

SEGURANÇA DE BARRAGENS DE REJEITOS E IMPACTOS AMBIENTAIS: UMA REVISÃO SOBRE A MINERAÇÃO DE CAULIM EM UMA REGIÃO AMAZÔNICA

TAILING DAM SAFETY AND ENVIRONMENTAL IMPACTS: A REVIEW ON KAOLIN MINING IN AN AMAZON REGION

Matheus Cavalcante Silva 1
Débora Dias Costa Moreira 2
Junior Hiroyuki Ishihara 3
Christiane do Nascimento Monte 4
Ana Cristina Cavalcante Selfe 5
Jadelene Ramos de Souza 6
Carlos David Veiga França 7

Resumo: No Brasil, o estado do Pará tem recebido destaque, sobretudo pela produção e beneficiamento de caulim. Em contrapartida, a demanda por tais insumos minerais acarretou no crescimento da produção de rejeitos que, representa riscos, os quais podem ser evidenciados nos últimos desastres envolvendo barragens de mineração. Este estudo consiste em uma revisão bibliográfica sistemática e objetivou a discussão correlata de métodos de beneficiamento, armazenamento de caulim e inúmeros incidentes envolvendo vazamentos de rejeitos, a fim de subsidiar ações na detecção de áreas mais impactadas. Os resultados demonstraram que o beneficiamento do minério de caulim na área de estudo é realizado por via úmida. Os sistemas de armazenamento de rejeitos de caulim em Barcarena-PA são mais inseguros em relação aos sistemas alternativos de disposição, resultando em eventos de vazamentos de rejeitos de caulim em corpos hídricos regionais e áreas de espraçamento utilizadas para balneabilidade.

Palavras-chaves: Beneficiamento Mineral. Rejeitos de Caulim. Gestão Ambiental. Amazônia.

Abstract: In Brazil, the state of Pará has received attention, especially for the production and processing of kaolin. On the other hand, the demand for such mineral inputs has led to the growth of tailings production, which represents risks, which can be evidenced in recent disasters involving mining dams. This study consists of a systematic bibliographical review and aimed at discussing related methods of processing, kaolin storage and numerous incidents involving waste leaks, in order to support actions to detect the most impacted areas. The results demonstrated that the processing of kaolin ore in the study area is carried out via the wet process. Kaolin tailings storage systems in Barcarena-PA are more unsafe in relation to alternative disposal systems, resulting in events of kaolin tailings leaking into regional water bodies and spreading areas used for bathing.

Keywords: Mineral Processing. Kaolin Tailings. Environmental Management. Amazon.

1 -Especialista em Geologia, Faculdade Única. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9931584436765466>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6139-3624>, E-mail: matheuscavalcante_s@hotmail.com

2 - Doutora em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, UFPA. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8268374800334091>. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8572-0207>. E-mail: debora.dias@ufpa.br

3 - Doutor em em Desenvolvimento Sustentável do Trópico Úmido, UFPA. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3498874642887006>. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0081-7913>. E-mail: jhi@ufpa.br

4 - Doutora em Geociências, UFF. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6178162183692365>. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4840-7777>. E-mail: christiane.monte@yahoo.com.br

5 - Graduanda em Engenharia Sanitária e Ambiental, UFPA. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1214058547708741>. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4543-5888>. E-mail: ana.selfe@tucurui.ufpa.br

6 - Graduanda em Engenharia Sanitária e Ambiental, UFPA. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0422213339814639>. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7153-0984>. E-mail: jadelene.souza@tucurui.ufpa.br

7 -Mestre em Geografia, UEMA. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6038013213802762>, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8862-5520>, E-mail: tutorveiga@gmail.com

Introdução

A mineração constitui uma das mais antigas atividades da humanidade, cuja importância para a economia brasileira tornou-se perceptível desde o período colonial, marcado pelas incursões de bandeirantes em busca de metais preciosos, até aos mais recentes conhecimentos geológicos, descobertas de depósitos minerais e adequações nos processos industriais, subsidiando o desenvolvimento socioeconômico nacional e, principalmente, nos estados de Minas Gerais e Pará (IBRAM, 2016; ANM, 2021).

O estado do Pará possui grande potencial para se tornar um dos maiores centros mineradores mundiais, principalmente considerando que mais de 80% do total de exportações estaduais estão relacionadas às indústrias de mineração e de transformação mineral, que totalizam bilhões de reais (SIMINERAL, 2019), com destaque para o processamento de caulim beneficiado, com participação de 90,6% da produção nacional total, contribuindo com 1,6 Mt em um total de 1,77 Mt (USGS, 2019; USGS, 2021).

Em contrapartida, desde a Revolução Industrial, a demanda por insumos minerais cresceu de modo acentuado, ocasionando uma crescente geração de rejeitos, sendo estes resultantes dos processos de extração e produção de minérios (IBRAM, 2016). Tais rejeitos possuem métodos distintos de disposição e armazenamento, incluindo diferentes tipos de estruturas, tais como: cavas exauridas, minas subterrâneas, pilhas, depósitos, ou barragens de rejeitos (MEDEIROS E LIMA, 2021). Apesar disso, o armazenamento de rejeitos sempre pode apresentar riscos relacionados à contaminação pela presença de metais/metaloídes passíveis à dispersão (FONSECA *et al.*, 2020).

Nos últimos anos, o Brasil vivenciou os maiores desastres envolvendo barragens de rejeitos de mineração, que constantemente apresentaram ineficiência na contenção da contaminação, conforme destacam Batista *et al.* (2008) e Martins *et al.* (2014). Nos anos de 2015 e 2019, em Mariana e em Brumadinho, respectivamente, os eventos foram responsáveis por diversos danos ecológicos, socioeconômicos e mortes humanas (SÁ *et al.*, 2021; QUEIROZ *et al.*, 2021; FELIZARDO *et al.*, 2021). Em detrimento disso, o Governo tem se mobilizado por meio de ações legislativas, para garantir padrões de segurança, a fim de mitigar a probabilidade de ocorrência de incidentes, acidentes ou desastres, amenizando suas consequências, tal como exemplifica o Decreto nº 11.310/2022 (BRASIL, 2022).

