



**CENTRO UNIVERSITÁRIO DE LAVRAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM DIREITO**

**INGRID FERNANDA SANTANA ALVARENGA**

**A LEGISLAÇÃO BRASILEIRA ESTAVA PREPARADA PARA OS DESASTRES  
AMBIENTAIS DOS ROMPIMENTOS DAS BARRAGENS DE MINERAÇÃO? UMA  
ABORDAGEM EM RELAÇÃO AO ARSÊNIO.**

**LAVRAS- MG**

**2023**

**INGRID FERNANDA SANTANA ALVARENGA**

**A LEGISLAÇÃO BRASILEIRA ESTAVA PREPARADA PARA OS DESASTRES  
AMBIENTAIS DOS ROMPIMENTOS DAS BARRAGENS DE MINERAÇÃO? UMA  
ABORDAGEM EM RELAÇÃO AO ARSÊNIO.**

Monografia apresentada ao Centro  
Universitário de Lavras, como parte das  
exigências do curso de Bacharelado em  
Direito.

Orientador: Prof. Dr. Renê Moraes Da Costa  
Braga

**LAVRAS- MG**

**2023**

Ficha Catalográfica preparada pelo Setor de Processamento Técnico  
da Biblioteca Central do UNILAVRAS

A4731 Alvarenga, Ingrid Fernanda Santana.  
A legislação brasileira estava preparada para os desastres ambientais dos rompimentos das barragens de mineração? Uma abordagem em relação ao arsênio / Ingrid Fernanda Santana Alvarenga – Lavras: Unilavras, 2023.

46f.:il.

Monografia (Graduação em Direito) – Unilavras, Lavras, 2023.

Orientador: Prof. Renê Moraes da Costa Braga.

1. Direito minerário. 2. Legislação ambiental. 3. Elementos potencialmente tóxicos. I. Braga, Renê Moraes da Costa. (Orient.). II. Título.

**INGRID FERNANDA SANTANA ALVARENGA**

**A LEGISLAÇÃO BRASILEIRA ESTAVA PREPARADA PARA OS DESASTRES  
AMBIENTAIS DOS ROMPIMENTOS DAS BARRAGENS DE MINERAÇÃO? UMA  
ABORDAGEM EM RELAÇÃO AO ARSÊNIO.**

Monografia apresentada ao Centro  
Universitário de Lavras, como parte das  
exigências do curso de Bacharelado em  
Direito.

APROVADO EM: 22/06/2023

**ORIENTADOR**

Prof. Dr. Prof. Renê Moraes Da Costa Braga / UNILAVRAS

**MEMBRO DA BANCA**

Prof. Pós-Dr Denilson Victor Machado Teixeira / UNILAVRAS

**LAVRAS- MG**

**2023**

*À dona do meu maior  
amor, minha irmã, Ismênia  
Dedico.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus e Nossa Senhora Aparecida, mentores em minha vida, por me guiarem e por todas as oportunidades concedidas e por colocar em meus caminhos pessoas tão especiais que me auxiliaram nessa etapa.

Aos meus pais Reinaldo e Elaine, pelo exemplo de caráter, por serem fontes inesgotáveis de amor e meus melhores amigos. Por acreditarem nos meus sonhos, me incentivando e mostrando o caminho correto para realizá-los. Vocês ensinaram a minha irmã e a mim o verdadeiro significado de família e esse é o maior tesouro que poderíamos ter!

A minha irmã Ismênia, a quem eu amo mais que a mim mesma e esse amor me motiva a tentar a ser uma pessoa melhor todos os dias.

Não posso deixar de agradecer também os ensinamentos e lições aprendidas com todos os professores da Instituição Unilavras, sobretudo ao meu orientador, Professor Renê Moraes Da Costa Braga, que muito me auxiliou na jornada acadêmica, bem como no trabalho de orientação e correção deste trabalho.

Aos membros da banca, por aceitarem o convite de avaliar e contribuir com este trabalho.

Aos colegas dessa jornada e que se transformaram em verdadeiras amizades: Iasmim, Fernanda e Dudda! Fizeram o caminho mais leve e pretendo levá-las para o resto da vida.

Afinal de contas, a todos aqueles que contribuíram de alguma forma, fica aqui o meu agradecimento.

## RESUMO

**Introdução:** O Brasil é um dos principais países no setor de mineração no mundo e essa atividade tem papel importante no desenvolvimento econômico e social do país. Apesar da grande geração de renda, as atividades de mineração impactam direta e indiretamente a paisagem, além da liberação de elementos potencialmente tóxicos (As). Por exemplo, dois grandes desastres ambientais envolvendo barragem de mineração (Mariana e Brumadinho). As políticas públicas e legislações ambientais e minerárias estão em constante evolução, no entanto, precisa de monitoramento da sua real aplicabilidade.

**Objetivo:** É imprescindível avaliar o setor de mineração no Brasil, os principais desastres de rompimentos de barragem de mineração em Minas Gerais e, além disso, os danos pela exposição do Arsênio. E, com isso, objetivou-se estudar o histórico da legislação para Arsênio no Brasil e se houve avanço no ordenamento jurídico no tocante a valores orientadores para As e no direito minerário.

**Metodologia:** A metodologia utilizada foi de revisão bibliográfica, no entanto, foram buscando dados, no Google acadêmico, Scielo, entre outros. **Conclusão:** Pode-se dizer que a ruptura das barragens de contenção de rejeitos Fundão, em 2015, e B1, em 2019, expuseram diversas falhas na gestão de segurança e emergência dessas estruturas, por parte por atores públicos e privados, e um grande processo de mudança legislativa e regulatória foi iniciado. Vale ressaltar que, como os desastres foram reincidentes, demonstra que a capacidade preditiva e o aprendizado político e institucional que as mudanças regulatórias trouxeram não foram suficientes. E sobre o As, apesar de já haver uma legislação vigente sobre a regulamentação e segurança em solos, água e alimentos, vimos que tal legislação é obsoleta e não possui aplicabilidade frente a desastres ambientais (em que maiores concentrações desse elemento podem ser liberadas ao meio). Desta forma, essas catástrofes precisam servir de aprendizados, e resultarem em melhorias legislativas no estabelecimento de novas normativas e na fiscalização para que sejam cumpridas.

**Palavras-chave:** Direito Minerário; Legislação Ambiental; Elementos Potencialmente Tóxicos.

## ABSTRAT

**Introduction:** Brazil is one of the main countries in the mining sector in the world and this activity plays an important role in the economic and social development of the country. Despite the large income generation, mining activities directly and indirectly impact the landscape, in addition to releasing potentially toxic elements (As). For example, two major environmental disasters involving mining dams (Mariana and Brumadinho). Public policies and environmental and mining legislation are constantly evolving, however, their real applicability needs to be monitored. **Objective:** It is essential to evaluate the mining sector in Brazil, the main mining dam failures in Minas Gerais and, in addition, the damage caused by exposure to Arsenic. And, with that, the objective was to study the history of legislation for Arsenic in Brazil and if there was progress in the legal system regarding guiding values for As and in mining law. **Methodology:** The methodology used was a bibliographical review, however, data were sought in academic Google, Scielo, among others. **Conclusion:** It can be said that the rupture of the Fundão tailings containment dams, in 2015, and B1, in 2019, exposed several failures in the safety and emergency management of these structures, by public and private actors, and a great process of legislative and regulatory change has been initiated. It is worth mentioning that, as the disasters were recurrent, it demonstrates that the predictive capacity and the political and institutional learning that the regulatory changes brought were not enough. And about As, although there is already legislation in force on the regulation and safety of soil, water and food, we saw that such legislation is obsolete and does not have applicability in the face of environmental disasters (in which higher concentrations of this element can be released into the environment). In this way, these catastrophes need to serve as lessons learned, and result in legislative improvements in the establishment of new regulations and in the inspection so that they are complied with.

**Keywords:** Mining Law; Environmental legislation; Potentially Toxic Elements.

## LISTA DE SIGLAS

Al	Alumínio
As	Arsênio
ATSDR	Agência de Registro de Substâncias Tóxicas e Doenças dos EUA
Cd	Cádmio
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
Cr	Cromo
Cu	Cobre
DNPM	Departamento Nacional de Pesquisa Mineral
EPTs	Elementos Potencialmente Tóxicos
Fe	Ferro
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
Hg	Mercúrio
IARC	Agência Internacional de Pesquisa em Câncer
IBRAM	Instituto Brasileiro de Museus
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
Mn	Manganês
Ni	Níquel
Pb	Chumbo
PSB	Plano de Segurança de Barragem
SIGBM	Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
U	Urânio
VI	Valor de Investigação
VP	Valor de Prevenção
VRQ	Valore de Referência de Qualidade
Zn	Zinco

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>9</b>
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>11</b>
2.1 SETOR DE MINERAÇÃO NO BRASIL .....	11
2.2 MINERAÇÃO NO BRASIL – LEGAL E ILEGAL .....	12
2.3 BARRAGENS DE MINERAÇÃO CADASTRADAS NO BRASIL .....	13
2.4 ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO MARIANA (MG).....	16
2.5 ROMPIMENTO DA BARRAGEM DA MINA CÓRREGO DO FEIJÃO EM BRUMADINHO-MG .....	17
2.6 ARSÊNIO .....	20
<b>2.6.1 Arsênio no solo</b> .....	<b>20</b>
2.7 LEGISLAÇÃO DO ARSÊNIO NO BRASIL .....	22
<b>2.7.1 Evolução histórica</b> .....	<b>22</b>
<b>2.7.2 Legislação sobre arsênio no solo no Brasil</b> .....	<b>23</b>
<b>2.7.3 Legislação sobre arsênio em águas e sedimentos no Brasil</b> .....	<b>25</b>
<b>2.7.4 Legislação sobre arsênio em agroquímicos no Brasil</b> .....	<b>26</b>
<b>2.7.5 Legislação sobre arsênio e risco à saúde humana no Brasil</b> .....	<b>26</b>
<b>2.7.6 Evolução legislativa sobre a elemento arsênio no Brasil</b> .....	<b>27</b>
2.8 EM DECORRÊNCIA DOS DESASTRES COM AS BARRAGENS DE MINERAÇÃO E OS RISCOS DO AS, HOUVE AVANÇOS?.....	28
<b>2.8.1 Avaliação de políticas ambientais</b> .....	<b>28</b>
<b>2.8.2 Panorama sobre segurança de barragens</b> .....	<b>30</b>
<b>3 CONSIDERAÇÕES GERAIS</b> .....	<b>33</b>
<b>4 CONCLUSÃO</b> .....	<b>35</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>36</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos principais países no setor de mineração no mundo e essa atividade tem papel importante no desenvolvimento econômico e social do país. Em 2018, o Brasil exportou mais de 409 milhões de toneladas de bens minerais, o que representa 12,5% das suas exportações totais, e gerou um saldo de US\$ FOB 29,9 bilhões (IBRAM, 2019). A indústria extrativa mineral representa 1,4% de todo o PIB brasileiro (IBGE, 2019) e emprega diretamente cerca de 195 mil trabalhadores (IBRAM, 2019).

