Nesse contexto, surgiu a ação civil pública nº 93.8000533-4, tendo como objetivo a recuperação dos passivos ambientais das extintas empresas, além de áreas cuja mineração foi encerrada antes de 1972 (Brasil, 2008). A **Figura 7** mostra a localização da Bacia Carbonífera de Santa Catarina.

**Figura 7:** Localização da Bacia Carbonífera de Santa Catarina



**Fonte:** Menezes *et al.*, 2019.

Em seguida, foram elaboradas algumas opções de recuperação ambiental para cada área atingida, entre outras técnicas propostas, optou-se por usar para algumas áreas, a estabilização química dos contaminantes, a fim de atacar o problema na fonte geradora da DAM, atenuando dessa forma, a formação e dispersão dos contaminantes, evitando a poluição de novas áreas (Flores e Lima, 2012).

### c) Remoção, lavagem e redistribuição do solo

A lavagem de solos contaminados por metais pesados acontece de preferência, *ex situ*, após escavação, o solo é removido e transportado para o local, onde será tratado (Santos, 2017). A técnica baseia-se no uso de uma solução de lavagem ou

fluidos extrativos para causar a suspensão ou dissolução do (s) contaminante (s), e considerando o fato de que uma quantidade significativa de poluentes tende a aderir mais nas partículas finas, devido a sua elevada área superficial. Assim sendo, faz-se o emprego de diferentes fluidos extractivos para separar as partículas finas saturadas de poluentes das demais partículas, e o solo tratado e despolido, é restituído no local onde foi extraído anteriormente. O fluido de lavagem que serviu passa numa estação onde será filtrado e tratado antes de seu uso futuro num outro processo de lavagem. Basicamente, esse processo pode ser resumido através em:

*[...]*

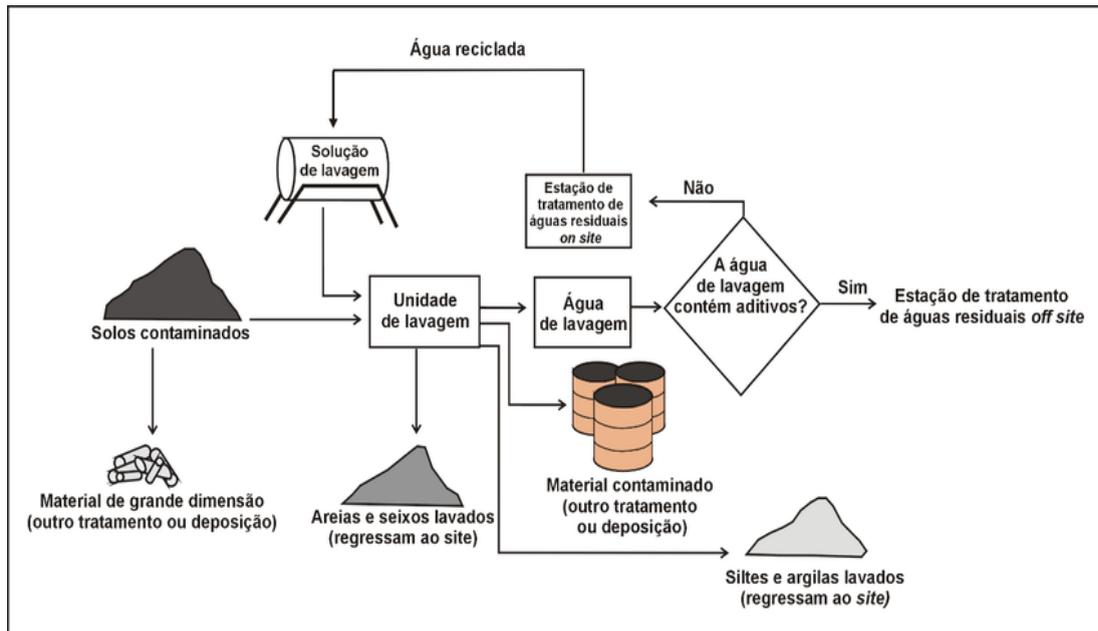
- ✓ *O pré-tratamento do solo contaminado;*
- ✓ *A lavagem e extração dos contaminantes;*
- ✓ *A separação de fases (extração de líquido/solo);*
- ✓ *O pós-tratamento do solo;*
- ✓ *A purificação do agente de extração e sua posterior reentrada no ciclo de extração” (Matec industries, 2021).*

Também, levando em conta o tipo de contaminante de solo como o Zn, Cu, Ni, As, Pb, Cd, a disponibilidade dos recursos e os objetivos fixados, opta-se entre outros fluídos extrativos:

- ✓ *“Água com surfactantes;*
- ✓ *Água;*
- ✓ *Soluções ácidas (de modo geral com HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e NH<sub>3</sub>);*
- ✓ *Soluções alcalinas (com NaOH, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>);*
- ✓ *Agentes complexantes, como o ácido cítrico, o acetato de amônio, o ácido etilenodiaminotetracético – EDTA (agente quelante orgânico que sequestra íons metálicos);*
- ✓ *Solventes orgânicos” (Matec industries, 2021).*

Apesar da eficiência dessa técnica considerando o seu prazo curto de restauração e de seu custo alto, ela poderia apresentar um impacto ambiental adicional devido à possível dispersão de contaminantes para outras áreas. Isto ocorre essencialmente ao longo do processo de remoção, armazenamento, transporte e redistribuição do solo, e também da possível exposição aos gases e partículas voláteis caso não seja observado às normas de segurança com firmeza no decorrer das operações (São Paulo, 1999). A **Figura 8** mostra uma representação esquemática do processo de lavagem de solos contaminados de uma forma simplificada.