Esta pesquisa considerou um importante município da Amazônia paraense, sendo ele: Barcarena-PA. A escolha deste município justifica-se pela instalação de grandes empresas do setor minero-metalúrgico na região, formado por empresas como a Pará Pigmentos S.A e Imerys Rio Capim Caulim S.A. (maior planta de beneficiamento de caulim do mundo), as quais utilizam o estuário do Rio Pará como via de escoamento logístico de recursos minerais para o oceano Atlântico (RODRIGUES *et al.*, 2019; COSTA *et al.*, 2022). Além disso, este município apresenta um extenso histórico de registros de impactos ambientais nas últimas décadas, sobretudo de acidentes por vazamentos de rejeitos de mineração de caulim (STEINBRENNER *et al.*, 2020).

Pressupõe-se que os eventos decorrem por conta de lacunas no controle de estruturas de armazenamento de rejeitos de mineração, os quais ocasionam diversos impactos ambientais que podem perdurar por décadas. Diante disto, esta revisão de literatura objetiva identificar pesquisas que discutam: I) os métodos de tratamento de minérios de caulim na região, II) métodos de armazenamento de rejeitos de caulim e a classificação das estruturas segundo a Agência Nacional de Mineração (ANM) e III) sumarizar o histórico de desastres ocorridos nas últimas décadas, como subsídio à gestão ambiental de um ecossistema impactado da Amazônia.

Área de Estudo

O município de Barcarena integra a região nordeste do Estado do Pará, sendo

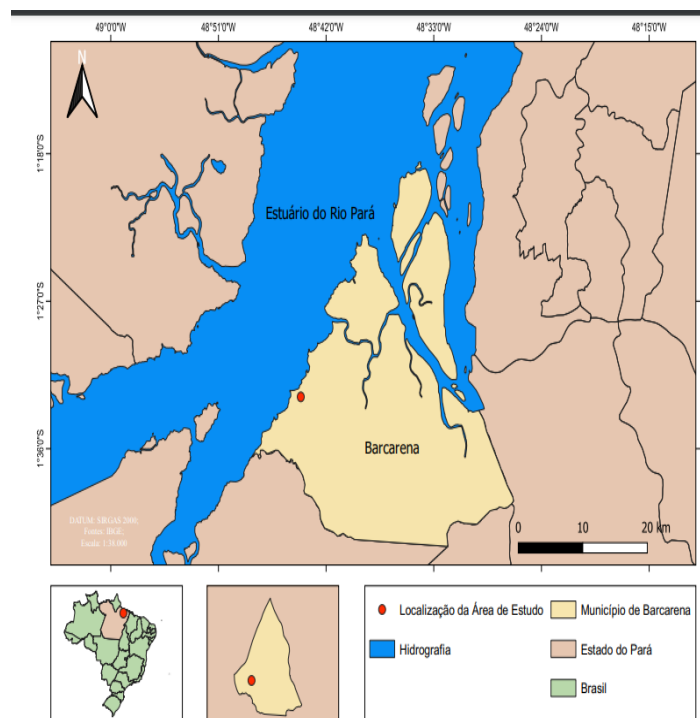
componente da mesorregião metropolitana de Belém, dispendo de área territorial de 1.310.338 km², e população estimada de 129.333 pessoas (IBGE, 2021). A sede municipal apresenta as seguintes coordenadas geográficas: 01°30'24" de latitude Sul e 48°37'12" de longitude a Oeste de Greenwich (MARTINS; MENDES, 2011), e constitui zona limítrofe aos municípios de Acará, Moju, Abaetetuba e Belém, e à oeste pelo Rio Pará, Baía do Marajó e Baía do Guajará, cujo acesso por transporte urbano é feito a partir da capital Belém pelas rodovias estaduais (PA – 316, PA – 481 e PA – 483) ou por meio hidroviário (NEVES, 2002).

O clima da região é enquadrado na classificação de Köppen (1936) como tropical chuvoso (Afi) (A – clima tropical úmido, com temperatura média do mês mais frio superior a 18° C; fi – ocorrência de chuvas o ano todo), como clima de floresta tropical úmida, apresentando uma precipitação durante todo o ano, com média mensal superior a 60 mm e uma temperatura média de 26,3° C e umidade relativa em torno de 85% (SILVA, 2012). A variação térmica é mínima, e as precipitações totalizam mais de 2.500 mm por ano, ocorrendo maiores volumes nos primeiros seis meses do ano (IDESP, 2011). Essa variação sazonal é determinada pela posição da Zona de Convergência Intertropical de modo anual (INMET, 2018).

Este município, adjacente à zona estuarina do rio Pará, está disposto sobre um espesso pacote sedimentar de idade Cenozoica, dispendo de estratigrafia pouco variável, cuja porção continental apresenta sedimentos do Paleoceno e Neógeno (Formação Barreiras) e nas margens dos rios estão os sedimentos do Quaternário (COSTA *et al.*, 2022). A formação Barreiras está exposta na maior parte do município e é composta por rochas sedimentares, tais como arenitos, siltitos e argilitos, de coloração cinza amarelada e espessura de até 100 metros, além de concreções lateríticas do Mioceno Superior (OLIVEIRA, 2013).

Em síntese, o município de Barcarena compreende uma importante porção geográfica do estado do Pará, oferecendo inúmeros serviços ecossistêmicos e sendo fundamental para a economia estadual e nacional, principalmente em decorrência do escoamento de *commodities* e produtos minerais, possível devido à presença de uma malha hidrográfica regional privilegiada, responsável por interligar o Estuário do Rio Pará ao Oceano Atlântico (Figura 1).

Figura 1. Área de estudo, com ênfase na localização do município de Barcarena-PA e no Estuário do Rio Pará



Fonte: Autores, 2023.