Apesar da grande geração de renda, as atividades de mineração impactam direta e indiretamente a paisagem, o solo e a população local. O processo de mineração de Fe mais comum no Brasil é o método de lavra a céu aberto. Dentre os métodos mais utilizados na disposição de rejeitos de mineração, a mais barata é a construção de barragens de rejeitos alteadas pelo método à montante (CARMO et al., 2017). Embora seja um dos métodos mais utilizados e mais econômicos, a barragem alteada à montante apresenta grandes riscos à segurança. No Brasil, existem 842 barragens de mineração cadastradas no Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens de Mineração (SIGBM) e, destas, 51,5% se enquadram para serem contempladas pela Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), ou seja, possuem que protocolos de fiscalização mais restritivos.

A preocupação com a segurança das barragens de mineração possui fundamentos, uma vez que no Quadrilátero Ferrífero, ocorreram dois grandes desastres ambientais envolvendo barragem de mineração de Fe, em 5 de novembro de 2015 na barragem de Fundão, localizada na cidade de Mariana, e em 25 de janeiro de 2019 na barragem da Mina Córrego do Feijão, na cidade de Brumadinho. Além desses eventos, em áreas próximas a mineração de ouro, na cidade de Paracatu, os solos e as águas do Córrego Rico apresentaram altos teores de As.

O Brasil, já adota medidas legislativas para teores máximos e seguros de Arsênio no solo e água, através da Deliberação Normativa CONAMA 420/2009, os órgãos ambientais dos respectivos estados brasileiros são responsáveis pelo estabelecimento de tais valores. No entanto, alguns estados ainda adotam a Normativa do CONAMA

enquanto outros já estabeleceram seus valores, como verificado para o Estado de Minas Gerais, que apresenta regiões particulares (Quadrilátero Ferrífero, por exemplo) com frações máximas anômalas de As no solo. (CAMPOS et al., 2007). Mas ainda muitos estados ainda não estabeleceram seus valores orientadores para As. Por isso, pela legislação já existente, ainda carece de um esforço maior para determinar valores regulamentadores para As e assim para poder estabelecer medidas públicas eficientes.

As políticas públicas e legislações ambientais e minerárias estão em constante evolução, no entanto, precisa de monitoramento da sua real aplicabilidade. Todavia, o Estado nem sempre tem capacidade ou motivação para monitorar tais políticas, de modo a prevenir problemas e promover melhorias. Em alguns casos, as melhorias das políticas ambientais dão-se em reação a desastres, que expõe, de forma súbita e contundente, problemas pré-existentes.

Por isso, é imprescindível avaliar o setor de mineração no Brasil, os principais desastres de rompimentos de barragem de mineração em Minas Gerais e, além disso, os danos pela exposição do Arsênio. E, com isso, objetivou-se estudar o histórico da legislação para Arsênio no Brasil e se houve avanço no ordenamento jurídico no tocante a valores orientadores para As e no direito minerário.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 SETOR DE MINERAÇÃO NO BRASIL

O Brasil é um dos principais países no setor de mineração no mundo e essa atividade tem papel importante no desenvolvimento econômico e social do país. Em 2018, o Brasil exportou mais de 409 milhões de toneladas de bens minerais, o que representa 12,5% das suas exportações totais, e gerou um saldo de US\$ FOB 29,9 bilhões (IBRAM, 2019). A indústria extrativa mineral representa 1,4% de todo o PIB brasileiro (IBGE, 2019) e emprega diretamente cerca de 195 mil trabalhadores (IBRAM, 2019).

As substâncias metálicas representam cerca de 80% da produção mineral brasileira e a mineração de ferro (Fe) é uma das mais expressivas, com 69,9% do valor total da produção (ANM, 2020). As reservas brasileiras de minério de Fe são de mais de 33 bilhões de toneladas e representam 19,8% das reservas mundiais (ANM, 2018). Em 2018, a produção bruta nacional de minério de Fe foi de 568.733.022 toneladas, com teor médio de 55,83% de Fe (ANM, 2020). Os principais estados produtores de Fe são Minas Gerais e Pará, com 64,4% e 34,6% da produção, respectivamente (ANM, 2020).

Uma das áreas mais importantes de mineração está localizada no Quadrilátero Ferrífero (19°45' S e 20°30' S - 43°22'30" W e 44°7'30" W), no centro-sul do estado de Minas Gerais, no Sudeste do Brasil. A região de geologia Pré-Cambriana ocupa uma área de aproximadamente 7000 km<sup>2</sup> e abrange toda a região metropolitana de Belo Horizonte. Desde o final do século XVII, o Quadrilátero Ferrífero é marcado por atividades de extração de minério de ouro e ferro (AZEVEDO et al., 2012). Nesse período, o Brasil possuía a maior produção de ouro do mundo. No entanto, a região é destaque mundial na mineração de ferro, devido aos altos teores de ferro em seus minérios de Itabirito.

Apesar da grande geração de renda, as atividades de mineração impactam direta e indiretamente a paisagem, o solo e a população local. O processo de mineração de Fe é realizado pelo método de lavra a céu aberto e um dos métodos mais utilizados na construção de barragens de rejeitos é o aterro a montante (CARMO et al., 2017). Embora seja um dos métodos mais utilizados e mais econômicos, a barragem a montante

apresenta grandes riscos à segurança. No Brasil, existem 842 barragens de mineração cadastradas no Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens de Mineração (SIGBM) e apenas 51,5% estão dentro da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) (ANM, 2019), o que reforça a preocupação relacionada à instabilidade de barragens no país.

Além dos rompimentos de barragens, as próprias atividades de mineração, que envolvem processos de constante revolvimento de solo, podem potencializar os teores de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs) no meio ambiente. O ouro (Au) é a terceira substância metálica mais produzida no Brasil. A liberação de arsênio (As) no ambiente associado à extração e mineração de ouro é um problema de saúde para a população local, principalmente, nessa região. A região é conhecida por possuir áreas com ocorrência de teores de As em solos maiores do que aqueles reportados como valores médios para solos mundiais (BUNDSCHUH et al., 2020).

Dessa forma, a exploração mineral de ouro e de ferro no Quadrilátero Ferrífero causa grandes impactos nos ecossistemas. Por exemplo, nessa região, ocorreram dois grandes desastres ambientais envolvendo barragem de mineração de Fe, em 5 de novembro de 2015 na barragem de Fundão, localizada na cidade de Mariana, e em 25 de janeiro de 2019 na barragem da Mina Córrego do Feijão, na cidade de Brumadinho. Além desses eventos, em áreas próximas a mineração de ouro, na cidade de Paracatu, os solos e as águas do Córrego Rico apresentaram altos teores de As.

## 2.2 MINERAÇÃO NO BRASIL – LEGAL E ILEGAL

De acordo com o Serviço Geológico dos Estados Unidos (U.S. Geological Survey 2020), a produção global de ouro, em 2019, atingiu aproximadamente 3.300 toneladas métricas. A produção brasileira foi de 85 toneladas neste ano. As mineradoras nacionais extraíram cerca de 75% desse volume e o restante foi extraído por garimpeiros oficialmente credenciados (ANM, 2019b). No entanto, esses números não contabilizam a mineração ilegal. Por exemplo, um relatório publicado pela Rede Amazônica de Informações Socioambientais Georreferenciadas (2020), baseado em imagens de satélite, encontrou mais de 2300 locais de garimpo ilegal na Amazônia Internacional,

distribuídos no Brasil (321), Equador (68), Peru (24) e Venezuela (1899). A maior parte das áreas encontradas no Brasil está relacionada à extração de ouro (Rede de Informações Socioambientais Georreferenciadas da Amazônia, 2020).

As perdas decorrentes da subnotificação da mineração de ouro no Brasil vão além dos impactos econômicos. Ao contrário do credenciado oficialmente, o garimpo ilegal não atende à legislação ambiental. Assim, há grandes desafios no dimensionamento de possíveis riscos ambientais relacionados à mineração de ouro no Brasil, tanto em termos de desmatamento quanto de contaminação por EPT, como o **arsênio**.

### 2.3 BARRAGENS DE MINERAÇÃO CADASTRADAS NO BRASIL

Após 2015, com o rompimento da barragem de rejeitos da mineração de ferro (Barragem do Fundão) no município de Mariana, Estado de Minas Gerais, as barragens de mineração no Brasil devem ser monitoradas com mais rigor. Em 2019, com um novo desastre de barragem envolvendo o rompimento da barragem da mineração de ferro Córrego do Feijão, em Brumadinho, Minas Gerais, as discussões sobre a segurança das barragens de mineração no Brasil foram ampliadas. Embora desde 2010 o Brasil já tivesse uma lei que estabelecia o Plano Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, foi logo após o rompimento da Barragem de Fundão que o Governo Federal criou o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração e o Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração (SIGBM).

Dados oficiais de 2020 (ANM, 2020b) indicam a existência de cerca de 24 mil barragens cadastradas no Brasil, sendo 842 barragens de mineração. Destas se enquadram para serem contempladas no Plano Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) 440 barragens de mineração, ou seja, possuem que protocolos de fiscalização mais restritivos. A Figura 1 (abaixo) mostra a distribuição de 100 barragens de rejeitos de mineração de ouro distribuídas em oito Estados brasileiros de acordo com o método de construção (ANM, 2020b). Observa-se que o volume de rejeitos nas barragens da mineração de ouro varia de 5.000 m<sup>3</sup> a 400.000.000 m<sup>3</sup>. Para ser incluída na PNSB, a barragem deve apresentar pelo menos uma das seguintes características: I - altura, contada do ponto mais baixo da fundação até o ponto mais alto, maior ou igual a 15 m; II

- capacidade total do aterro maior ou igual a 3.000.000 m<sup>3</sup>; III - aterro contendo resíduos perigosos de acordo com as normas técnicas aplicáveis; IV - categoria de dano potencial associado, médio ou alto, de ordem econômica, social, ambiental ou perda de vidas humanas (ANM, 2020b).

Os dois maiores desastres de barragens no Brasil ocorreram em áreas de mineração de ferro, mas que devido a geogênese a o processo de extração pode liberar arsênio. Em ambos os casos, as barragens de rejeitos foram construídas pelo método de alteamento a montante, considerado mais barato, porém menos seguro. Devido a esses eventos e inconsistências quanto à segurança desse tipo de barragem, a Agência Nacional de Mineração proibiu a construção de novas barragens pelo método a montante, bem como determinou o descomissionamento das existentes (ANM, 2019a).

É bem conhecido que o material rochoso contendo ouro é geralmente associado ao arsênio (BOSSY et al., 2010; BUNDSCHUH et al., 2020; MEUNIER et al., 2010; ONO et al., 2012a). Existem 100 barragens de ouro catalogadas e, infelizmente, das barragens acima mencionadas, apenas algumas delas estão associadas a estudos de avaliação de contaminação por arsênio. Por exemplo, em Paracatu, foram relatados  $1891 \pm 773$  mg kg<sup>-1</sup> As na lama de rejeitos armazenada na barragem. No entanto, a bioacessibilidade foi considerada baixa (ONO et al., 2012a, 2012b). Há ainda outros estudos realizados na região do Quadrilátero Ferrífero, onde as jazidas de ouro apresentam rochas ricas em arsênio com relação As/Au variando de 300 a 3000. Nessas áreas, mais de 390 mil toneladas de As foram lançadas no ambiente, desde as primeiras extrações de ouro no século XVII (BORBA et al., 2003; VIAL., 1988). Portanto, considerando o número de barragens catalogadas associado ao número de garimpos autorizados e ilegais, há um grande desafio pela frente na coleta de informações sobre a potencial contaminação por arsênio, considerando apenas a atividade garimpeira.