**Figura 8:** Representação esquemática do processo de lavagem de solos contaminados



Fonte: Costa *et al.*, 2015.

#### d) Contenção/isolamento do solo contaminado

A contenção/isolamento, é um método empregado em caso de emergência para conter as áreas (solos) contaminadas por metais pesados, feito através da construção de barreiras com o intuito de impedir que os poluentes escapem e espalhem-se com a ação de agentes erosivos, contaminando dessa forma as regiões em volta da zona impactada. Essas barreiras apresentadas são físicas, compostas por camadas impermeabilizantes, feitas de argilas ou outro tipo de material com as mesmas propriedades. É usado com o objetivo, primeiro, quando não tem como haver um contato entre o solo poluído e o aquífero, e segundo, quando houver um contato entre o solo contaminado e o aquífero, neste caso procede-se a um rebaixamento do nível freático através de bombeamento de águas subterrâneas a fim de evitar a contaminação dessas águas (São Paulo, 1999).

Por outro lado, considerando o potencial de contaminação de solos e águas subterrâneas pelas águas ácidas provenientes da mineração do carvão na Bacia Carbonífera Sul de Santa Catarina, uma das soluções de engenharia para recuperar ou minimizar o impacto causado no ambiente direto ao redor da região explorada, foi o método de isolamento/contenção, consistindo primeiro, na instalação de poços de desaguamento para drenar com agilidade a água subterrânea evitando desse modo

a acidificação deste recurso precioso, em segundo lugar, consiste no isolamento dos resíduos com potencial para a geração de águas ácidas, impedindo dessa maneira que esses entrem em contato com as águas tanto de superfície quanto aquelas provindo do interior das minas (Flores e Lima, 2012).

## 5.2. TÉCNICAS DE REMEDIAÇÕES BIOLÓGICAS

A remediação biológica ou biorremediação é um processo biológico que utiliza especificamente micro-organismos, enzimas microbianas ou vegetais para desintoxicar ambientes contaminados, como solos (Gouma *et al.*, 2014), além de macro-organismos. Para melhor entendimento desse assunto, serão descritas respectivamente:

- A fitorremediação;
- A biorremediação microbiana;
- A micorremediação e;
- A bioacumulação.

### a) Fitorremediação

A fitorremediação é uma técnica comumente usada na recuperação de solos contaminados por metais pesados e outros poluentes, e baseia-se na utilização de plantas para promover a despoluição por imobilização, remoção, extração, acumulação de íons metálicos e estimulação da degradação destes contaminantes pelos organismos microscópicos (Southgate, 2015). No entanto, a efetividade desse método está relacionada com uma seleção criteriosa de espécies de plantas que apresentem um melhor desempenho nos solos contaminados onde serão implantadas (Pires *et al.*, 2003). Essa técnica poderia representar uma alternativa viável quando a comparamos com aquelas técnicas convencionais por ser de custo baixo, e pelo fato de que as plantas usadas na remediação poderiam participar na fertilidade do solo, além de dependerem exclusivamente da energia solar nesse processo (Robinso *et al.*, 2003).

Fundamentando-se nas especificidades de atuação de cada planta no que diz respeito ao processo de descontaminação, a fitorremediação subdivide-se

essencialmente em: fitoextração, fitoestabilização, fitodegradação, fitovolatilização e fitoestimulação.

A **fitoextração** ou fitoacumulação compreende a habilidade que as plantas têm de absorver e acumular os contaminantes nos tecidos delas como as folhas apesar do caráter particularmente tóxico desses poluentes. Ironicamente, alguns contaminantes de solos como o Ni, Mo, Cu, Zn, Mg, participam ativamente no desenvolvimento dessas plantas, e outros por não terem uma função biológica conhecida são simplesmente estocados, é o caso do Hg, Cd, Cr, Co, Pb, Ag, Se, As (Abdullahi *et al.*, 2021). Algumas espécies de plantas envolvidas nesse processo como a *Brassica hirta* (Mostarda), *Helianthus annuus* (Girassol), *Zea mays* (Milho), *Arachis hypogaea* (Amendoim), *Brassica oleracea* (Brócolis), *Fagopyrum esculentum* Moench (Trigo mourisco) (Estrela, Chaves e Silva, 2018), são selecionadas em particular por serem fáceis de serem cultivadas, por terem uma alta capacidade de acumulação e de tolerância em solos com uma elevada concentração desses poluentes enumerados, sem manifestar os efeitos fitotóxicos (a clorose) observados comumente em plantas de outra espécie (Favas *et al.*, 2014 e Abdullahi *et al.*, 2021). Porém, as espécies de plantas enumeradas apresentam um crescimento lento e possuem uma baixa produção da biomassa (Estrela, Chaves e Silva, 2018).

A **fitoestabilização** por sua vez, é uma técnica que consiste em usar algumas espécies de plantas para recuperar os solos contaminados por metais pesados, onde estes últimos, são precipitados em formas insolúveis por ação direta dos exsudatos (refere-se a saída de líquidos orgânicos através das membranas celulares, entre outras partes das plantas) das raízes e sequestrados na matriz dos solos. Para dificultar ou limitar a migração, a disponibilidade e a concentração desses poluentes no solo, estes são acumulados nas extremidades das raízes (Favas *et al.*, 2014). As espécies de plantas usadas nesse processo como a *Asclepis*, *Gladiolus*, *Haumaniastrum*, *Eragrostis* e *Alyssum*, têm a faculdade de amenizar a erosão de solos por lixiviação, sem contar que elas garantem uma boa cobertura do solo e são empregadas em solos razoavelmente poluídos a muito poluídos (Santos, 2017).