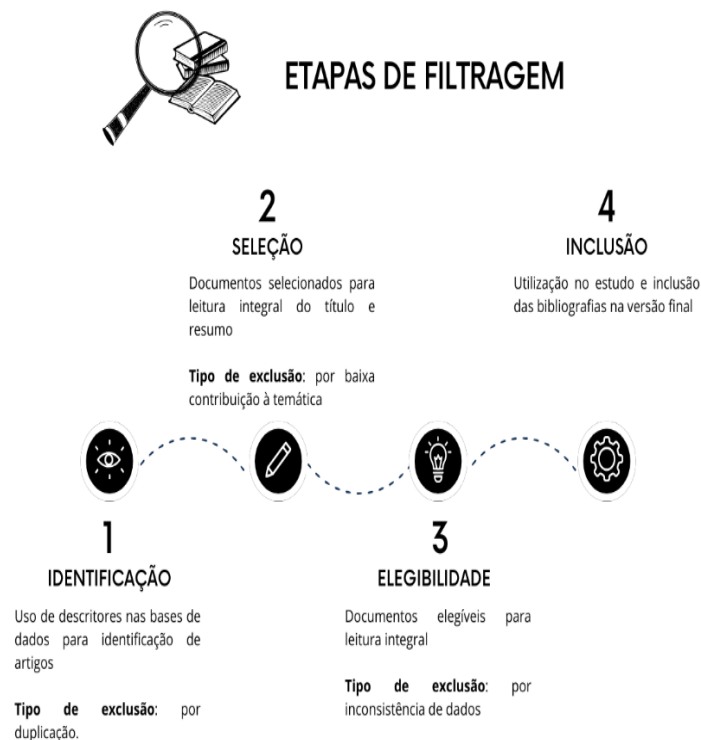
Metodologia

Na etapa de revisão sistemática, foram pesquisados dados na plataforma *Scholar Google*, sendo considerados artigos de alta relevância científica, inseridos em periódicos revisados por pares e indexados, cujo recorte temporal correspondeu a um período de 10 anos (2014-2023). De modo complementar, também foram consideradas dissertações de mestrado e teses de doutorado. Além disso, sucedeu-se uma etapa de pesquisa documental, considerando dados obtidos na Polícia Civil do Pará (PC/PA) e do Ministério Público do Pará (MP/PA), a fim de verificar o histórico de vazamento de rejeitos de mineração de caulim em Barcarena-PA.

Na estratégia de busca, foram utilizados os seguintes descritores isolados ou combinados, além de seus correspondentes na língua inglesa: Beneficiamento mineral/ Mineral processing; Tratamento de minérios/Ore treatment; Beneficiamento de caulim/ Kaolin processing; Armazenamento de rejeitos de mineração/Mining tailings storage; Barragens de rejeitos de mineração/Mining tailings dams; Segurança de barragens/ Dam safety; Classificação de Barragens/Dam's classification; Métodos construtivos de barragens de mineração/Mining dam construction methods; Acidentes e Incidentes de mineração/ Mining Accidents and Incidents.

Os documentos que não apresentaram o texto completo disponível e aqueles que não dispuseram relação com os objetivos propostos pelo estudo foram excluídos. Posteriormente, os estudos agrupados seguiram etapas de filtragem (Figura 2): 1 - Identificação; 2 - Seleção; 3 - Elegibilidade e 4 - Inclusão, tendo por base o modelo de Principais Itens para Relatar Revisões Sistemáticas e Meta-análises (PRISMA).

Figura 2. Infográfico representativo das etapas metodológicas seguidas para a revisão sistemática



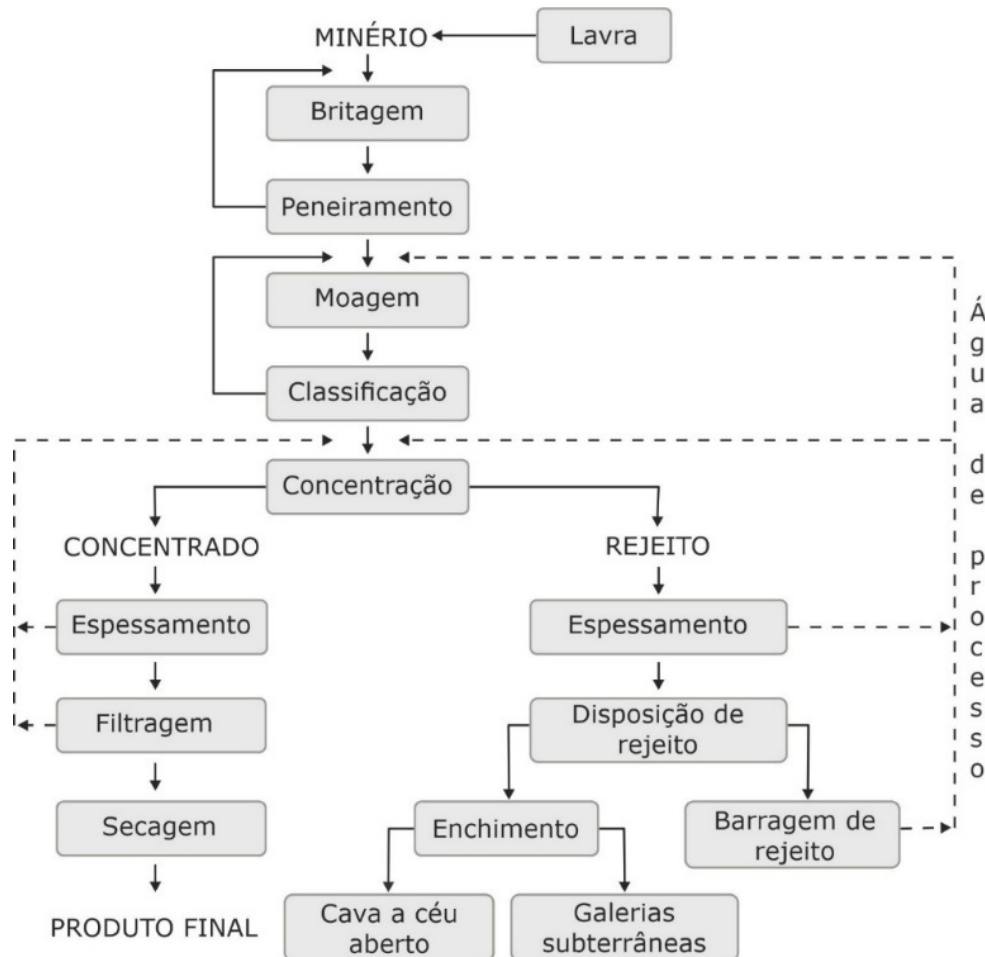
Fonte: Autores, 2023.

Resultados e Discussões

A grande maioria dos minérios encontrados naturalmente necessitam de algum modo de beneficiamento visando a melhoria das suas propriedades físico-químicas. O beneficiamento de minérios consiste na separação física ou físico-química dos minerais, a fim de separar os minerais com valor econômico para a obtenção de uma porção que contenha a maior parte dos minerais valiosos (LUZ E LINS, 2018). Esse processo induz a separação de maneira seletiva e controlada, possibilitando a distinção do concentrado e do rejeito (THOMÉ E PASSINI, 2018). Duas etapas são as responsáveis pelos produtos gerados, a extração/lavra e o beneficiamento/concentração.