Além de ampliar as informações sobre a ocorrência de arsênio em áreas de mineração, outra importante lacuna a ser preenchida refere-se à mineração de cobre. Atualmente existem 29 barragens cadastradas no país com atividade associada à mineração de cobre e que eventualmente podem estar relacionadas ao arsênio, como já foi observado em outros países (BUSTOS et al., 2015; DYBOWSKA et al., 2015; al., 2005; ANM, 2020). No Brasil, a maioria dos estudos encontrou alta correlação positiva entre

cobre e mercúrio. Foram registrados importantes ocorrências envolvendo arsênio e atividades de mineração, nas seguintes áreas: garimpo de ouro na região de Paracatu, em Minas Gerais; mineração de ouro e ferro na região do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais; Lavra, beneficiamento e refino de minério de Pb-Zn-Au, no Vale do Ribeira, nos Estados de São Paulo e Paraná; e mineração de manganês, no estado do Amapá, no norte do Brasil.

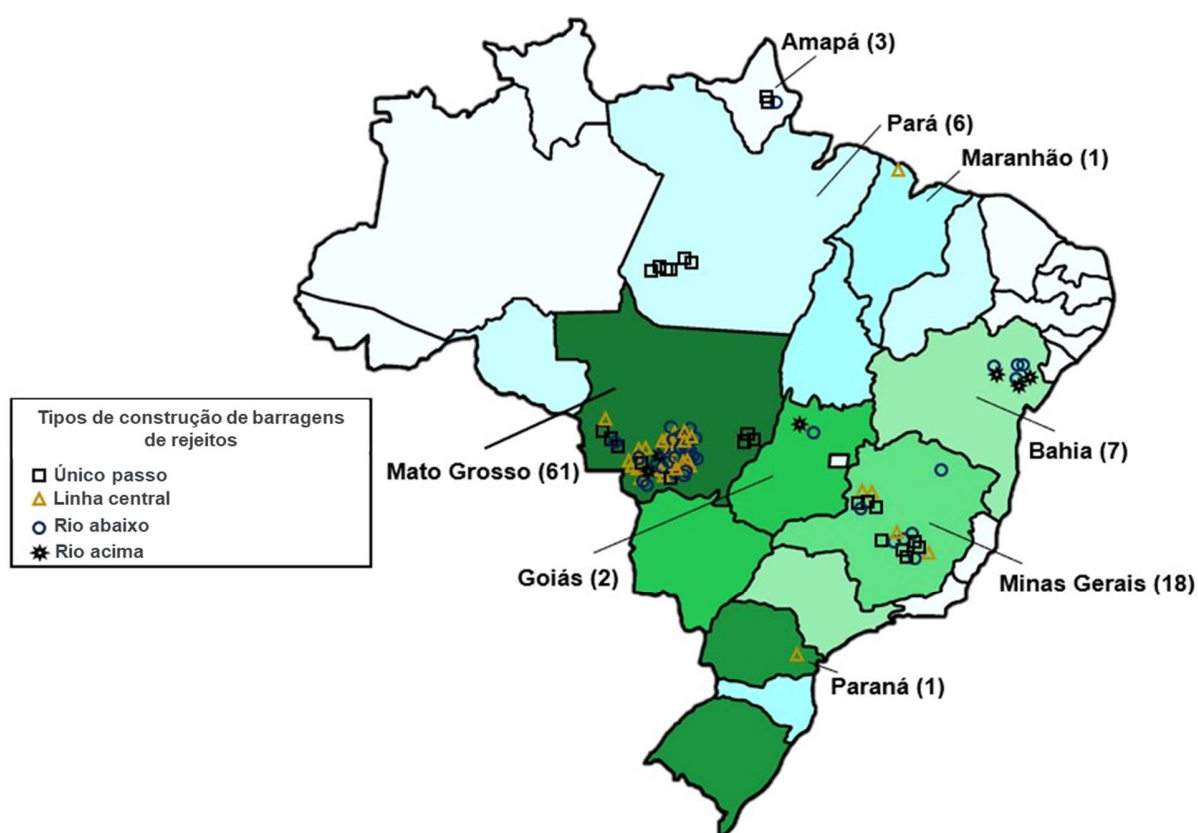


Figura 1 – Distribuição das barragens de rejeitos de mineração de ouro por estado no Brasil de acordo com a Agência Nacional de Mineração (ANM). (2023). Classificação Nacional de Barragens de Mineração. Os números entre parênteses representam o número atual de barragens cadastradas no Cadastro Brasileiro de Barragens de Rejeitos. Fonte: Autora, modificado. (<https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico/ClassificacaoNacionalDaBarragem>).

## 2.4 ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO MARIANA (MG)

O rompimento da barragem de Fundão em Mariana ocorreu em 5 de novembro de 2015 no subdistrito de Bento Rodrigues, a 35 km do centro do município brasileiro de Mariana. A barragem de Fundão localizava-se no complexo industrial, denominado Complexo da Alegria, no município de Mariana (MG). As consequências do rompimento, porém, não se limitaram ao município: os rejeitos liberados seguiram o curso dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce e desaguaram no Oceano Atlântico, litoral do Espírito Santo (ES), atingindo também o litoral sul da Bahia, gerando danos socioambientais por 663 km (PASSOS; COELHO; DIAS, 2017; ZONTA; TROCATE, 2016). Dentre os impactos socioambientais ocorridos estão: a morte de 19 pessoas entre trabalhadores contratados e subcontratados da Samarco e moradores de Bento Rodrigues (uma pessoa está desaparecida até o momento); 40 municípios atingidos entre MG e ES, dentre os quais 35 decretaram situação de emergência ou calamidade pública; mais de 1.200 pessoas ficaram desabrigadas; 1.469 ha de terras destruídas, incluindo Áreas de Proteção Permanente e Unidades de Conservação; o desequilíbrio da fauna e da flora ao longo dos cursos d'água atingidos; impacto na subsistência de comunidades tradicionais; impactos no abastecimento de água residencial em sete cidades mineiras e duas capixabas; paralisação de atividades econômicas, de geração de energia e industriais, entre outros (PASSOS; COELHO; DIAS, 2017; ZONTA; TROCATE, 2016).

## 2.5 ROMPIMENTO DA BARRAGEM DA MINA CÓRREGO DO FEIJÃO EM BRUMADINHO-MG

Em 1976, a empresa Ferteco Mineração construiu a Barragem I no complexo do Paraopeba, na cidade de Brumadinho, dentro do Quadrilátero Ferrífero, no estado de Minas Gerais, sudeste do Brasil (VALE, 2019). A Barragem I, localizada na bacia hidrográfica do córrego Ferro Carvão, possuía uma altura máxima de 81 m e comprimento da crista de 720 m, uma área de 249.500 m<sup>2</sup> e era composta por nove diques elevados construídos com rejeitos ou solo compactado (PIRETE E GOMES, 2013). Foi construída pelo método de alteamento a montante para receber rejeitos de minério de ferro das minas Córrego do Feijão e Jangada (VALE, 2019). Em 2001, a empresa Vale S.A. comprou a antiga Ferteco Mineração (VALE, 2019). Em 2016, as operações de beneficiamento do minério da mina Córrego do Feijão passaram a ser realizadas de forma a seco e, portanto, a barragem foi inativada (VALE, 2019). Embora a barragem fosse considerada estável pela empresa terceirizada TUV SUD do Brasil, em 25 de janeiro de 2019 houve o rompimento da mesma. O desastre liberou  $1.2 \times 10^7$  m<sup>3</sup> de rejeitos de mineração de ferro, com velocidade de deslocamento de até 120 km h<sup>-1</sup>, formando uma ladeira de 7 km em declive até chegar ao Rio Paraopeba, um grande afluente do rio São Francisco (DU et al., 2020; VERGILIO et al., 2020), uma importante bacia hidrográfica nacional. Além do impacto ambiental, esse desastre resultou na morte de mais de 270 pessoas, sendo considerado o maior acidente de trabalho do país.

Segundo Robertson et al. (2019), a causa do rompimento da barragem foi, provavelmente, uma combinação de deformações internas em cadeia, devido à perda de sucção na zona não saturada, ou seja, na zona acima do nível da água. Com o desastre, aproximadamente 269,84 ha foram destruídos pelo rejeito da mina Córrego do Feijão, dos quais 133,27 ha de vegetação nativa da Mata Atlântica e 70,65 ha de Áreas de Proteção Permanente ao longo do curso de água, causando uma enorme perda em biodiversidade (IBAMA, 2019). Com o rompimento da barragem de Brumadinho, a empresa Vale S.A. teve uma perda de 92,8 milhões de toneladas ano da produção com a suspensão das operações em Córrego do Feijão, dentro outras minas que foram suspensas por decisão do Tribunal de Justiça do Estado de Minas Gerais (VALE, 2019).

Antes do rompimento, Brumadinho era uma das maiores fornecedoras de produtos agrícolas para o Centro de Abastecimento de Minas Gerais (CEASA-MG) da Região Metropolitana de Belo Horizonte. Com a maior parte das áreas cultivadas na região, os principais produtos eram milho, pastagens e olerícolas folhosas (PEREIRA et al., 2019). Em 2018, o município forneceu 13,4 mil toneladas para Ceasa e o valor estimado de comercialização foi de 17,8 milhões de reais (IBGE, 2019). O rompimento da Barragem I causou uma perda financeira para empresa Vale S.A. de US\$ 7,402 bilhões, incluindo despesas e provisões para cumprir obrigações relacionadas a descaracterização das barragens a montante, dentre outras (VALE, 2019).

O rejeito da mina do Córrego do Feijão era constituído principalmente de ferro, com teor médio de 264,9 mg g<sup>-1</sup>, um material particulado fino, com 30,3% de areia e 69,7% de argila siltosa (VERGILIO et al., 2020). No entanto, no rejeito também existiam teores de Al, Mn e Ti, com valores médios de 10,8; 4,78 e 0,43 mg g<sup>-1</sup>, respectivamente (VERGILIO et al., 2020). Além de elementos potencialmente tóxicos (PTEs), como U (1457,4 µg g<sup>-1</sup>), Cd (30,94 µg g<sup>-1</sup>), Pb (14,64 µg g<sup>-1</sup>), As (4,69 µg g<sup>-1</sup>), Sn (547,4 µg g<sup>-1</sup>) e Hg (101,3 ng g<sup>-1</sup>) (VERGILIO et al., 2020). Após o desastre, os rejeitos foram misturados aos solos e sedimentos naturais das áreas afetadas. Isso provavelmente modificou a composição do rejeito natural e essa mistura solo / rejeito foram distribuídos no ambiente, tanto na área da própria estrutura da barragem, quanto nas calhas e planícies aluvionares a jusante da Barragem I, em bancos de sedimentos acumulados em algumas regiões, no canal fluvial e no leito do rio Paraopeba (GEO ENVIRON, 2019).