A **fitodegradação** ou fitotransformação, consiste na metabolização dos contaminantes orgânicos nas células vegetais facilitada com a intervenção de enzimas como as *nitroreductases*, *dehalogenases* e *lacases*, presentes nas espécies como a *Populus* e a *Myriophyllum spicatum* (Favas *et al.*, 2014). Essas têm a

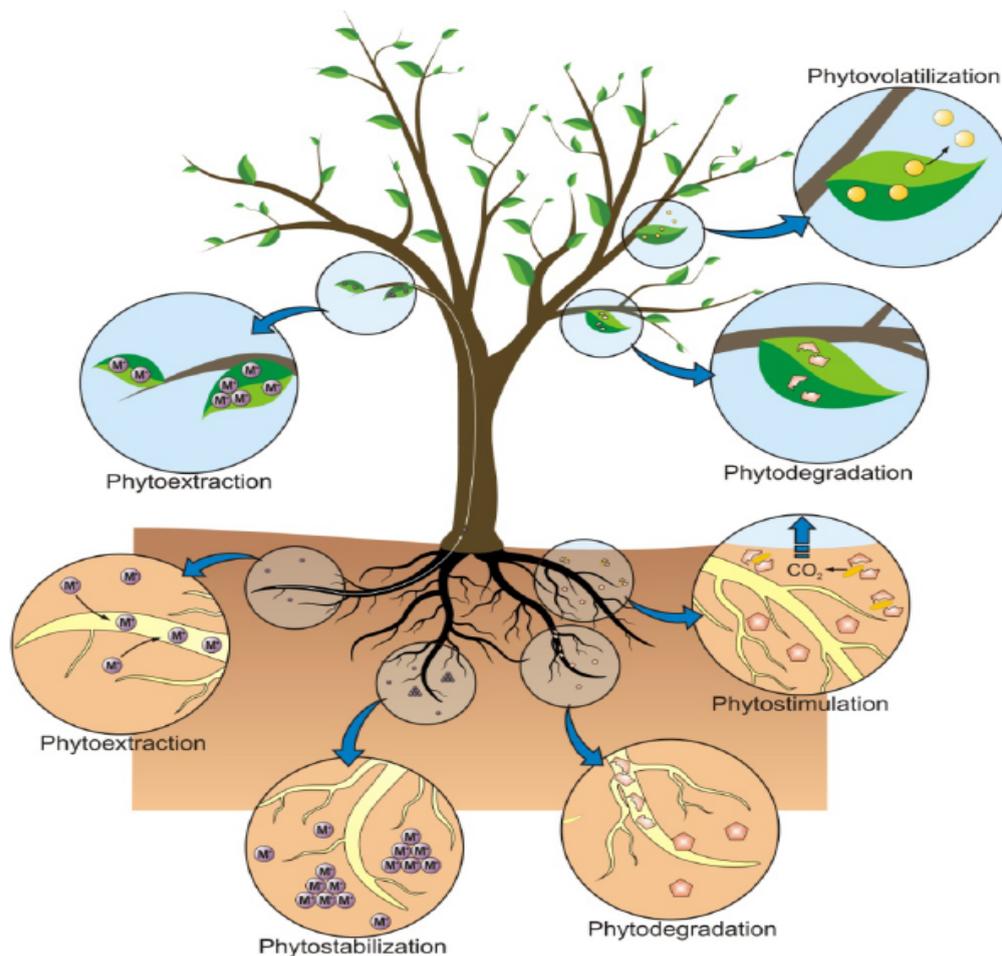
habilidade de quebrar as partículas orgânicas dos poluentes, de moléculas complexas para átomos elementares, e essa técnica pode ser indicada para solos, sedimentos ou águas poluídas por metais pesados (Sinha, 2019).

A **fitovolatilização** refere-se ao processo de capturar ou de absorver alguns metais pesados e metalóides como o Hg, As e Se, pelas raízes das plantas, e depois esses são convertidos nas formas não tóxicas e por último liberados na atmosfera pelas folhas, conforme apresentado (Sinha, 2019). Nesse processo, as espécies de plantas como a *Astragalus bisulcatus*, *Arabidopsis thaliana*, *Brassica napus* e *Nicotiana tabacum*, são regularmente usadas (Favas *et al.*, 2014).

A **fitoestimulação** ou rizorremediação, entendida como a estimulação pelas plantas da decomposição de contaminantes orgânicos por meio de atividade microbiana, na região chamada de rizosfera ou sistema solo-raiz (Estrela, Chaves e Silva, 2018).

A fitorremediação apesar de ser uma técnica revolucionária, fácil de ser aplicada e barata, apresenta algumas limitações como, por exemplo, o tempo que as plantas remediadoras levam para a descontaminação pode ser longo, o contaminante tem que estar dentro da zona de alcance das raízes, o clima e as condições atmosféricas locais podem representar um fator limitante quanto ao desenvolvimento de plantas remediadoras, a possibilidade das plantas usadas tornarem-se um perigo para a cadeia alimentar, entre outras limitações (Pires *et al.*, 2003). A **Figura 9** ilustra alguns mecanismos relacionados com as principais técnicas fitorremediadoras apresentadas.

**Figura 9:** Os principais processos relacionados com as técnicas de fitorremediação



Phytovolatilization: **Fitovolatilização**; Phytodegradation: **Fitodegradação**; Phytoextraction: **Fitoextração**; Phytostimulation: **Fitoestimulação**; Phytostabilization: **Fitoestabilização**.

Fonte: Favas *et al.*, 2014.