O primeiro momento da fase de lavra é responsável pela produção de resíduos/ escombros, compostos por material estéril proveniente da rocha extraída para obtenção de minério, sem aproveitamento imediato, sendo passível de reutilização em construções de barragens ou sistemas alternativos de disposição de rejeitos, além do enchimento das galerias subterrâneas. Apenas no segundo momento origina-se o, então, rejeito de minério (Figura 3), o qual representa um material proveniente da separação com o concentrado, sendo geralmente constituído por partículas muito finas do processo de beneficiamento mineral, como areia fina, silte e argila (IPEA, 2012).

Figura 3. Diagrama representativo das etapas típicas do tratamento de minério



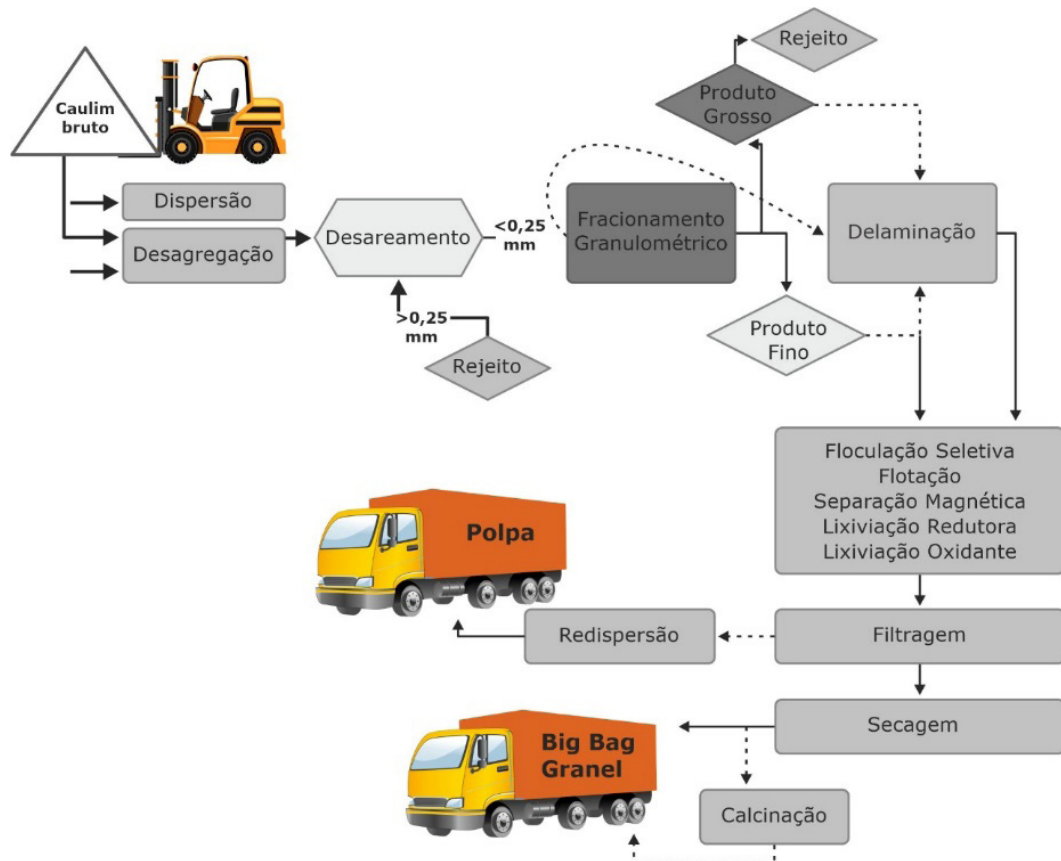
Fonte: Adaptado de Luz e Lins, 2018.

O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de caulim processados por indústria, com produção na ordem de 1,8 milhões de toneladas por ano (USGS, 2019; USGS, 2021). No Brasil, as principais aplicações são como agente de enchimento no preparo de papel; como agente de cobertura para papel couché e na composição de pastas cerâmicas (GRISSOLIA *et al.*, 2021).

O beneficiamento do caulim é responsável pela remoção de fases minerais indesejadas, assegurando a melhoria das propriedades críticas da argila do produto, a exemplo da

composição química, da distribuição granulométrica e do brilho, sendo destinada a diversos usos (RAMASWAMY E RAGHAVAN, 2010). Há duas possibilidades para o beneficiamento do caulim: via seca e via úmida. O primeiro método é destinado a caulins com alvura e granulometria adequadas ao mercado, enquanto o método por via úmida (Figura 4) compreende dispersão, desareamento, fracionamento, separação magnética, floculação seletiva, alvejamento químico, filtragem e secagem (GRISSOLIA *et al.*, 2021).

Figura 4. Diagrama simplificado de beneficiamento de caulim (via úmida)



Fonte: Adaptado de Luz e Lins, 2005; Grissolia *et al.*, 2021

Uma grande preocupação em relação às indústrias minerais diz respeito à produção da elevada quantidade de rejeitos, os quais podem ser dispostos em diferentes tipos de estruturas (PAIXÃO E WILKEN, 2021; MEDEIROS E LIMA, 2021). A seleção da metodologia de armazenamento varia de acordo com a natureza do processo minerário, as condições geológicas e topográficas do local, as propriedades mecânicas dos materiais, o impacto ambiental dos contaminantes dos rejeitos e a climatologia da região (IBRAM, 2016).

De acordo com Thomé e Passini (2018), o método mais comumente aplicado para o armazenamento dos rejeitos da indústria mineral é a sua disposição em lagoas de decantação, que são represados por barragens de rejeitos. A Agência Nacional de Mineração (ANM), por meio da Resolução ANM nº 95/2022 (ANM, 2022), define as barragens de mineração, conceituando-as da seguinte maneira:

Art. 2º

IV – Barragem de Mineração:

a) barragens, barramentos, diques, cavas com barramentos construídos, associados às atividades desenvolvidas com base em direito minerário, construídos em cota

superior à da topografia original do terreno, utilizados em caráter temporário ou definitivo para fins de contenção, acumulação, decantação ou descarga de rejeitos ou de sedimentos provenientes de atividades de mineração com ou sem captação de água associada, compreendendo a estrutura do barramento e suas estruturas associadas, excluindo-se deste conceito as barragens de contenção de resíduos industriais;

b) estruturas construídas por meio de disposição hidráulica de rejeitos, como um maciço permeável, dotado de sistema de drenagem de fundo, suscetíveis à liquefação (ANM, 2022, p. 2).