O rejeito quando atingiu as águas do rio Paraopeba aumentou os níveis de turbidez, ferro, manganês, alumínio e elementos potencialmente tóxicos, como mercúrio e arsênio (IGAM, 2020), e esses níveis reduziram com o aumento da distância da barragem (VERGILIO et al., 2020). Após o desastre, a cor intensa dos rejeitos foi observada até o município Pará de Minas, localizado a 42 km de distância do rompimento da barragem (FEAM, 2019). Por isso, o Governo de Minas Gerais proibiu, no dia 24 de fevereiro de 2019, o uso da água do rio Paraopeba para irrigação e consumo humano e animal entre as cidades de Brumadinho e Pompéu (PEREIRA et al., 2019). Vergilio et al. (2020) monitoraram os níveis de metais ao longo do curso do rejeito liberado e encontraram teores acima dos limites permitidos pelo CONAMA nº 357 (2005) para águas

classe I, para Cd, Mn, Pb, Zn, U e Al e Fe dissolvido. Além disso, nesse mesmo estudo, foi observado aumento nos teores de metais nos sedimentos, para Cr, Ni, Cu, Cd, Hg e As, apresentando valores superiores às diretrizes de qualidade de sedimentos estabelecidas. No entanto, antes do rompimento da barragem, segundo as séries históricas entre 2000 e 2018, a bacia do rio Paraopeba já apresentava teores de alguns metais acima da legislação brasileira, como Fe e Al dissolvidos e Mn (IGAM, 2019). Com isso, essa contaminação pode ser natural, devido aos altos teores de background de metais da região e à poluição antrópica (VICQ et al., 2015), mas também há indícios que o impacto do rompimento da barragem agravou essa contaminação nas águas e nos sedimentos. Ao passar do tempo, os PTEs que estão presentes no solo / rejeito e que ficaram depositados no fundo do rio Paraopeba após o rompimento da barragem, podem ser liberados na água, levando ao acúmulo biótico e à mortalidade ou diminuição da reprodução de algas, microcrustáceos e alguns peixes (VERGILIO et al., 2020).

No Brasil, uma das regiões com maiores problemas de contaminação por As é o Quadrilátero Ferrífero, no estado de Minas Gerais. Nessa região, esse elemento tem origem geogênica, devido aos grandes minérios de sulfeto aurífero. No município de Paracatu, localizado a noroeste do estado, a mineração de ouro ocorre a mais de três séculos e a cidade é conhecida por seus solos apresentarem teores de As maiores que a média mundial (BUNDSCHUH et al., 2020). O Córrego Rico nasce em Paracatu e tem sua foz no rio Paracatu, um dos principais afluentes do rio São Francisco, com histórico de mineração de ouro na calha do rio (IGAM, 2020). As águas desse córrego são utilizadas para irrigação de áreas agrícolas ao seu entorno e consumo humano e animal. No entanto, na série histórica de 2000-2019, os teores de As total em suas águas excederam em até 100 vezes os limites de classe 2 ( $0,01 \text{ mg L}^{-1}$ ) no trecho do Córrego Rico, variando entre  $0,011$  e  $1,065 \text{ mg L}^{-1}$  (IGAM, 2020). Por isso, foi realizado um estudo do cenário hídrico e da qualidade das águas das proximidades da mineração de Paracatu que suspendeu temporariamente, por 5 anos, o uso dos recursos hídricos desse trecho (IGAM, 2020). Existe pouca informação sobre o comportamento de As em solos agrícolas irrigados e sua bioacessibilidade, por isso é importante a realização de estudos que possam prever o risco ecológico e humano em áreas contaminadas com As por irrigação e melhorar a legislação nesse aspecto (CAMPOS et al., 2013; MACHADO et al., 2019).

## 2.6 ARSÊNIO

Dentre os EPTs que podem ter suas concentrações frente aos desastres ambientais, escolheu tratar no presente trabalho do elemento As. O arsênio (em latim *arsenium*, significado potente), elemento químico de símbolo As, é um metaloide ou semimetal que possui número atômico 33 e de peso atômico  $74,92 \text{ g mol}^{-1}$ , na tabela periódica faz parte do grupo 15 (V) (ADRIANO, 2001). O As ocorre na natureza em diferentes estados de oxidação, como arsenato, arsenito, arsina e metal. Os complexos de arsenato e arsenito são as espécies mais solúveis e as mais abundantes no solo, sendo os compostos de  $\text{As}^{+3}$  mais tóxicos que os de  $\text{As}^{+5}$  (SAKUMA et al., 2002).

O arsênio (As) ocorre naturalmente no meio ambiente e é considerado um elemento altamente tóxico à saúde humana (USEPA, 2001). No entanto, os teores de As nos solos podem ser incrementados pela mineração e o processamento desses minérios levaram a uma poluição por arsênio nas regiões de mineração em todo o mundo (NRIAGU, 1994). A exploração mineral libera esse contaminante para os cursos d'água e ele é transportado para águas subterrâneas e superficiais, solos e sedimentos (BUNDSCHUH et al., 2020).

Tal elemento é amplamente estudado devido ao seu potencial de toxicidade. O As ocupa o primeiro lugar na lista de substâncias prioritárias pela Agência de Registro de Substâncias Tóxicas e Doenças (EUA) desde 1997 (ATSDR, 2017). Além disso, a Agência Internacional de Pesquisa em Câncer (IARC, 2019) classifica o arsênio e compostos de arsênio inorgânico como cancerígenos para o ser humano (Grupo 1). Por isso são necessários constantes estudos e levantamentos toxicológicos do As em solos, sedimentos, água.

### 2.6.1 Arsênio no solo

A disponibilidade e a toxicidade do As no solo e na solução do solo são determinadas pelas espécies predominantes do elemento químico no meio, que são influenciadas pelas condições químicas e microbiológicas do solo. Normalmente, no solo

há um predomínio das formas inorgânicas  $As^{+3}$  e  $As^{+5}$  e a ordem de toxicidade é arsenito ( $AsO_3^{-3}$ ) > arsenato ( $AsO_4^{-3}$ ) > organoarsênicos (ADRIANO, 2001; KADER et al., 2016).

Além disso, a espécie química do As presente na solução do solo depende do pH e o potencial redox do meio (SMEDLEY; KINNIBURGH, 2002). Desta forma, é essencial saber qual a espécie química predominante no meio para então, fazer a avaliação do destino do As e poder realizar a prospecção da toxicidade da área de estudo.

O comportamento do arsenato no solo é semelhante ao do fosfato, devido à semelhança química entre eles, por isso, pode formar precipitados insolúveis com o Fe, Al e Ca (FAROOQ et al., 2016; KUMAR et al., 2015). Por essa razão, a presença de ferro no solo é uma das maneiras de controlar a mobilidade do arsenato. A adsorção do arsenato por caulinita e outros alcança os níveis máximos em um pH de 3 a 4 e com o aumento gradual do pH vai reduzindo a adsorção (MCLEAN; BLEDSOE, 1992). Já a adsorção do arsenito, também é fortemente dependente do pH, sendo maior no pH na faixa de 3 a 9, com o máximo de adsorção por óxido de ferro a um pH 7 (MCLEAN; BLEDSOE, 1992).

As diferentes espécies químicas do As e suas concentrações presentes no solo causam efeitos fitotóxicos distintos, por isso, há a necessidade de estudar diferentes espécies de plantas e os efeitos macroscópicos e microscópicos causado por este elemento.

## 2.7 LEGISLAÇÃO DO ARSÊNIO NO BRASIL

### 2.7.1 Evolução histórica

No Brasil, há esforços em busca da proteção ambiental desde a década de 1970. O primeiro instrumento normativo foi o Decreto-Lei nº 1.413, publicado em 14 de agosto de 1975, que regulamentou as diretrizes para as indústrias instaladas ou a serem instaladas no território nacional, com a adoção de medidas de proteção para evitar a poluição do ar, da água e do solo. No entanto, os limites permitidos de emissões de contaminantes pelas indústrias não foram estabelecidos (BRASIL, 1975; LEMOS, 2013).

Em 1981, foi criada a Lei da Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), pela Lei nº 6.938, que entre muitos objetivos impõe ao poluidor e ao degradador a obrigação de reparar os danos ambientais (BRASIL, 1981). Essa lei regulamenta as resoluções resultantes da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano (UNEP, 1972). Esta conferência foi realizada em Estocolmo em 1972 e representou um marco no surgimento do direito ambiental internacional. Desde então, organismos multilaterais de financiamento passaram a exigir que os estudos de viabilidade de grandes empresas considerem medidas de proteção ambiental (PEREIRA JR., 2007; UNEP, 1972).

Além disso, a referida lei criou o Sistema Nacional de Meio Ambiente (SISNAMA), que foi regulamentado pelo Decreto 99.274/90, o constitui um sistema de órgãos e entidades das três esferas federativas e com participação da sociedade civil, responsável pela proteção e melhoria da qualidade ambiental, com base no conceito de responsabilidades compartilhadas e controle social. Já o Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA é o órgão consultivo e deliberativo do Sistema Nacional do Meio Ambiente-SISNAMA, foi instituído e regulamentado pela mesma lei e decreto.

A Constituição Federal seguiu a linha adotada pela Lei nº 6.938 de 1981 o que pode ser verificado por seu artigo 225 (BRASIL, 1988). De acordo com o citado artigo, o meio ambiente é tratado como um direito difuso, o que significa que todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, sendo a preservação um dever do poder público e da comunidade (BRASIL, 1988). Aos infratores, pessoas físicas ou jurídicas,

aplicam-se sanções penais e administrativas independentemente da obrigação de reparar o dano (BRASIL, 1988).

Na Carta Magna, houve uma divisão dos poderes legislativo e administrativo dos entes da Federação no tocante às políticas ambientais, entre outros. Assim, foram estabelecidas as competências comuns da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios para proteger o meio ambiente e combater a poluição (art. 23, VI, CF/88), bem como da União, aos Estados e ao Distrito Federal legislar sobre florestas, caça, pesca, fauna, conservação da natureza, defesa do solo e dos recursos naturais, proteção do meio ambiente e controle da poluição (art. 24, VI, CF/88).

Portanto, para uma gestão eficiente de áreas contaminadas, é necessária uma Avaliação de Risco detalhada, que pode ser entendida como um processo para identificar e avaliar os riscos potenciais que os impactos no ambiente avaliado podem causar à saúde humana e de outros organismos vivos (CETESB, 2015). Dentro desse cenário, o manejo de áreas contaminadas no Brasil passou a ser estudado inicialmente na região sudeste. A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) já publica valores diretivos desde 2001, com metodologia baseada no modelo holandês (CASARINI, 2001).

Portanto, para que possa se fazer uma avaliação de risco eficaz e saber se uma área oferece um potencial risco é essencial possui valores para os EPTs definidos em normativas. Só assim, os órgãos públicos poderão ter poder de decisão em definir se uma área é apta para atividades (humanas, agrícolas, industriais) ou se oferece risco potencial.

### **2.7.2 Legislação sobre arsênio no solo no Brasil**

O CONAMA implementou a Resolução 420/2009 da legislação brasileira seguindo a legislação da CETESB (válida em São Paulo pela Lei Estadual nº 15.577 (SÃO PAULO, 2009) e seu Decreto nº 59.263 (SÃO PAULO, 2013), que estabelece o gerenciamento de áreas contaminadas em São Paulo. A resolução 420/2009 do CONAMA estabelece critérios e valores diretivos de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece medidas para o manejo ambiental das áreas antrópicas impactadas.