#### b) Biorremediação microbiana

Na **biorremediação microbiana**, usa-se micro-organismos e/ou seus derivados (enzimas) para descontaminar os ambientais poluídos através da capacidade que eles têm de desintegrar ou de acumular diversos compostos químicos (radionuclídeos e metais pesados) durante seus processos metabólicos, tornando-os menos tóxicos ou não tóxicos. Por ser uma técnica natural, ela é barata e pode ser usada tanto no local poluído como fora, mas neste último caso, custos adicionais deveriam ser inclusos em razão da nova rota de operação, relacionada com a

extração, transporte e redistribuição do solo contaminado (Tekere, 2019). A **Tabela 4** apresenta algumas bactérias e suas respostas respectivas a metais pesados.

**Tabela 4:** Algumas bactérias e suas respostas respectivas a metais pesados

<b>Bactérias</b>	<b>Ação nos metais pesados</b>
<i>Phormidium valderium</i>	Remove o Pb e Cd
<i>Stereum hirsutum</i>	Usa o Cu, Ni, Co e Cd
<i>Rhizopus arrhizus</i>	Usa o Hg, Pb, Ag e Cd
<i>Alcaligenes faecalis</i>	Pb, Hg e Cd
<i>Ganoderma applantus</i>	Usa Pb, Cu, Hg
<i>Arthrobacter sp. e Acinetobacter sp.</i>	Remove o Cr
<i>Clostridium spp., Escherichia spp., Pseudomonas spp. e Bacillus spp</i>	Biometilação de Hg, Se e Pb em metal metilado-gasoso
<i>Bacillus subtilis e B. megaterium</i>	Diminui a concentração de Cd
<i>G. sulfurreducens e G. metallireducens</i>	Converte o Cr para um nível não nocivo
<i>P. putida Rhizobium leguminosarum</i>	Sequestro intracelular de íons de Cu, Zn e Cd

**Fonte:** Abdullahi *et al.*, 2021.

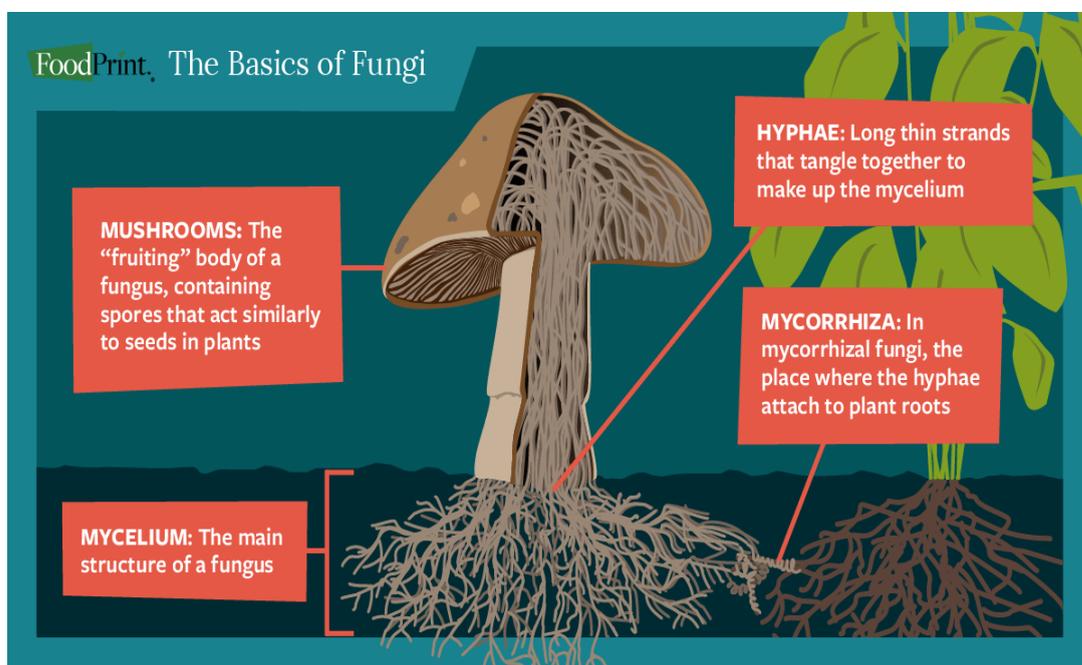
### c) Micorremediação

A **micorremediação** no que lhe concerne, pode ser estimulada pela rizorremediação, e envolve o emprego de micélios de fungos para solos contaminados por metais pesados, com a finalidade de torná-los menos poluídos ou definitivamente descontaminados. O mecanismo de despoluição ocorre ao nível celular com a secreção de ácidos e fitoquelatinas que vão intervir na biodegradação dos metais pesados, o que favorece uma tolerância a esses poluentes presentes nos solos onde atuam e se desenvolvem. Também, essa capacidade de tolerar concentrações altas de metais pesados faz com que sejam considerados como bioacumuladores, além do mais, são usados na mobilização e na complexação de solos contaminados por metais pesados, e os tipos de cogumelos envolvidos nesses processos são: a *basidiomycota*, a *Boletus Agaricus*, a *Amanita*, a *Phellinus* e *Leccinum*, entre outras (Abdullahi *et al.*, 2021).

Enfim, os fungos mostram-se ecologicamente aceitáveis, são baratos, têm a capacidade de aclimatar-se em ambientes extremos, em matrizes complexas do solo

e participam da decomposição da matéria orgânica como a celulose. Todavia, o principal inconveniente encontra-se na demora do processo de remediação, além da seleção criteriosa e a disponibilidade das espécies responsáveis na recuperação de solos contaminados por metais pesados. A **Figura 10** e a **Tabela 5** apresentam respectivamente, a estrutura básica de um cogumelo e a ação de alguns fungos sobre determinados metais pesados.

**Figura 10:** Estrutura básica de um cogumelo



**Mushrooms** (Cogumelos): A parte “frutífera” de um fungo, contendo esporos, agem de forma semelhante às sementes de plantas.