Além disso, a legislação considera ainda dois critérios para o enquadramento das barragens sob jurisdição nacional, o Critério de Risco (CRI) e o Dano Potencial Associado (DPA). O CRI representa uma “classificação da barragem de acordo com os aspectos que possam influenciar na possibilidade de ocorrência de acidente ou desastre”, a qual considera características técnicas e outros fatores (ANM, 2022, p. 3).

Por outro lado, o Dano Potencial Associado (DPA), refere-se a um “dano que pode ocorrer devido ao rompimento, vazamento, (...) ou mau funcionamento de uma barragem, independentemente da sua probabilidade de ocorrência” e que pode ocasionar impactos de diferentes naturezas (ANM, 2022, p. 4). De todo modo, ambos os critérios supracitados auxiliam os empreendedores e os órgãos nacionais quanto à periodicidade de monitoramento e, primordialmente, ao atendimento à legislação, às normas e aos padrões de segurança (ANM, 2022).

De acordo com a Agência Nacional de Mineração (ANM), a Imerys Rio Capim Caulim armazena o rejeito da mineração de caulim em barragens de rejeitos de mineração, totalizando 11 estruturas, sendo que todas elas estão inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) (ANM, 2023). As características técnicas das barragens estão especificadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características técnicas das barragens de mineração (Imerys Rio Capim Caulim, Barcarena-PA)

Barragem	Área do reservatório	Comprimento da crista	Categoria de Risco - CRI	Dano Potencial Associado - DPA
Bacia 2	139.000m ²	1.280,00m	Baixa	Alto
Bacia 1 A	100.000m ²	1.177,40m	Baixa	Alto
Bacia 3	85.000m ²	1.050,00m	Baixa	Alto
Bacia 5 A	59.000m ²	977,20m	Baixa	Alto
Bacia 5 C	93.000m ²	1.180,00m	Baixa	Alto
Bacia B 4	21.000m ²	535,00m	Baixa	Alto
Bacia 1 B	64.000m ²	540,00m	Baixa	Alto
Bacia 5 B	28.000m ²	780,00m	Baixa	Alto
Bacia 6 A	46.992m ²	1.314,00m	Baixa	Alto
Bacia de segurança	5.340m ²	597,00m	Baixa	Alto
Bacia 6 B	129.000m ²	1.700,00m	Baixa	Alto

Fonte: ANM, 2023

É importante destacar que, apesar de todas as barragens estarem classificadas com CRI baixa, este critério tem sido questionado desde o desastre em Brumadinho, envolvendo

a barragem I da Mina Córrego do Feijão, a qual constava como CRI médio até o momento do seu rompimento, em 2019 (DOMINGOS E CASTILHOS, 2019). Além disso, é importante destacar que os casos de vazamentos de rejeitos na área de estudo têm sido encarados como incidentes isolados por parte de órgãos fiscalizadores, apesar de claras evidências da existência de tubulações e outras estruturas clandestinas no entorno da mineradora responsável (STEINBRENNER *et al.*, 2020).

Para o Conselho Nacional do Meio Ambiente (1986), impacto ambiental é:

Qualquer **alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente**, causada por qualquer forma de matéria e energia **resultante das atividades humanas** que, direta ou indiretamente, afetam a saúde, a segurança, o bem-estar da população, as atividades sociais e econômicas, a biota, as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente e a qualidade dos recursos ambientais (CONAMA, 1986, p. 1, grifo nosso).

Nesse viés, a Constituição Brasileira possui leis específicas que visam regulamentar a atividade mineradora e ações potencialmente poluidoras. O artigo 225 da Constituição Federal dispõe 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-la e preservá-la para as presentes e futuras gerações (BRASIL, 1988, art. 214, s/p, grifo nosso).

Apesar disso, o município de Barcarena-PA, caracterizado pela implantação de grandes projetos, tem sido um cenário recorrente de desastres ambientais registrados na Amazônia, sobretudo pelos diversos casos de vazamentos de rejeitos derivados do beneficiamento dos minérios de caulim. Nesse sentido, desde o ano de 2004, existem identificação, registro e descrição de impactos envolvendo vazamentos de rejeitos, que podem ser verificados em inquéritos da Divisão Especializada em Meio Ambiente (DEMA), da Polícia Civil do estado do Pará (PC/PA); laudos do Instituto de Criminalística do Centro de Perícias Científicas Renato Chaves (CPC); relatórios do Instituto Evandro Chagas, do Ministério da Saúde (IEC/MS) (LEMOS, PIMENTEL, 2021), conforme atesta a Tabela 2.

Tabela 2. Histórico de vazamentos de rejeitos de Caulim no município de Barcarena-PA

Ano	Evento	Indicadores Ambientais	Resultado de análises e conclusão de investigações
2004 (Junho)	Falta de manutenção dos equipamentos.	Alteração da cor, cheiro e sabor da água e mortandade de peixes.	Poluição da água e do solo (Indiciamento dos responsáveis).
2006 (Julho)	Infiltração e vazamento na bacia de rejeitos n.º 03.	Alteração da cor da água dos poços de captação.	Poluição da água e solo (Indiciamento dos responsáveis).
2007 (Junho)	Fissuras e vazamento em bacia de rejeitos de caulim.	Alteração da cor da água dos poços de captação.	Poluição da água e solo. (Indiciamento dos responsáveis).
2008 (Março)	Vazamento de caulim no rio das Cobras e nos igarapés Curuperé, Dendê e São João.	Alteração da cor da água dos poços de captação.	Poluição da água e solo.