Tal resolução estabelece três valores diretivos distintos: Valores de Referência de Qualidade, Valor de Prevenção (VP) e Valor de Investigação (VI). O VRQ para cada elemento é baseado na análise do solo em condições naturais (sem ou com mínima interferência antrópica), enquanto os valores de VP e VI são determinados em estudos de risco à saúde humana e ecológica (CONAMA, 2009) Na Resolução 420/2009, dependendo da concentração das substâncias químicas avaliadas, o solo pode ser classificado em diferentes classes: Classe 1, que apresenta concentrações de substâncias químicas menores ou iguais a VRQ; Classe 2, que apresenta pelo menos uma substância química maior que VRQ e menor ou igual a VP; Classe 3, que representa os solos que apresentam pelo menos uma substância química maior que VP e menor ou igual a VI; e Classe 4, que são solos que apresentam concentração de pelo menos uma substância química maior que VI (CONAMA, 2009). As determinações dos valores do VRQ são de responsabilidade dos órgãos ambientais estaduais (CONAMA, 2009).

Com base nessas informações, foi feito um levantamento em todos os meios das determinações legais para verificar o cumprimento pelos Estados da Resolução 420 referentes ao As. A Tabela 1 mostra cada ente federativo que já determinou valores de VRQ para As de acordo com as normas legais. Até o momento, os demais Estados brasileiros ainda estão preparando seus VRQs para o As.

Tabela 1. Valores de Referência de Qualidade (VRQ) para As em solos de alguns estados brasileiros.

Estados brasileiros	VRQ mg kg <sup>-1</sup>	Referências
Região Sudeste		
Espírito Santo	8.14	PAYE et al. (2010)
Minas Gerais	8.0	COPAM (2011)
São Paulo	3.5	CETESB (2016)
Região Norte		
Pará	1.4	ALLEONI et al. (2013)
Região Nordeste		
Pernambuco	0.60	CPRH (2014)

### 2.7.3 Legislação sobre arsênio em águas e sedimentos no Brasil

Uma vez que a água potável é reconhecida como uma fonte significativa de exposição ao As, uma miríade de estudos foi realizada em todo o mundo para determinar o limite aceitável. Por exemplo, o valor de referência da Organização Mundial da Saúde (OMS, 1993) para As na bebida é de  $10 \mu\text{g L}^{-1}$ .

Cada país leva em consideração diferentes fatores para determinar o limite de concentração de As na água. O Brasil adotou os valores determinados pela Resolução nº 357/2005, de 17 de maio de 2005 (CONAMA, 2005). A resolução classifica as águas superficiais com base nos parâmetros de qualidade como Classe 1, que representa a água utilizada para fins de abastecimento após tratamento simplificado, proteção de comunidades aquáticas, recreação de contato primário, irrigação de culturas alimentares, pesca e cultivo de organismos para consumo humano; Classe 2, que representa o uso de água para abastecimento após tratamento convencional; e Classe 3, que representa a água que é utilizada para fins de abastecimento após tratamento convencional ou avançado, para pesca amadora, recreação de contato secundário e consumo animal.

A Resolução CONAMA 396, de 7 de abril de 2008 (CONAMA, 2008), estabelece valores para águas subterrâneas. A água potável tem o limite estabelecido de  $10 \mu\text{g L}^{-1}$  Tanto para águas superficiais quanto subterrâneas, conforme CONAMA nº 357 (2005) e 396 (2008).

A Resolução nº 454, de 08 de novembro de 2012, estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional e trouxe como novidade a revisão dos valores norteadores da qualidade do material dragado e aprimorou os procedimentos relacionados ao gerenciamento dos materiais a serem dragados (CONAMA, 2012). Com relação à classificação química dos sedimentos, o valor de As foi revisado e, com base na matéria seca, adotou-se  $5,9 \text{ mg kg}^{-1}$  para o Nível 1 e  $17 \text{ mg kg}^{-1}$  para o Nível 2, ambos aplicados para águas doces. Para água salgada, os valores são 19 e  $70 \text{ mg kg}^{-1}$ , para os Níveis 1 e 2, respectivamente (CONAMA, 2012).

#### **2.7.4 Legislação sobre arsênio em agroquímicos no Brasil**

Embora muitos países sejam muito rigorosos em relação aos níveis permitidos de As em seus agroquímicos, o Brasil ainda permite limites mais altos. No entanto, as emendas derivadas de resíduos originados de fontes específicas podem ser classificadas como materiais perigosos se forem detectadas propriedades tóxicas (ABNT, 2004). Nesse sentido, os limites máximos permitidos de arsênio são de 1 mg L<sup>-1</sup> e 0,01 mg L<sup>-1</sup>, para os testes de lixiviação e solubilização, respectivamente (ABNT, 2004).

#### **2.7.5 Legislação sobre arsênio e risco à saúde humana no Brasil**

O desenvolvimento e a validação de métodos para avaliar o risco à saúde humana de resíduos perigosos no Brasil ainda são recentes. Na década de 1990, foram utilizados dados da Agência de Registro de Substâncias Tóxicas e Doenças (ATSDR), porém a partir de 2002, o Ministério da Saúde (MS) passou a trabalhar no assunto. No entanto, ainda existem atividades incipientes e um método de avaliação de risco à saúde humana claramente definido ainda não foi implementado. Conforme estabelecido pela Carta Magna (BRASIL, 1988) em seu artigo 196, a saúde é direito de todos e dever do Estado. Políticas sociais e econômicas voltadas para a redução do risco de doenças e acesso a ações e serviços de promoção, proteção e recuperação devem ser garantidas. O Sistema Único de Saúde (SUS), sistema público descentralizado, foi criado no Brasil para garantir esse direito.

Com as determinações legais-institucionais, é premente a necessidade de maior desenvolvimento desta área no Brasil. Para este propósito, uma metodologia de avaliação de risco à saúde validada é imperativa. Em 2010, houve mais um avanço na avaliação de risco à saúde humana e o Ministério da Saúde propôs ajustes na metodologia ATSDR e a adaptou à realidade brasileira. O documento intitulado “Diretrizes para elaboração de estudo de avaliação de risco à saúde humana devido à exposição a contaminantes químicos” (BRASIL, 2010), estabelece a metodologia do SUS para elaboração de estudos de avaliação de risco à saúde humana, visando prevenir populações expostas ou potencialmente expostas a contaminantes químicos. Essa

metodologia estabelece dados sociais e de saúde com base em questões ambientais para indicar as possíveis implicações para a saúde pública decorrentes de uma determinada substância química.

Para que a avaliação de risco seja realizada de forma adequada e gere resultados confiáveis, os exames toxicológicos precisam seguir metodologias específicas. Dependendo do tipo de avaliação de risco que será realizada, existem testes adequados, como os que serão abordados no próximo tópico.

#### **2.7.6 Evolução legislativa sobre a elemento arsênio no Brasil**

Apesar da legislação já vigente sobre a regulamentação e segurança do As em solos, água e alimentos, vimos que tal legislação é obsoleta e não possui aplicabilidade frente a desastres ambientais (em que maiores concentrações desse elemento podem ser liberadas ao meio). No entanto, nada ou muito pouco foi feito após os rompimentos das barragens de mineração. Desta forma, carece de uma melhoria legislativa no estabelecimento de novas normativas e na fiscalização para que sejam cumpridas.

Além disso, devido a diversidade mineralógica do Brasil, é importante desenvolver trabalhos buscando a quantificação dos teores de elementos-traço nos solos de referência para cada região, isso permitirá um manejo adequado, sustentável que pode contribuir tanto na produtividade quanto na melhoria da qualidade dos produtos agrícolas e, mais importante, na tomada de decisões efetivas quando esses desastres acontecerem.

## 2.8 EM DECORRÊNCIA DOS DESASTRES COM AS BARRAGENS DE MINERAÇÃO E OS RISCOS DO AS, HOUVE AVANÇOS?

### 2.8.1 Avaliação de políticas ambientais

As políticas públicas ambientais nacionais estão em constante evolução e, portanto, carecem de monitoramento e avaliação. No entanto, os países nem sempre têm capacidade ou motivação para monitorar essas políticas, abordar questões e promover melhorias. Em alguns casos, melhorias na política ambiental são feitas em resposta a desastres que expõem repentina e fortemente os problemas existentes (ROCHMAN, 2016; BARCESSAT, 2017).

Tal situação está sendo vivenciada no Brasil que, após os rompimentos das barragens de rejeitos do Fundão e B1, respectivamente, em 2015 e 2019, ficaram expostos problemas de efetividade nas políticas de segurança e emergência das barragens. A magnitude dos impactos no meio ambiente, nas comunidades a jusante dos barramentos, como perdas de vidas e transtornos socioambiental, demonstrou a importância de aperfeiçoar as políticas e os diversos regulamentos voltados às barragens. O processo de aprendizado político-institucional impulsionado por esses trágicos acontecimentos resultou em diversas alterações de leis e regulamentos nos níveis estadual e federal, mas esse conhecimento permanece disseminado e pouco explorado.

Independentemente do *problema motivador*, várias etapas precisam ser tomadas para desenvolver uma política. O ciclo de formulação de políticas (Figura 2) oferece os seguintes estágios sequenciais: Definição do Problema, Formulação, Tomada de Decisão, Implementação e Avaliação.



Figura 2: Ciclo de construção de políticas.  
 Fonte: Adaptado de Howlett & Ramesh (2009).

Esse ciclo foi revisado e aprimorado desde seu início, nos primórdios da análise políticas (CRABBÉ; LEROY, 2008). Na prática, o ciclo de formulação de políticas tem limitações, pois assume uma racionalidade raramente testada na prática. Se o processo for sequencial e cíclico, como mostra o modelo, mesmo antes de ocorrer um desastre, as melhorias necessárias na política poderiam ser detectadas e estariam sempre em aprimoramento.

Nesse contexto de avaliação de políticas ambientais é importante compreender em que medidas as rupturas das barragens de rejeito Fundão e B1 influenciaram no aperfeiçoamento das leis e regulamentos voltados à gestão de segurança e de emergência de barragens. E assim, a relação de causalidade entre as mudanças e os desastres, bem como conhecer as principais motivações para as alterações legais e infra legais ocorridas

## 2.8.2 Panorama sobre segurança de barragens

O estado de Minas Gerais foi pioneiro na implementação de um programa para acompanhamento da situação das barragens presentes no estado. Em 2002, através da FEAM, iniciou-se o Programa de Gestão de Barragens, que indica a obrigatoriedade pela realização da classificação das estruturas e das auditorias técnicas de segurança. Este pioneirismo mineiro se deve ao destaque do estado na produção mineral e às rupturas de barragem ocorridas (ÁVILA, 2012).

A inserção legal do Brasil na temática de segurança de barragens foi com a promulgação da Lei nº 12.334/2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). O projeto de lei que culminou nesta Lei iniciou-se após a ruptura da barragem de rejeitos da Mineração Rio Verde, em 2001, e da barragem de resíduos Indústria Cataguases de papel, em 2003 (MELLO; PIASENTIN, 2011). Na PNSB, segurança de barragem foi definida como a “condição que vise manter a sua integridade estrutural e operacional e a preservação da vida, da saúde, da propriedade e do meio ambiente” (BRASIL, 2010).