**Mycelium** (Micélio): Estrutura principal de um fungo.

**Hyphae** (Hifas): Fios longos e finos que se entrelaçam para formar o micélio.

**Mycorrhiza** (Micorriza): Local onde as hifas de fungos ligam-se às raízes de plantas.

**Fonte:** Nargi, 2021.

**Tabela 5:** Fungos e suas respostas a metais pesados

<b>Fungos</b>	<b>Efeito sobre metais pesados</b>
<i>Coprinopsis atramentaria</i> <i>Rhizopus oryzae</i>	Bioacumulação de Cd
<i>Aspergillus sp.</i>	Remoção do Cr
<i>Candida sphaerica</i> e <i>Saccharomyces cerevisiae p. guilliermondii</i>	Remove o Pb, Fe e Zn
<i>Rhodotorula pilimanae</i> , <i>Rhodotorula mucilage</i> e <i>S. cerevisiae</i>	Bioconversão de Cr (VI) para Cr (III)
<i>Rhodotorula mucilaginoso</i>	Hg, Cu e Pb
<i>Bacillus megaterium</i>	Remoção de Ni

**Fonte:** Abdullahi *et al.*, 2021.

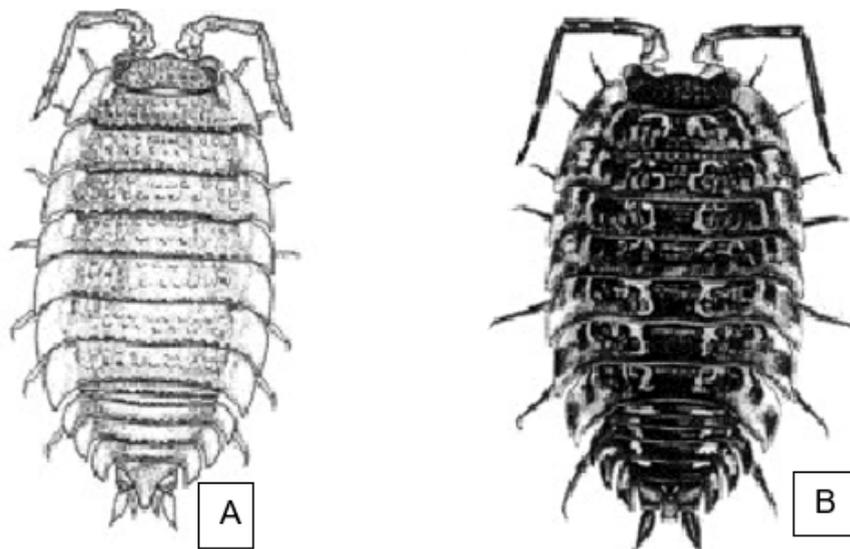
#### d) Bioacumulação

A **Bioacumulação** consiste na utilização de organismos que têm a habilidade natural de acumular e de estocar os metais pesados (Cu, Zn, Pb, Cd) no hepatopâncreas (órgão digestivo) deles, além de tolerar altas concentrações desses metais em solos contaminados (Paoletti e Hassall, 1999). Por outro lado, os metais pesados ingeridos e acumulados em células especializadas do hepatopâncreas são transformados através de processos bioquímicos numa forma insolúvel e separados do resto do metabolismo celular desses organismos (Prosi *et al.*, 1983). Os oligoquetos, os diplópodes e os isópodos, fazem parte de um grupo diverso de crustáceos terrestres, com milhares de espécies conhecidas e localizam-se em ambientes muito variados, como os tropicais, temperados, desérticos, montanhosos, entre outros (Ferreira, 2010).

Por fim, a abundância e a boa repartição desses organismos constituem uma das forças dessa técnica remediadora, onde foram registradas, descritas e caracterizadas umas centenas de espécies, além de representar um componente

essencial no equilíbrio ecológico, sem risco ao meio ambiente e barata. Os bioacumuladores envolvidos neste processo são: o *Porcellio dilatatus*, o *Porcellio scaber*, o *Porcellio spinicornis*, entre outras espécies mais comuns (Paoletti e Hassall, 1999). Por outro lado, a demora na recuperação de solos contaminados e a disponibilidade suficiente desses bioacumuladores, representam umas das limitações no processo de remediação. A **Figura 11** ilustra as espécies *Porcellio scaber* e *spinicornis*.

**Figura 11:** Alguns exemplos de bioacumuladores



Porcellio scaber (A); Porcellio spinicornis (B)

**Fonte:** Adaptada de Paoletti e Hassal, 1999.

A biorremediação apesar de mostrar-se eficiente a longo prazo e barato, não apresentou ainda grande interesse do ponto de vista do seu uso na recuperação de solos contaminados por metais pesados em áreas de mineração no Brasil.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A mineração de um modo geral representa uma das atividades antrópicas que contribui no impacto ambiental, desde os tempos da revolução industrial com a busca de matérias primas, usadas no processo de manufatura de bens de consumo. Neste contexto, surgiu uma demanda explosiva no período pós-guerra por metais pesados devido às suas aplicabilidades tecnológicas, em particular nas indústrias automotivas, eletrônicas, energéticas, aeronáuticas, agrícolas, de construções, entre outras.

Em contrapartida, apesar da grande contribuição desses elementos químicos pesados no avanço tecnológico da civilização, os processos extrativos envolvidos nas atividades produtivas, vem levando a uma série de questionamentos. Considerando os danos ambientais associados à mineração desses metais pesados, como a contaminação das águas, dos solos, dos ecossistemas aquáticos, da cadeia trófica, faz-se necessário a existência de diversos incentivos, conscientização e normas ambientais que regulam e acompanhem o desenvolvimento de tais atividades, a fim de garantir um futuro melhor e sustentável para todos.