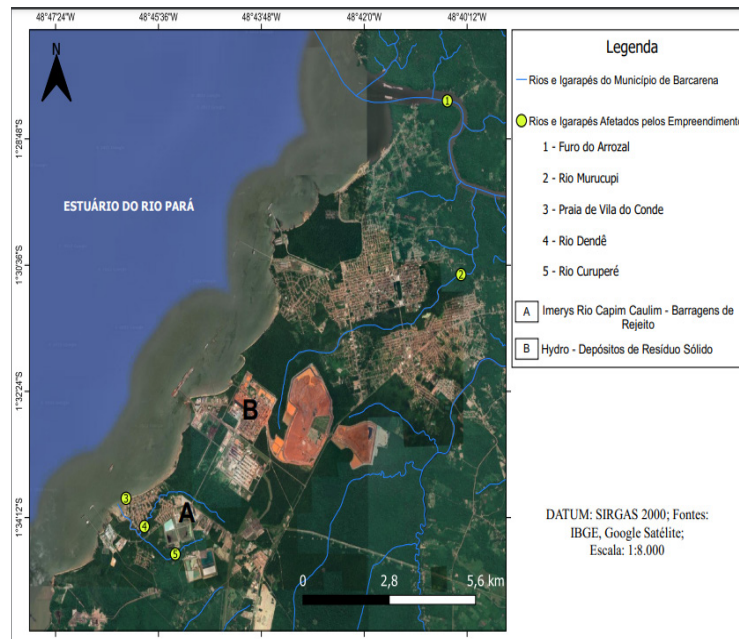
2011 (Novembro)	Rompimento de mineroduto e vazamento de polpa de caulim.	Alteração da coloração da água do igarapé Maricá.	Poluição da água e solo (Indiciamento dos responsáveis).
2012 (Julho)	Vazamento de material da bacia de rejeitos pelo duto da empresa.	Alteração de coloração da água do igarapé Maricá e rio Dendê.	Poluição da água e solo (Indiciamento dos responsáveis).
2013 (Agosto)	Substituição de mineroduto e vazamento de caulim.	Alteração da coloração da água do igarapé Curuperé.	Poluição da água e solo (Indiciamento dos responsáveis).
2014 (Maio)	Vazamento de rejeitos de caulim.	Contaminação dos igarapés Curuperé e Dendê.	Poluição da água e solo.
2016 (Outubro)	Vazamento de polpa de caulim da tubulação de saída do evaporador 6.	Alteração da coloração da água do Estuário do Rio Pará (Baía do Marajó).	Poluição pelo lançamento de caulim no solo, na praia e no rio Pará (Indiciamento dos responsáveis).
2022 (Novembro)	Vazamento do minério caulim.	Alteração da coloração do rio Murucupi até a praia do Conde, no distrito de Vila do Conde.	Poluição de recursos hídricos (Boletins de ocorrência registrados na Polícia Civil do município).

Fonte: Adaptado de PC/PA, 2004; 2006; 2007; 2012a,b; 2016a,b; 2017; MP/PA, 2016; STEINBRENNER *et al.*, 2020; LEMOS, PIMENTEL, 2021; G1 Pará, 2022

Sob essa perspectiva, destaca-se ainda que a maioria dos eventos envolvendo os vazamentos de rejeitos de caulim no entorno desse empreendimento atingiu diretamente a principal hidrografia da área, o estuário do Rio Pará, seja de modo direto, ou indiretamente por meio de seus pequenos tributários locais, conforme relatado pelas principais bibliografias.

Vieira e Vieira (2019) destacam a importância dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG's), visto que possibilitam o manuseio de grande volume de dados, fornecem estratégias para as tomadas de decisão, e contribuem na elaboração de produtos úteis para auxílio do planejamento territorial. Considerando a existência de uma relação espacial entre os corpos hídricos impactados e a proximidade destes com as barragens de rejeitos, um mapa temático enfatizando as principais áreas atingidas foi confeccionado (Figura 5), a fim de subsidiar a gestão ambiental da área por parte dos órgãos competentes.

Figura 5. Área de estudo, com ênfase nos corpos hídricos impactados por eventos envolvendo barragens de rejeitos de mineração de caulim



Fonte: Autores, 2023.

É válido ressaltar que estes corpos hídricos estão em áreas urbanizadas situadas nos arredores de áreas portuárias de Barcarena-PA. As zonas portuárias possuem papel importante, tanto do ponto de vista econômico quanto geográfico, com localização próxima aos polos industriais e facilitam o escoamento de diversos produtos (BEBIANNI *et al.*, 2015). Apesar disso, estas localidades estão frequentemente associadas a impactos ambientais, sobretudo à poluição da água (ZOBBI, 2017), emissão de águas residuais, despejos acidentais e outras atividades antrópicas (BOCCHETTI *et al.*, 2008). Tais atividades podem desencadear diversos danos ecológicos, a exemplo da eutrofização e mortandade de peixes (SMITH *et al.*, 2017).

Em regra geral, a perda de qualidade das águas nos estuários se elucida como uma forma de poluição da água (KARYDIS E KITSIOU, 2013). Considerando que a água é um bem natural indispensável para a sobrevivência humana e essencial para o desenvolvimento da maioria das atividades humanas (Organização Mundial da Saúde, 2014), o panorama ambiental apresentado por esta pesquisa representa um risco potencial ao uso múltiplo das águas, especialmente em uma região com intenso pluralismo sociocultural e de grande importância econômica.

Conclusões

Neste estudo foram discutidos aspectos importantes sobre o controle de estruturas de disposição/armazenamento de rejeitos de mineração de caulim, por meio de vertentes como os eventos de vazamentos de rejeitos de caulim e a ocorrência de desastres ambientais em uma importante área para o desenvolvimento econômico da Amazônia, principalmente considerando os desastres em barragens de mineração nacionais recentes e o atual panorama de reforço legislativo a fim de reforçar a segurança das estruturas e dos seus entornos.

O processo de beneficiamento de caulim na área de estudo é realizado por via úmida, sendo mais complexo e com diversas etapas. Os métodos de armazenamento de rejeitos de caulim em Barcarena ainda possuem grande relação com o histórico método de contenção de rejeitos com teores de líquidos em barragens de mineração e, apesar de apresentarem categoria de risco baixa, ainda requerem cuidados periódicos devido, sobretudo, ao histórico de desastres. Por outro lado, fica evidente a necessidade de considerar investimentos para

a disposição de rejeitos com maiores teores de sólidos, demonstrando aderência às formas alternativas e mais seguras de disposição de produtos indesejados da mineração.

Os dez eventos de vazamentos de rejeitos de caulim ocorridos em Barcarena-PA elucidam uma fatídica realidade vivenciada nas duas últimas décadas e que, culturalmente, foram estabelecidos devido à ineficiência da segurança das estruturas, bem como da gestão ambiental em áreas do entorno. Posto isso, percebeu-se que as principais áreas atingidas foram os corpos hídricos da área (Furo do Arrozal, Rio Murucupi, Rio Dendê e Rio Curuperé), além de áreas históricas e turísticas utilizadas para a balneabilidade, tais como a Praia de Vila do Conde e demais espraamentos em suas imediações.