Antes da promulgação do PNSB, não havia indicação direta de responsabilidades de monitoramento de segurança de barragens em nível nacional. Havia uma desarticulação do poder público quanto à segurança dessas estruturas e os órgãos ambientais lidavam isoladamente com a problemática das barragens (ZONTA; TROCATE, 2016). O reconhecimento do elevado nível de problemas de natureza organizacional, com vulnerabilidades em projetos, construção e operação de estruturas existentes, se destacou como um dos motivadores para a elaboração e aprovação da PNSB (ANM, 2018).

A PNSB foi criada para regulamentar e auxiliar no monitoramento das ações de segurança empregadas pelos responsáveis por barragens, e ainda fomentar a cultura de segurança e gestão de riscos (BRASIL, 2010). A PNSB se fundamenta no fato de que o empreendedor é o responsável legal pela segurança da barragem, cabendo-lhe prover ações para garanti-la, obedecendo às regulamentações estabelecidas pelos respectivos órgãos fiscalizadores. Dentre os instrumentos criados na PNSB, está o Plano de

Segurança de Barragem (PSB), que é de implementação obrigatória pelos empreendedores e os auxilia na gestão da segurança de barragens (ANM, 2018).

Foi estabelecido na PNSB quais são as entidades responsáveis pela fiscalização de segurança das barragens, de acordo com seus usos preponderantes. As entidades outorgantes do uso dos recursos hídricos, do uso do potencial hidráulico e de atividades minerárias são as responsáveis pelas barragens de acumulação de água, barragens para fins de geração hidrelétrica e barragens de disposição de rejeitos. No caso das barragens para disposição de resíduos industriais, a fiscalização cabe às entidades licenciadoras. A PNSB permitiu, ainda, que os órgãos do SISNAMA coparticipassem do ato fiscalizatório de segurança de barragens.

Em 2019, após a ruptura da Barragem B1 em Brumadinho, foi proposto um projeto de lei que culminou na promulgação da Lei n.º 14.066/2020, que alterou a PNSB. Dentre as diversas alterações, inseriu-se na PNSB as barragens com CRI alto. Além disso, determinou que a classificação por categoria de risco deverá ser feita considerando (além das Características Técnicas, Estado de Conservação e atendimento ao Plano de Segurança da Barragem) os métodos construtivos (já considerados desde a Portaria DNPM n.º 70.389/2017) e a idade do empreendimento (BRASIL, 2020b).

Ainda a título de evolução legislativa, até o ano de 2017, era o Departamento Nacional de Pesquisa Mineral (DNPM) o órgão fiscalizador da segurança das barragens destinadas à disposição de rejeitos, que eram resultantes das atividades de mineração. A Lei nº 13.575/2017 extinguiu o DNPM e criou a Agência Nacional de Mineração (ANM), que atualmente é a responsável pela fiscalização de barragens de rejeito.

Em 2019, a ANM firmou um acordo de cooperação com a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) para revisão da regulação e governança do setor mineral. O intuito da ANM é identificar as barreiras regulatórias que dificultam a implementação de políticas públicas e corrigir as ineficiências no setor mineral. (ANM, 2020a). Em seu relatório preliminar, a OCDE destacou a necessidade de otimização das atividades fiscalizatórias, com o intuito de reduzir os riscos de acidentes (ANM, 2021a).

Ainda, no que tange ao aperfeiçoamento da gestão de barragens, foi estabelecido à nível internacional em agosto de 2020 o Padrão Global da Indústria sobre

Gerenciamento de Rejeitos. Este Padrão foi um produto da Revisão Global de Rejeitos, iniciada em março de 2019, após o desastre ocorrido em Brumadinho, que contou com a participação do Conselho Internacional de Mineração e Metais (ICMM), do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e Princípios para Investimento Responsável (PRI) (IBRAM, 2020). O Padrão objetivou, a partir das lições aprendidas com rupturas de barragens de rejeito e boas práticas existentes, estabelecer diretrizes em prol da gestão segura de barragens. Foram estabelecidos 15 princípios e 77 requisitos auditáveis (UNEP; ICMM; PRI, 2020).

Na elaboração do Padrão Global, apesar de terem sido consultadas diversas partes interessadas, especialistas que participaram da elaboração do documento relataram que o processo se deu de forma desigual (HOPKINS; KEMP, 2021; IBRAM, 2020). Hopkins e Kemp (2021) afirmaram que a premissa inicial de que haveria um “painel de especialistas independentes” não foi respeitada, tendo ocorrido pressão por parte do ICMM para favorecer os interesses da mineração. Diante disso, apesar de estar prevista a “supervisão independente” do Padrão por uma entidade a ser estabelecida, não podem ser ignoradas as limitações da autorregulamentação.

O panorama atual da gestão de segurança e emergência de barragens no Brasil abrange instrumentos públicos e privados que, em sua grande maioria, advém de determinações legais e infra legais. De forma geral, estes instrumentos são estabelecidos em âmbito federal, estadual e privado/cooperativo e abrangem as diversas etapas do ciclo de vida das barragens, que compreende as etapas de Planejamento e Projeto, Implantação, Operação, Encerramento e Pós-encerramento (ÁVILA; BICUDO, 2014; IBRAM, 2019).

### 3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Considerando o número de barragens cadastradas, bem como o número de garimpos autorizados (além dos ilegais), há um grande desafio pela frente no levantamento de informações sobre a contaminação por As nessas áreas. A avaliação de risco ecológico é essencial para os empreendimentos, assim caso algum acidente venha a ocorrer, há informações baseadas em normativas para a tomada de decisão.

A realização de avaliação de risco pelos empreendedores responsáveis por barragens se dava de maneira voluntária, uma vez que não havia esta determinação nos instrumentos legais aplicáveis à segurança de barragens. A Lei nº. 14.066/2020 determina que seja realizada avaliação de riscos com definição dos cenários críticos.

É importante ter em mente que, apesar do intuito da avaliação de riscos ser a geração de informações que contribuam para um processo de decisão mais aberto e transparente, tanto no âmbito interno dos empreendimentos quanto no âmbito externo, não basta apenas ter este conhecimento e estabelecer um sistema de gestão de riscos. Os empreendedores devem, de fato, atuar no sentido de acompanhar e minimizar os riscos inerentes às barragens. E, assim, os órgãos ambientais tenham embasamento em documentos técnicos para deliberar quanto as questões ambientais.

O recente colapso de duas grandes barragens de rejeitos de mineração de ferro, localizadas na região do Quadrilátero Ferrífero (Mariana-2015 e Brumadinho-2019), é um potencial ameaça ambiental que merece mais estudos. Em todos os casos, estudos de monitoramento ambiental de longo prazo devem ser realizados para avaliar o real risco ambiental, especialmente para criação de leis preventivas.

Após o rompimento, no que tange a segurança de barragens, pode-se dizer que trajetória percorrida pela política ambiental brasileira indica que ocorreram avanços. Por exemplo, a Lei Federal nº 14.066/2020 alterou diversos instrumentos legais, dentre eles a Lei nº 12.334/2010. De forma geral, as alterações voltaram-se à gestão da emergência em detrimento à gestão de segurança e maior ênfase foi dada à atuação conjunta de empreendedores, fiscalizadores e órgãos de proteção e defesa civil e à participação das comunidades afetadas nas ações preventivas e emergenciais. Além disso, a proibição da utilização de alteamento a montante, considerando que as últimas rupturas de barragens

de rejeito envolveram estruturas construídas e alteadas por este método, que existe um número expressivo de barragens que o utilizam e que o mesmo possui eficiência e segurança controversas (BRASIL, 2019).

Quanto à fiscalização, a Lei Federal nº 14.066/2020 determinou que deverá basear-se em análise documental, em vistorias técnicas, em indicadores de segurança de barragem e em outros procedimentos definidos pelo órgão fiscalizador. Os fiscalizadores deverão manter canal de comunicação para o recebimento de denúncias e de informações relacionadas à segurança de barragens.

Entretanto, ainda há dificuldades em medir estes avanços devido à falta de mecanismos de avaliação estruturados e sistematização da fiscalização. Sem estes mecanismos, a resposta quanto a efetividade que vem sendo alcançada pelas políticas ambientais mostra-se imprecisa ou parcial.

## 4 CONCLUSÃO

Pelo que foi analisado no trabalho, pode-se dizer que a ruptura das barragens de contenção de rejeitos Fundão, em 2015, e B1, em 2019, expuseram diversas falhas na gestão de segurança e emergência dessas estruturas, por parte por atores públicos e privados. A eficácia das políticas de segurança de barragens e o papel do empreendedor e dos órgãos de proteção e fiscalização ambiental foram colocados à prova, e um grande processo de mudança legislativa e regulatória foi iniciado. Vale ressaltar que, como os desastres foram reincidentes, demonstra que a capacidade preditiva e o aprendizado político e institucional que as mudanças regulatórias trouxeram não foram suficientes.

No entanto, já ocorreram avanços, a Lei Federal nº 14.066/2020 que alterou diversos instrumentos legais, dentre eles a Lei nº 12.334/2010. Uma das alterações importante, é a proibição da utilização de alteamento a montante, considerando que as últimas rupturas de barragens de rejeito envolveram estruturas construídas e alteadas por este método, que existe um número expressivo de barragens que o utilizam e que o mesmo possui eficiência e segurança controversas (BRASIL, 2019).

E sobre o elemento-traço nesse trabalho destacado, apesar de já haver uma legislação vigente sobre a regulamentação e segurança do As em solos, água e alimentos, vimos que tal legislação é obsoleta e não possui aplicabilidade frente a desastres ambientais (em que maiores concentrações desse elemento podem ser liberadas ao meio). No entanto, nada ou muito pouco foi feito após os rompimentos das barragens de mineração. É essencial a avaliação de risco e determinação de valores orientadores de As para as regiões para que, caso esses desastres ocorram, os órgãos públicos tenham dados de teores com embasamento técnico-científico em normativas para a tomada de decisão.

Desta forma, essas catástrofes precisam servir de aprendizados, e resultarem em melhorias legislativas no estabelecimento de novas normativas e na fiscalização para que sejam cumpridas.

## REFERÊNCIAS

ABREU, A.S., DINIZ, H.D., PRADO, M.G.B., & SANTOS, S.P. **Mina de Ouro de São Bento, Santa Bárbara, Minas Gerais**. In: C. Schobbenhaus & C.E.S. Coelho (Eds), Principais depósitos minerais do Brasil (pp. 393–411). DNPM/CVRD, 1988.

ADRIANO D. C. **Trace elements in terrestrial environments: Biogeochemistry, bioavailability, and risks of metals**. 2nd. ed. New York: Springer-Verlag New York, 867, 2001.

AGÊNCIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE DE PERNAMBUCO – CPRH. **Instrução Normativa CPRH nº 7 DE 07/07/2014** – Estabelece os valores de referência da qualidade do solo (VRQ) do Estado de Pernambuco quanto à presença de substâncias químicas para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias. Recife, 2014. Disponível em: <http://www2.cprh.pe.gov.br/publicacoes-e-transparencia/legislacoes-e-instrucoes-normativas/instrucoes-normativas/>. Acesso em 26 de mar. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO - ANM. **Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas**, 2018. Disponível em: [http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb\\_2019\\_ano\\_base\\_2018](http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb_2019_ano_base_2018). Acesso em 26 de mar. 2023.