Existem algumas medidas que poderiam ser empregadas durante as operações mineiras com o intuito de mitigar os danos causados na região de interesse, são essas: o descarte ou a disposição correta das pilhas de rejeitos/estéreis, de resíduos, a adequação dos projetos à legislação ambiental, o aumento da rigidez nos parâmetros de segurança, a criação de protocolos de emergência, entre outras.

Por outro lado, a recuperação de solos contaminados por metais pesados, tem a finalidade de promover o restabelecimento das condições ambientais alteradas durante a mineração. Favorecendo desse modo, a restauração da qualidade não só dos solos poluídos, mas também das águas cujas condições físico-químicas encontram-se alteradas pelo fenômeno de Drenagem Ácida de Mina – DAM.

O fenômeno de DAM representa uma das causas severas de contaminação de solos e águas em áreas de mineração de sulfetos ou minérios associados a sulfetos. Podendo ser facilitado pela exposição em pilhas de rejeito ou estéril, de material rico em sulfetos (pirita, arsenopirita, calcopirita, etc.), submetido às condições atmosféricas (oxigênio do ar, chuva, temperatura, etc.), originando dessa forma, as águas ácidas carregadas de elementos químicos pesados solubilizados e

participando posteriormente da contaminação de solos, são esses contaminantes: As, Cd, Cu, Pb, Ni, Al, Cr, Hg, Mn, Zn.

Existe na atualidade os procedimentos de gerenciamento e de recuperação de solos poluídos por metais pesados no Brasil. Os processos envolvidos na rota de gerenciamento desses solos poluídos, subdividem-se em: processos de identificação e de reabilitação de áreas (solos) contaminadas. As técnicas remediadoras neste estudo, quanto a elas, foram classificadas em: técnicas de remediações convencionais e biológicas. As primeiras podem ser consideradas como práticas efetivas e com resultados obtidos a curto ou médio prazo, apesar das suas limitações diversas, associadas principalmente com o custo alto e a tecnicidade específica de seu uso. Alternativamente, as técnicas biorremediadoras, cujas medidas remediadoras apresentaram-se mais demoradas, comparativamente com as medidas tradicionais descritas, porém, com um custo baixo, mais ecológico, sustentável e acessível. Por esta razão, mereceriam mais atenção e investimento quanto a sua aplicabilidade por parte de todos os envolvidos, em especial sobre a questão ambiental.

Por fim, os métodos usados na recuperação de solos contaminados por metais pesados, apresentados nos estudos de casos, foram principalmente inspirados nas técnicas de remediação mais costumeiras. Entre outras, destacaram-se: a estabilização química dos poluentes, a neutralização e a contenção/isolamento da área (solos) contaminada. A escolha dessas técnicas em particular, pode ser explicada pela praticidade e funcionalidade a curto ou médio prazo, adotadas para recuperação de passivos ambientais apresentados. Apesar do pouco uso de medidas biológicas na remediação de solos contaminados por metais pesados em áreas de mineração no Brasil, isto não deveria impedir que tais medidas sejam implementadas, haja vista que desenvolvimento sustentável é um imperativo global para as novas tecnologias e os processos biológicos para recuperação de solos poluídos por metais pesados encaixam-se perfeitamente neste contexto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULLAHI, U. A.; KHANDAKER, M. M.; ALIAS, N.; SHAARI, N. E. **Biological Processes of Heavy Metals - Contaminated Environmental Remediation: A Review**. Researchgate, vol. 9, 15 maio 2021. p. 601-608.

ARÁUJO, J. B. S.; PINTO FILHO.; OLIVEIRA, J. L. D. **Identificação de fontes poluidoras de metais pesados nos solos de bacia hidrográfica do Rio Apodi-Mossoró/RN, na área urbana de Mossoró-RN**. Revista Verde, Mossoró, RN, abril/junho, 2010. p. 80-94.

BARROS, J. N. **Especialização em Mineração e Meio Ambiente: Legislação Ambiental Aplicada à Mineração**. Cruz das Almas, Bahia, 2017. 86 p.

BITENCOURT, D. G. B.; PINTO, L. F. S.; PAULETTO, E. A.; SILVA, M. T.; GARCIA, G. F. **Geração de drenagem ácida e de contaminação por metais pesados em perfis de solos construídos em área de mineração de carvão**. R. Bras. Ci. Solo, 21 julho 2015. p. 1821-1834.

BLOWES, D. W.; JAMBOR, J. L.; HANTON-FONG, C. J. **Geochemical, mineralogical and microbiological characterization of a sulphide-bearing carbonate-rich gold-mine tailings impoundment, Joutel, Quebec**. Applied Geochemistry, 13, 1998. p. 687-705.

BRASIL. **2º Relatório de Monitoramento dos Indicadores Ambientais da Bacia Carbonífera**. 2008. Disponível em: <https://www.mpf.mp.br/sc/municipios/criciuma/arquivo-carvao/Segundo-Relatorio-Indicadores.ppt>. Acesso em: 17 abril 2023.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/constituicao/constituicao.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm). Acesso em: 13 abril 2023.

BRASIL. **Decreto Nº 97.632, de 10 de abril de 1989**. 1989. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1989/decreto-97632-10-abril-1989-448270-publicacaooriginal-1-pe.html>. Acesso em: 18 abril 2023.

BRASIL. **Portaria MS nº 518/2004**. 2004. Disponível em: [https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/portaria\\_518\\_2004.pdf](https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/portaria_518_2004.pdf). Acesso em: 17 abril 2023.

BRASIL. **Resolução Nº 420, de 28 de dezembro de 2009**. 2009. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/wp-content/uploads/sites/17/2017/09/re-solucao-conama-420-2009-gerenciamento-de-ac-s.pdf>. Acesso em: 17 abril 2023.