Por fim, enfatiza-se ainda, como sugestão aos estudos futuros, a necessidade de pesquisas que enfoquem em análise da dispersão espacial de contaminantes em sedimento e na água da região, considerando também as especificidades climáticas da região amazônica e suas peculiaridades em relação à sazonalidade, profundidade dos corpos hídricos e fluxos hidrodinâmicos, fazendo-se valer de aspectos legislativos do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA e embasamentos técnico-científicos a fim de salvaguardar a integridade ambiental no entorno de empreendimentos minerários.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal do Pará – UFPA, ao Núcleo de Desenvolvimento da Amazônica em Engenharia – NDAE e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental – PEBGA, que possibilitaram a realização da presente pesquisa. Agradecem ainda ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica e de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação PIBIC - PROPESP/PIBIC, pela oportunidade de bolsa na categoria: PIBIC/UFPA – INTERIOR (Edital nº 13/2023 – PROPESP) e à A Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PROPESP), em parceria com a Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas (FAPESPA), pela concessão de bolsa na categoria Bolsas de Mestrado para Cursos Profissionais (Edital nº 20/2023 – PROPESP/edital nº 005/2023 - FAPESPA).

Referências

Associação Brasileira de Alumínio - ABAL. 2020. Trabalho da CBA de restauração florestal em áreas mineradas é destaque internacional. Disponível em: <https://abal.org.br/> Acesso em: 10 jan. 2020.

Agência Nacional de Mineração - ANM. 2021. Anuário mineral brasileiro: principais substâncias metálicas. Brasília - DF. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb-2021-ano-base-2020.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2023.

Agência Nacional de Mineração – ANM. 2022. Resolução nº 95, de 07 de fevereiro de 2022. Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/legislacao/resolucao-no-95-2022.pdf>. Acesso em: 16 de jun. de 2023.

Agência Nacional de Mineração – ANM. 2023. Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração – SIGBM. Disponível em: <https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico/GerenciarPublico>. Acesso em: 20 de fev. 2023.

Batista, A., Ribeiro, M., Macedo, A., Tonidandel, D., 2008. Parecer Técnico GEDIN nº00107/2008: Barragem Murici. “FEAM”. Disponível em: http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/urcparaopeba/3_reuniao/4-2_votorantim_pt.pdf. Acesso em: 02/12/2013.

Bebianno, M. J. et al. 2015. Integrated approach to assess ecosystem health in harbor areas. *Science of the Total Environment*, [s.l.], v.514, n.1, p. 92- 107.

Bocchetti, R. et al. 2008. Contaminant accumulation and biomarker responses in caged mussels, *Mytilus galloprovincialis*, to evaluate bioavailability and toxicological effects of remobilized chemicals during dredging and disposal operations in harbour areas. *Aquatic Toxicology*, [s.l.], v. 89, n. 4, p. 257-266.

Brasil. 1998. Constituição Federal da República Federativa do Brasil de 1988. Brasília – DF. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em: 06 de jan. de 2023.

Brasil. 2022. Decreto nº 11.310, de 26 de dezembro de 2022. Regulamenta dispositivos da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, para dispor sobre as atividades de fiscalização e a governança federal da Política Nacional de Segurança de Barragens, institui o Comitê Interministerial de Segurança de Barragens e altera o Decreto nº 10.000, de 3 de setembro de 2019. Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-11.310-de-26-de-dezembro-de-2022-453739170>. Acesso em: 07 de jan. de 2023.

Conselho Nacional do Meio Ambiente - Conama. 1986. Resolução Nº 001, de 23 de janeiro de 1986. Publicado no D. O. U. de 17/2/86. IBAMA. Disponível em: http://www.cprh.pe.gov.br/ARQUIVOS_ANEXO/resolu%C3%A7%C3%A3o%20conama%200186;1505;20100818.pdf. Acesso em: 06 de jan. de 2023.

Costa, I.J.L., Silva, C.N., Flores, M.S.A., Santo, L.S. 2022. Atividade portuária em Barcarena (Pará): Caracterização e análise ambiental de seus efeitos no desenvolvimento local da vila de Iupanema. *Revista Brasileira de Geografia Física*, **15**, 03, 1639-1653.

Domingos, L. M. B., Castilhos, Z. C. 2019. Avaliação de riscos à saúde humana e ecológicos por rompimento da Barragem I da Vale em Brumadinho-MG. *VIII Jornada do Programa de Capacitação Institucional – PCI/CETEM*, p. 62-68.

Felizardo, J. P., Muniz, M. C., Vezzone, M., Cardoso, R. P., Wasserman, J., Padilla, R., Migliori, A., Anjos, R. M. 2021. Sources of sedimentary organic matter and assessment of heavy-metal levels in estuarine sediments after Fundão dam breach. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **261**, 107507. DOI: [10.1016/j.ecss.2021.107507](https://doi.org/10.1016/j.ecss.2021.107507)

Fonseca, B., Durães, N., Patinha, C., & Dias, A. G. 2020. Caracterização de solos e sedimentos da mina abandonada de Rio de Frades (Arouca). *Comunicações Geológicas*, **107**, 145-149.

G1 Pará. 2022. Moradores denunciam contaminação de rios e igarapés pelo minério caulim no Pará; empresa confirma ‘escapamento’. Disponível em: <https://g1.globo.com/pa/para/noticia/2022/11/07/moradores-denunciam-contaminacao-de-rios-e-igarapes-pelo-minerio-caulim-no-para-empresa-confirma-escapamento.ghtml>. Acesso em: 02 de jan. 2023.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Cidades e Estados: Barcarena. 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades->. Acesso em: 15 de out. 2023.

Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM. 2016. Gestão e Manejo de Rejeitos de Mineração. Brasília, p. 128. Acesso em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/02/Gestao-e-Manejo-de-Rejeitos-da-Mineracao-2016.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2023.

Instituto de Desenvolvimento Econômico, Social e Ambiental do Pará – IDESP. Estatística

Municipal – Barcarena. 2011.

Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA. 2012. Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas. Brasília: IPEA. Disponível em: [http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/7702/1/RP_Diagn%
c3%b3stico_2012.pdf](http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/7702/1/RP_Diagn%c3%b3stico_2012.pdf). Acesso em: 23 set. 2022.

Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. Arquivos climáticos. Brasília-DF: 2018. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em: 03 de outubro de 2022.