\_\_\_\_\_. **Classificação Nacional de Barragens de Mineração**, 2020b. Disponível em: <https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico/ClassificacaoNacionalDaBarragem>. Acesso em 26 de mar. 2023.

\_\_\_\_\_. **OCDE mostra caminho para modernização do setor de mineração**. Disponível em: OCDE mostra caminho para modernização do setor de mineração — Agência Nacional de Mineração ([www.gov.br](http://www.gov.br)). Acesso em: 16 maio. 2023.

\_\_\_\_\_. **Relatório de Gestão da Agência Nacional de Mineração**. Brasília, 2020a. Disponível em: Relatório de Gestão — Agência Nacional de Mineração ([www.gov.br](http://www.gov.br)). Acesso em 5 jun. 2023

\_\_\_\_\_. **Sumário mineral 2018 (ano base 2017): Ferro**, 2018. Disponível em: [http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/pasta-sumario-brasileiro-mineral-2018/ferro\\_sm\\_2018](http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/pasta-sumario-brasileiro-mineral-2018/ferro_sm_2018). Acesso em 26 de mar. 2023.

\_\_\_\_\_. **Sumário Mineral**, Brasília, 2019b. Disponível em: [https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/sumariomineral\\_2017](https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/sumariomineral_2017). Acesso em 26 de mar. 2023.

AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE CONTROL - ATSDR. **The Priority List of Hazardous Substances 201**, 2017.

ALLEONI L.R.F., FERNANDES A.R., SANTOS S.N. **Valores referência de elementos potencialmente tóxicos nos estados do Pará, Rondônia e Mato Grosso**. Boletim Informativo SBCS, 38:18-21, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Norma Brasileira - NBR ISO 10004**: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT; 2004. Disponível em <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=936>. Acesso em 27 de mar. 2023.

ÁVILA, J. P. **Barragens de Rejeitos no Brasil**. Rio de Janeiro. Comitê Brasileiro de Barragens, 138, 2012.

AZEVEDO, Ú. R. de, MACHADO, M. M. M., CASTRO, P. DE T. A., RENGER, F. E., TREVISOL, A., BEATO, D. A. C. **Geoparque quadrilátero ferrífero (MG) – proposta**, 2012. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/17149>. Acesso em 27 de mar. 2023.

BARCESSAT, A. C. A. **Os desastres e o direito ambiental: governança, normatividade e responsabilidade estatal**. Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, 2017.

BORBA, R.P., FIGUEIREDO, B.R., & MATSCHULLAT, J. **Geochemical distribution of arsenic in waters, sediments and weathered gold mineralized rocks from iron quadrangle, Brazil**. Environmental Geology, 44, 39–52, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00254-002-0733-6>. Acesso em 14 de abr. 2023.

BOSSY, A., GROSBOIS, C., BEAUCHEMIN, S., COURTIN-NOMADE, A., HENDERSHOT, W., & BRIL, H. (2010). **Alteration of As-bearing phases in a small watershed located on a high grade arsenic-geochemical anomaly (French Massif Central)**. Applied Geochemistry, 25(12), 1889–1901. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2010.10.004>. Acesso em 14 de abr. 2023.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília: Centro Gráfico; 1988. Disponível em: [https://www2.senado.leg.br/bdsf/bitstream/handle/id/518231/CF88\\_Livro\\_EC91\\_2016.pdf](https://www2.senado.leg.br/bdsf/bitstream/handle/id/518231/CF88_Livro_EC91_2016.pdf). Acesso em 14 de abr. 2023.

\_\_\_\_\_. **Decreto-Lei nº 1.413, de 31 de julho de 1975** – Dispõe sobre o controle da poluição do meio ambiente provocada por atividades industriais. Brasília; 1975. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto-lei/1965-1988/del1413.htm#:~:text=Disp%C3%B5e%20sobre%20o%20controle%20da,ambiente%20provocada%20por%20atividades%20industriais.&text=1%C2%BA%20As%20ind%C3%BAstrias%20instaladas%20ou,da%20contamina%C3%A7%C3%A3o%20do%20meio%20ambiente](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/1965-1988/del1413.htm#:~:text=Disp%C3%B5e%20sobre%20o%20controle%20da,ambiente%20provocada%20por%20atividades%20industriais.&text=1%C2%BA%20As%20ind%C3%BAstrias%20instaladas%20ou,da%20contamina%C3%A7%C3%A3o%20do%20meio%20ambiente). Acesso em 14 de abr. 2023.

\_\_\_\_\_. **Lei nº 6.938**, de 31 de agosto de 1981 – Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília; 1981.

\_\_\_\_\_. **Lei nº 12.334**, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais. Brasília, 2010.

\_\_\_\_\_. **Lei nº 13.575**, de 26 de dezembro de 2017. Cria a Agência Nacional de Mineração (ANM); extingue o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM); altera as Leis nº 11.046, de 27 de dezembro de 2004, e 10.826, de 22 de dezembro de 2003; e revoga a Lei nº 8.876, de 2 de maio de 1994, e dispositivos do Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração). Brasília, 2017.

\_\_\_\_\_. **Lei nº 14.066**, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e outras. Brasília, 2020b.

BUNDSCHUH, J., ARMIENTA, M.A., MORALES-SIMFORS, N., ALAM, M.A., LÓPEZ, D.L., QUEZADA, V.D., SCHNEIDER, J., TAPIA, J., SRACEK, O., CASTILLO, E., PARRA, L.M., ESPINOZA, M.A., ROBERTO, L., GUILHERME, G., SOSA, N.N., NIAZI, N.K., ALLENDE, K.L., BIEGER, K., ALONSO, D.L., BRANDÃO, P.F.B., BHATTACHARYA, P., LITTER, M.I., AHMAD, A., BUNDSCHUH, J., ARMIENTA, M.A., MORALES-SIMFORS, N., ALAM, M.A., LÓPEZ, D.L., QUEZADA, V.D., DIETRICH, S., TAPIA, J., SRACEK, O., CASTILLO, E., PARRA, L.M., TOMASZEWSKA, B., ALLENDE, K.L., BIEGER, K., ALONSO, D.L., BRANDÃO, F.B., BHATTACHARYA, P., LITTER, M.I., AHMAD, A., DIETRICH, S. **Technology Arsenic in Latin America: New findings on source, mobilization and mobility in human environments in 20 countries based on decadal research Arsenic in Latin America: New findings on source, mobilization and mobility in human environments in.** Crit. Rev. Environ. Sci. Technol. 0, 1–139, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1770527>. Acesso em 14 de abr. 2023.

BUSTOS, V., MONDACA, P., VERDEJO, J., SAUVÉ, S., GAETE, H., CELIS-DIEZ, J.L., & NEAMAN, A. **Thresholds of arsenic toxicity to Eisenia fetida in field-collected agricultural soils exposed to copper mining activities in Chile.** Ecotoxicology and Environmental Safety, 122, 448–454, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.09.009>. Acesso em 14 de abr. 2023.

CAMPOS, M.L., GUILHERME, L.R.G., ANTUNES, A.S., BORGES, K.S.C. **Teor de arsênio e adsorção competitiva arsênio/fosfato e arsênio/sulfato em solos de Minas Gerais, Brasil.** Ciência Rural, 43:985-991, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782013005000057>. Acesso em 15 de abr. 2023.

CAMPOS, M.L., GUILHERME, L.R.G., LOPES, R.S., ANTUNES, A.S., MARQUES, J.J.G. DE S., M., CURI, N. **Teor e capacidade máxima de adsorção e arsênio em Latossolos brasileiros**. Rev. Bras. Ci. Solo, 31: 1311-1318, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000600010>. Acesso em 15 de abr. 2023.

CARMO, F. F. do, KAMINO, L.H.Y., JUNIOR, R.T., CAMPOS, I.C. DE, CARMO, FELIPE FONSECA DO, SILVINO, G., CASTRO, K.J. DA S.X. DE, MAURO, M.L., RODRIGUES, N.U.A., MIRANDA, M.P. DE S., PINTO, C.E.F. **Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context**. Perspect. Ecol. Conserv. 15, 145–151, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.06.002>. Acesso em 15 de abr. 2023.

CASARINI DCP. **Relatório de estabelecimento de valores orientadores para solos e águas subterrâneas no Estado de São Paulo**. São Paulo: Ed. CETESB; p. 1-73, 2001.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL DE SÃO PAULO – CETESB. **Manual de gerenciamento de áreas contaminadas**. São Paulo; 2015. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/documentacao/manual-de-gerenciamento-de-areas-contaminadas/>. Acesso em 16 de abr. 2023.

\_\_\_\_\_. **Decisão de Diretoria nº 256/2016/E, 2016** – Dispõe sobre a aprovação dos “valores orientadores para solos e águas subterrâneas no Estado de São Paulo – 2016” e dá outras providências. São Paulo; 2016. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2014/12/DD-256-2016-E-Valores-Orientadores-Dioxinas-e-Furanos-2016-Intranet.pdf>. Acesso em 15 de abr. 2023.

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL – COPAM. **Deliberação Normativa COPAM, 166** – Altera o anexo I da deliberação normativa conjunta COPAM CERH nº 2 de 6 de setembro de 2011, estabelecendo os valores de referência de qualidade dos solos. Belo Horizonte; 2011. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=18414>. Acesso em 16 de abr. 2023.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução CONAMA 357/2005** – Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília; 2005. Disponível em: [http://pnqa.ana.gov.br/Publicacao/RESOLUCAO\\_CONAMA\\_n\\_357.pdf](http://pnqa.ana.gov.br/Publicacao/RESOLUCAO_CONAMA_n_357.pdf). Acesso em 16 de abr. 2023.

\_\_\_\_\_. **Resolução CONAMA 396/2008** – Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Brasília; 2008. Disponível em: <http://portalpnqa.ana.gov.br/Publicacao/RESOLU%C3%87%C3%83O%20CONAMA%20n%C2%BA%20396.pdf>. Acesso em 16 de abr. 2023.

\_\_\_\_\_. **Resolução nº 420**, de 28/12/2009. Disponível em: <http://ww.mma.gov.br/port/conama/legiano1>. Acesso em 16 de abr. 2023.

\_\_\_\_\_. **Resolução CONAMA 454/201** – Estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional. Brasília; 2012. Disponível em: [https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2012/res\\_conama\\_454\\_2012\\_materialserdragadoemaguasjurisdicionaisbrasileiras.pdf](https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2012/res_conama_454_2012_materialserdragadoemaguasjurisdicionaisbrasileiras.pdf). Acesso em 16 de abr. 2023.

CRABBÉ, A.; LEROY, P. **The Handbook of Environmental Policy Evaluation**. 1. ed. London: Earthscan, 2008.

DU, Z., GE, L., NG, A.H.M., ZHU, Q., HORGAN, F.G., ZHANG, Q. **Risk assessment for tailings dams in Brumadinho of Brazil using InSAR time series approach**. Sci. Total Environ. 717, 137125, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137125>. Acesso em 15 de abr. 2023.

DYBOWSKA, A., FARAGO, M., VALSAMI-JONES, E., & THORNTON, I. **Operationally defined associations of arsenic and copper from soil and mine waste in south-west England**. Chemical Speciation & Bioavailability, 17(4), 147-160, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.3184/095422906783438811>. Acesso em 15 de abr. 2023.