BRASIL. **Programa Nacional de Recuperação de Áreas Contaminadas**[livro eletrônico]: agenda nacional de qualidade ambiental urbana: eixo: áreas contaminadas / [coordenação André Luiz Felisberto França, Luiz Gustavo Gallo Vilela]. -- Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2020. PDF 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/agenda-ambientalurbana/recuperacao-de-areas-contaminadas/ProgramaNacionaldeRecuperacao-de-areasContaminadas.pdf>. Acesso em: 13 abril 2023.

COSTA, C. N.; VENDAS, D. F.; BRITO, G. M.; LOPES, M.; CAMELO, A. **Solos Contaminados - O Problema e as Soluções de Remediação**. Researchgate, abril 2015. p. 1-86. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/289980151\\_Solos\\_Contaminados\\_-\\_O\\_Problema\\_e\\_as\\_Solucoes\\_de\\_Remediacao](https://www.researchgate.net/publication/289980151_Solos_Contaminados_-_O_Problema_e_as_Solucoes_de_Remediacao). Acesso em: 27 março 2023.

DUDKA, S.; ADRIANO, D. C. **Environmental impacts of metal ore mining and processing: A review**. Journal of Environmental Quality 26: p. 590-602, 1997.

ESTRELA, M. A.; CHAVES, L. H. G.; SILVA, L. N. **Fitorremediação como solução para solos contaminados por metais pesados**. Revista Ceuma Perspectivas, vol. 31, 2018. p. 160-172.

FARIAS, T. **Obrigação de recuperar áreas degradadas por mineração tem contornos peculiares**. 2016. Disponível em: <https://www.conjur.com.br/2016-set-10/ambiente-juridico-obrigacao-recuperar-areas-mineracao-contornos-peculiares>. Acesso em: 27 março 2023.

FAVAS, P.; PRATAS, J.; MAYANK, V.; D'SOUZA, R.; PAUL, M. S. **Phytoremediation of Soils Contaminated with Metals and Metalloids at Mining Areas: Potential of Native Flora**. ResearchGate, março 2014. p. 485-517.

FERREIRA, A. F. F. **Utilização de persulfato de sódio para tratamento de água subterrânea contaminada por mistura de diesel e biodiesel**. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

FERREIRA, A. Q. **Os isópodes terrestres são boas ferramentas para monitorar e restaurar áreas impactadas por metais pesados no Brasil?** ResearchGate, 03 junhos 2010. p. 569-583. Disponível em:

[https://www.researchgate.net/publication/250388903\\_OS\\_ISOPODOS\\_TERRESTRES\\_SAO\\_BOAS\\_FERRAMENTAS\\_PARA\\_MONITORAR\\_E\\_RESTAURAR\\_AREAS\\_IMPACTADAS\\_POR\\_METAIS\\_PESADOS\\_NO\\_BRASIL](https://www.researchgate.net/publication/250388903_OS_ISOPODOS_TERRESTRES_SAO_BOAS_FERRAMENTAS_PARA_MONITORAR_E_RESTAURAR_AREAS_IMPACTADAS_POR_METAIS_PESADOS_NO_BRASIL). Acesso em: 25 novembro 2021.

FLORES, J. C. C.; LIMA, H. M. **Fechamento de Mina: Aspectos Técnicos, Jurídicos e Socioambientais**. Ouro Preto: Editora UFOP, 2012. 316 p.

FUNGARO, D. A.; IZIDORO, J. C. **Remediação de drenagem ácida de mina usando zeólitas sintetizadas a partir de cinzas leves de carvão**. Quim. Nova, São Paulo, 29, 18 abril, 2006. p. 735-740.

GOUMA, S.; FRAGOEIRO, S.; BASTOS, A. C.; MAGAN, N. **Bacterial and Fungal Bioremediation Strategies**. ResearchGate, dezembro 2014. p. 301-323.

JAISHANKAR, M.; TSETEN, T.; ANBALAGAN, N.; MATHEW, B. B.; BEEREGOWDA, K. N. **Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals**. Interdisciplinary toxicology. Kamataka, Índia, vol. 7, 26 junho 2014. p. 60-72.

DIAS, D. L. **Metais pesados**. Mundo Educação, 2021. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/metais-pesados.htm>. Acesso em: 27 março 2023.

MARTINS, C. M. **Rastreamento geoquímico de possíveis contaminações remanescentes de mineração de pirita no município de Ouro Preto, quadrilátero ferrífero, Minas Gerais**. Tese de Mestrado nº 233 – Engenharia Geológica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, 2005.

MATEC INDUSTRIES. **Lavagem de Solos - Remediação de Solos Contaminados**. 2021. Disponível em: <https://www.matecindustries.com/pt-pt/lavagem-de-solos-remediacao-de-solos-contaminados/>. Acesso em: 27 março 2023.

MELLO, J.; DIAS, L.; CORRÊA, M. L.T. **Drenagem ácida: Avaliação do potencial de ocorrência, mitigação e revegetação de substratos sulfetados**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Vol. III, janeiro 2003. p. 401-430.

MELLO, J. W. V.; DUARTE, H. A.; LADEIRA, A. C. Q. **Origem e controle do fenômeno drenagem ácida de mina**. Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola, maio 2014. p. 24-29.

MENEZES, C. T. B.; CENI, G.; MARTINS, M. C.; VIRTUOSO, J. C. **Percepção de impactos socioambientais e a gestão costeira**: Estudo de caso de pescadores no litoral Sul de Santa Catarina, Brasil. ResearchGate, setembro 2019. p. 457-481.

MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa COPAM nº116, de 27 de junho de 2008**. 2008. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=7974>. Acesso em: 27 março 2023.

MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa COPAM nº116, de 29 de junho de 2011**. 2011. Disponível em: <https://geosam.com.br/wp-content/uploads/2021/08/COPAM-166-2011-Altera-a-02-2010.pdf>. Acesso em: 27 março 2023.

MINAS GERAIS. **Gestão de áreas contaminadas no Estado de Minas Gerais**. 2019. Disponível em: [http://sistemas.meioambiente.mg.gov.br/reunioes/uploads/M5V\\_ujRhS4UF1TUH0X0yzRUgqDoiTwIO.pdf](http://sistemas.meioambiente.mg.gov.br/reunioes/uploads/M5V_ujRhS4UF1TUH0X0yzRUgqDoiTwIO.pdf). Acesso em: 16 abril 2023.

NARGI, L. **What are Fungi, and what do they have to do with. Everything ?** FoodPrint, 19 abril 2021. Disponível em: <https://foodprint.org/blog/fungi/>. Acesso em: 27 março 2023.

ONU. **What are the Sustainable Development Goals?** UNDP.ORG, 2015. Disponível em: [https://www.undp.org/sustainable-development-goals?utm\\_source=EN&utm\\_medium=GSR&utm\\_content=US\\_UNDP\\_PaidSearch\\_Brand\\_English&utm\\_campaign=CENTRAL&c\\_src=CENTRAL&c\\_src2=GSR&gclid=CjwKCAjw\\_YShBhAiEiwAMomsEGBMxrS\\_HOTa7rKZ8QZgOguu4Ysl5eQb9GkUzV6lJv3EakG54\\_SmSh](https://www.undp.org/sustainable-development-goals?utm_source=EN&utm_medium=GSR&utm_content=US_UNDP_PaidSearch_Brand_English&utm_campaign=CENTRAL&c_src=CENTRAL&c_src2=GSR&gclid=CjwKCAjw_YShBhAiEiwAMomsEGBMxrS_HOTa7rKZ8QZgOguu4Ysl5eQb9GkUzV6lJv3EakG54_SmSh). Acesso em: 04 outubro 2022.

PAOLETTI, M. G.; HASSALL, M. **Woodlice (Isopoda: Oniscidea)**: Their potential for assessing sustainability and use as bioindicators. Elsevier, 1999. p. 157-165.

PIRES, F. R.; SOUZA, C. M.; SILVA, A. A.; PROCÓPIO, S. O.; FERREIRA, L. R. **Fitorremediação de Solos Contaminados com Herbicidas**. Planta Daninha, Viçosa, Minas Gerais, vol. 21, 2003. p. 335-341.

PROSI, F.; STORCH, V.; JANSSEN, H. H. **Small cells in the midgut glands of terrestrial isopoda**: Sites of heavy metal accumulation. Zoomorphology, 1983. p. 53-64.

ROBINSON, B.; FERNANDEZ, J. E.; MADEJÓN, P.; MARAÑHÓN, T.; MURILLO, J. M.; GREEN, S.; BRENT, C. **Phytoextraction**: An assessment of biogeochemical and economic viability. *Plant and Soil*, v.249, 2003. p. 117-125.

ROJAS, J. W. J.; CONSOLI, N. C.; HEINECK, K. S. **Análise do comportamento físico de um solo contaminado por borra oleosa ácida e encapsulado com cimento portland**. *Eng. sanit. ambient.*, abril/junho 2008. p. 217-225.

SANTOS, J. A. G. **Especialização em Mineração e Meio Ambiente**: Recuperação e Reabilitação de Áreas Degradadas pela Mineração. Cruz das Almas, Bahia, 2017. 44 p.

SÃO PAULO. **Decisão de diretoria nº 125/2021/E, de 09 de dezembro de 2021**. 2021a. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2021/12/DD-125-2021-E-Atualizacao-dos-Valores-Orientadores-paa-solo-e-aguas-subterraneas.pdf>>. Acesso em: 27 março 2023.

SÃO PAULO. **Manual de gerenciamento de áreas contaminadas**. 2021b. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/documentacao/manual-de-gerenciamento-de-areas-contaminadas/>>. Acesso em: 27 março 2023.

SÃO PAULO. **Manual de Gerenciamento de áreas Contaminadas**. Projeto CETESB – GTZ Cooperação Técnica Brasil – Alemanha. 2. Ed. 1999. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/documentacao/manual-de-gerenciamento-de-areas-contaminadas/>>. Acesso em: 11 dezembro 2021.

SINGER, PHILIP C.; STUMM, WERNER. **Acid mine drainage**: The Rate-Determining Step. *Science*, Washington, DC, vol. 167, 20 fevereiro 1970. p. 1121-1123.

SINHA, T. **A Review on Phytoremediation Technology and Effect of Synthetic Chelates in Lead Phytoextraction**. ResearchGate, 2019. Disponível em: <(PDF) [A Review on Phytoremediation Technology and Effect of Synthetic Chelates in Lead Phytoextraction \(researchgate.net\)](#)>. Acesso em: 26 novembro 2021.

SOUTHGATE, E. F. **Avaliação da Técnica de Lavagem de Solo Associada à Biorremediação para Tratamento de um Solo Contaminado com Metais**

**Pesados e Hidrocarbonetos de Petróleo.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

SPONCHIADO, M. A. **Você sabe o que é o PRAD?** 2020. Disponível em: <  
<https://www.minasbioconsultoria.com/post/voc%C3%AA-sabe-o-que-%C3%A9-o-prad>>. Acesso em: 27 março 2023.

TEKERE, M. **Microbial Bioremediation and Different Bioreactors Designs Applied.** IntechOpen, outubro 2019. p. 1-19.