FAROOQ, M. A. et al. **Arsenic toxicity in plants: Cellular and molecular mechanisms of its transport and metabolism**. Environ. Exp. Bot. 132, 42–52, 2016.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE - FEAM. Condições iniciais de avanço da lama oriunda da barragem B1 da mina Córrego do Feijão, 2019. Disponível em: [http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/2019/DESASTRE\\_BARRAGEM\\_B1/avanco\\_lama/MAPA\\_CONDI%C3%87%C3%95ES\\_DE\\_AVAN%C3%87O\\_DA\\_PLUMA\\_-\\_30\\_DE\\_JANEIRO\\_-\\_1700H.png](http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/2019/DESASTRE_BARRAGEM_B1/avanco_lama/MAPA_CONDI%C3%87%C3%95ES_DE_AVAN%C3%87O_DA_PLUMA_-_30_DE_JANEIRO_-_1700H.png). Acesso em 16 de abr. 2023.

GEO ENVIRON. **Relatório Técnico Caracterização Geoquímica de Rejeitos Fase I – Composição Química Global, Análise Granulométrica e Classificação Segundo a Norma ANBR ABNT 10.004/2004**, 2019.

GOMES B.C.V., KUMMER G., PEREIRA M.M.S.M., IZÁRIO FILHO H.J., SALAZAR R.F.S., VASCONCELLOS N.J.S. **Potencial toxicológico de metais presentes em solos de cemitérios de Santa Maria – RS** [Toxicological potential of metals found in soil of cemeteries in Santa Maria – RS]. Rev. Ambient. Água; 11:145-55, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1723>. Acesso em 16 de abr. 2023.

HOWLETT, M.; RAMESH, M. **Studying Public Policy: Policy Cycles and Policy Subsystems**. OxfordOxford University Press, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2019. **Produto Interno Bruto: setor indústria extrativa mineral**. Disponível em:

<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5932#/n1/all/v/6562/p/201901,201902,201903,201904,202001/c11255/all/d/v6562%201/v,p,t+c11255/resultado>. Acesso em 23 de abr. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MUSEUS - IBRAM. **Relatório Anual de Atividades: julho de 2018** - junho de 2019, 2019. Disponível em: <http://portaldamineração.com.br/ibram/wp-content/uploads/2019/07/relatorio-anual-2018-2019.pdf>. Acesso em 23 de abr. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS - IBAMA. **Rompimento de barragem da Vale em Brumadinho MG destruiu 269,84 hectares**, 2019. Disponível em: <https://bit.ly/2WPdzVN>. Acesso em 16 de abr. 2023.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. **Informativo no 57**. Qualidade das Águas do Rio Paraopeba, após o desastre na barragem B1 da Mineradora Vale/SA no município de Brumadinho - Minas Gerais. Belo Horizonte, 2020.

INTERNATIONAL AGENCY OF RESEARCH ON CANCER - IARC. **Agents classified by the iarc monographs**, v. 1–123, 2019.

KADER, M.; LAMB, D.T.; MEGHARAJ, M.; NAIDU, R. **Sorption parameters as a predictor of arsenic phytotoxicity in Australian soils**. *Geoderma* 265, 103–110, 2016.

KUMAR, S. et al. **Omics and biotechnology of arsenic stress and detoxification in plants: Current updates and prospective**. *Environ. Int.* 74, 221–230, 2015.

LEMOS AF. **O Princípio Da Insignificância No Direito Ambiental**. In Carvalho, V.G.; Rezende, E. N. *Direito ambiental e desenvolvimento sustentável: edição comemorativa dos dez anos da Escola Superior Dom Helder Câmara*. Belo Horizonte: Escola Superior Dom Helder Câmara, p. 217-41, 2013.

MACHADO, I., BUHL, V., & MA € NAY, N. **Total arsenic and inorganic arsenic speciation in groundwater intended for human consumption in Uruguay: Correlation with fluoride, iron, manganese and sulfate**. *Science of the Total Environment*, 681, 497–502, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.107>. Acesso em 23 de abr. 2023.

MCLEAN, J.E., BLEDSOE, B.E. *Behavior of metals in soils*. (EPA/540/S-92/018). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., 1992.

MELLO, F. M.; PIASENTIN, C. **A história das Barragens no Brasil, séculos XIX, XX e XXI: cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens**. Rio de Janeiro: CBDB, 2011.

MEUNIER, L., WALKER, S.R., WRAGG, J., PARSONS, M.B., KOCH, I., JAMIESON, H.E., & REIMER, K.J. **Effects of soil composition and mineralogy on the**

**bioaccessibility of arsenic from tailings and soil in gold mine districts of Nova Scotia.** Environmental Science & Technology, 44(7), 2667–2674, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/es9035682>. Acesso em 23 de abr. 2023.

NRIAGU, J.O. **Mercury pollution from the past mining of gold and silver in the Americas.** Sci. Total Environ. 149, 167–181, 1994.

ONO, F.B., GUILHERME, L.R.G., MENDES, L.A., & CARVALHO, G.S. **Replication of an ivg protocol to estimate bioaccessible arsenic in materials from a gold mining area in Brazil.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, 36(4), 1355–1360, 2012a. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000400029>. Acesso em 23 de abr. 2023.

\_\_\_\_\_. **Arsenic bioaccessibility in a gold mining area: a health risk assessment for children.** Environmental Geochemistry and Health, 34, 457–465, 2012b. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10653-011-9444-9>. Acesso em 23 de abr. 2023.

PASSOS, F. D.; COELHO, P.; DIAS, A. **(Des)territórios da mineração: planejamento territorial a partir do rompimento em Mariana, MG.** Cadernos Metrôpole, v. 19, n. 38, p. 269–297, 2017.

PAYE H.S., MELLO J.W.V., ABRAHÃO W.A.P., FERNANDES FILHO E.I., DIAS L.C.P., CASTRO M.L.O., MELO S.B., FRANÇA M.M. **Valores de referência de qualidade para metais pesados em solos no Estado do Espírito Santo.** Rev Bras Cienc Solo, 34-6:2041–51, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000600028>. Acesso em 24 de abr. 2023.

PEREIRA JR J.S. **Legislação brasileira sobre poluição do ar – estudo;** Biblioteca Digital da Câmara dos Deputados; 2007. Disponível em: <http://bd.camara.gov.br>. Acesso em 23 de abr. 2023.

PEREIRA, D.M., CABRAL, S.M. DE F., GUIMARÃES, H.O.R., MÂNGIA, A.A.M. **Brumadinho: muito mais do que um desastre tecnológico,** 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23813.60643>. Acesso em 23 de abr. 2023.

PIRETE, W.; GOMES, R.C. **Tailings Liquefaction Analysis Using Strength Ratios and SPT/CPT Results.** SOILS and ROCKS an International Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Publication of ABMS - Brazilian Association for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering SPG - Portuguese Geotechnical Society, Volume 36, N. 1, 2013.

REDE AMAZÔNICA DE INFORMAÇÕES SOCIOAMBIENTAIS GEORREFERENCIADAS. **Looted Amazon,** 2020. Disponível em: <https://garimpoilegal.amazoniasocioambiental.org/story>. Acesso em 23 de abr. 2023.

ROBERTSON, P.K., MELO, L., WILIAMS, D.J., WILSON, G.W. **Report of the Expert Panel on the Technical Causes of the Failure of Feijão Dam I**. December 12, 2019. Disponível em: <http://www.b1technicalinvestigation.com/pt/>. Acesso em 23 de abr. 2023.

ROCHMAN, C. M. **Ecologically relevant data are policy-relevant data**. *Science*, v. 352, n. 6290, p. 1172, 2016.

SAKUMA, Y. et al. **DNA-binding specificity of the ERF/AP2 domain of Arabidopsis DREBs, transcription factors involved in dehydration- and cold-inducible gene expression**. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 290, 998–1009, 2002.

SÃO PAULO, Estado. **Lei nº 13.577**, de 8 de julho de 2009. – Dispõe sobre diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento de áreas contaminadas, e dá outras providências correlatas. *Diário Oficial do Estado, São Paulo*; 2009. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/2009/lei-13577-08.07.2009.html>. Acesso em 10 de abr. 2023.

\_\_\_\_\_. **Decreto nº 59.263**, de 5 junho de 2013. Regulamenta a Lei nº 13.577, de 2009, que dispõe sobre diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento de áreas contaminadas, e dá providências correlatas. *Diário Oficial do Estado, São Paulo*; 2013. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/2013/decreto-59263-05.06.2013.html#:~:text=Artigo%201%C2%BA%20%2D%20Este%20decreto%20regulamenta,forma%20a%20tornar%20seguros%20seus>. Acesso em 10 de abr. 2023.

SMEDLEY, P.L.; KINNIBURGH, D.G. **A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters**. *Appl. Geochemistry* 17, 517–568, 2002. U.S. Geological Survey. *Mineral commodity summaries 2020*: U.S. Geological Survey, 200 p., 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3133/mcs2020>. Acesso em 24 de abr. 2023.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME – UNEP. **Declaration of the united nations conference on the human environment**. Stockholm. 1972. Disponível em: [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/28247/Stkhm\\_DcltnHE.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/28247/Stkhm_DcltnHE.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Acesso em 24 de abr. 2023.

VALE. **Form 20-F: Annual report from Securities and Exchange Commission**, 2019. Disponível em: [http://www.vale.com/EN/investors/informationmarket/annual-reports/20f/20FDocs/Vale\\_20-F%20FY2018%20-%20final\\_i.pdf](http://www.vale.com/EN/investors/informationmarket/annual-reports/20f/20FDocs/Vale_20-F%20FY2018%20-%20final_i.pdf) (2019). Acesso em 05 de abr. 2023.

VERGILIO, C. DOS S., LACERDA, D., OLIVEIRA, B.C.V. DE, SARTORI, E., CAMPOS, G.M., PEREIRA, A.L. DE S., AGUIAR, D.B. DE, SOUZA, T. DA S., ALMEIDA, M.G. DE, THOMPSON, F., REZENDE, C.E. DE. **Metal concentrations and biological effects from one of the largest mining disasters in the world (Brumadinho, Minas Gerais,**

**Brazil**). Sci. Rep. 10, 1–12, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62700-w>. Acesso em 23 de abr. 2023.

VIAL, D.S. **Mina de ouro de Cuiabá, QF, Minas Gerais**. In: Schobbenhaus C, Coelho CES (Ed.), Principais depósitos minerais do Brasil (pp 413–419, 1988.

VICQ, R. F. C., MATSCHULLAT, J., LEITE, M., NALINI, H. JR & MENDONÇA, F. P. C., 2015. **Iron Quadrangle stream sediments, Brazil: Geochemical maps and reference values**. Environ. Earth Sci. 74, 4407–4417, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4508-2>. Acesso em 23 de abr. 2023.

WORLD HEALTH ORGANIZATION – WHO. **Guidelines for drinking-water quality**. V.1: Recommendations, 2nd ed. WHO, Geneva. 1993. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/259956>. Acesso em 10 de abr. 2023.

ZONTA, M.; TROCATE, C. **A questão mineral no Brasil - vol. 2: Antes fosse mais leve a carga: reflexões sobre o desastre da Samarco/ Vale / BHP Billiton**. Marabá: Editorial iGuana v. 2, 2016.