Karydis, M.; Kitsiou, D. 2013. Marine water quality monitoring: a review. *Marine Pollution Bulletin*, [s.l.], v. 77, n. 1-2, p. 23-36, dez.

Lemos, M. A. Q., Pimentel, M. A. S. 2021. Mineração e desastres ambientais com rejeitos de bauxita e caulim no município de Barcarena-Pará-Brasil-Amazônia. *Territorium*, n. 28 (I), 137-156. DOI: https://doi.org/10.14195/1647-7723_28-1_8

Luz, A.B, Lins, F.F. 2018. Introdução ao Tratamento de Minérios. In: Luz, A.B.; Sampaio, J.A.; França, S.C.A (Org.). *Tratamento de Minérios. Centro De Tecnologia Mineral – Cetem*, 6, 1, 3-6. Rio de Janeiro – RJ.

Martins, L., Fonseca, R., Dias, N., Araújo, A., Pinho, A.C. 2014. Análise geoquímica dos sedimentos de um curso de água contaminado por metais pesados na área de uma unidade fabril metalúrgica, Minas Gerais, Brasil. *Comunicações Geológicas*, 101, 1023-1026.

Martins, S. E. M., Mendes, A. C. 2011. Caracterização de depósitos sedimentares recentes da porção superior da Baía de Marajó (margem leste do estuário do Rio Pará, Amazônia). *Pesquisas em geociências*, 38(2), 168-180.

Medeiros, L. T. B., Lima, A. M. M. 2021. Método de dimensionamento espacial aplicado para vazamentos hipotéticos de depósitos de rejeitos de mineração. *Research, Society and Development*, 10, 9, 11210917606 – 11210917606. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i9.17606>

Ministério Público do Estado do Pará – MPPA. 2016. Ação civil pública referente ao inquérito civil público n. 1.23.000.000661/2015-70. Belém: Out., 2016. Disponível em: <<http://www.mpf.mp.br/pa/sala-de-imprensa/documentos/2016/acp-agua-potavel-barcarena>>. Acesso em: 01 de ago. 2022.

Neves, B. V. A. 2002. Estudo geofísico para a caracterização geológica e hidrogeológica da subsuperfície rasa em área de deposição de Rejeitos sólidos no município de Barcarena-Pa. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Universidade Federal do Pará. Belém – PA.

Oliveira, D.C. 2013. Distribuição de metais pesados e isótopos de Pb em sedimentos de fundo do Rio Murucupi-Barcarena-Pará. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geoquímica) – Universidade Federal do Pará. Belém – PA., 86p.

Organização Mundial da Saúde - OMS. 2014. Progress on Sanitation and Drinking Water - Update. Geneva: WHO Library Cataloguing in Publication Data.

Paixão, M. D., Wilken, A. A. P. 2021. Alternativas de disposição de rejeitos de mineração na avaliação de impacto ambiental no estado de Minas Gerais. *Revista Geográfica Acadêmica*, 15(1), p. 33-56.

PC – Polícia Civil, Divisão Especializada Em Meio Ambiente (2004). Inquérito Policial n.º 40/2004.000292-3.Belém/Pa.

PC – Polícia Civil, Divisão Especializada Em Meio Ambiente (2006). Inquérito Policial n.º 40/2006.000267-9. Belém/Pa.

PC – Polícia Civil, Divisão Especializada Em Meio Ambiente (2007). Inquérito Policial n.º 40/2007.000302-4. Belém/Pa.

PC – Polícia Civil, Divisão Especializada Em Meio Ambiente (2012a). Inquérito Policial n.º 40/2012.000205-0.Belém/Pará.

PC – Polícia Civil, Divisão Especializada Em Meio Ambiente (2012b). Inquérito Policial n.º 40/2012.000791-1.Belém/Pa.

PC – Polícia Civil, Divisão Especializada Em Meio Ambiente (2016a). Inquérito policial n.º 40/2016.100121-0.Belém/Pa.

PC – Polícia Civil, Divisão Especializada Em Meio Ambiente (2016b). Inquérito policial n.º 40/2016.100199-9. Belém/Pa.

PC – Polícia Civil, Divisão Especializada Em Meio Ambiente (2017). Inquérito policial n.º 40/2017.100421-6.Belém/Pa.

Queiroz, H. M., YING, S. C., Abernathy, M., Barcellos, D., Gabriel, F. A., Otero, X. L., Nóbrega, G.N., Bernardino, A.F., Ferreira, T. O. 2021. Manganese: The overlooked contaminant in the world largest mine tailings dam collapse. *Environment international*, **146**, 106284. DOI: doi.org/10.1016/j.envint.2020.106284

Ramaswamy, S., Raghavan, P. 2010. Investigations on a Kaolin Sample from Kerala for Possible Value Addition. *Proceedings of the Xi International Seminar on Mineral Processing Technology (MPT-2010)*, Jamshedpur, p. 691-700. DOI: [10.4236/jbpc.2011.24045](https://doi.org/10.4236/jbpc.2011.24045)

Rodrigues, J.C., Hazeu, M.T., Nascimento, S.M. 2019. Como se produz desastres?: O processo de licenciamento da barragem de rejeitos da Hydro Alunorte, em Barcarena, Pará. *Nucleus*, v. **16**, n. 2, p. 151-159. DOI: <https://doi.org/10.3738/1982.2278.3590>

Sá, F., Longhini, C. M., Costa, E. S., Silva, C. A., Cagnin, R. C. G. L. E.O., Lima, A.T., Bernardino, A.F., Neto, R. R. 2021. Time-sequence development of metal (loid) s following the 2015 dam failure in the Doce river estuary, Brazil. *Science of the Total Environment*, **769**, 144532. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.144532](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144532)

Silva, F. A. O. Por uma gestão das águas na Bacia Hidrográfica do Rio Murucupi-Barcarena-Pa. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Pará. Belém – PA. 161p., 2012.

Sindicato Das Indústrias Mineraias Do Estado Do Pará - Simineral. 2019. **8º Anuário Mineral do Pará**. Belém: Sindicato das Indústrias Mineraias do Estado do Pará. Acesso em: https://www.simineral.org.br/pdf/anuarios/8-mobile_pt-br.pdf. Acesso em: 14 jul. 2023.

Smith, D. R.; Jarvie, H. P.; Bowes, M. J. 2017. Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Stoichiometry and Eutrophication in River Thames Tributaries, UK. *Agricultural & Environmental Letters*, [s.l.], v. 2, n. 1, p. 1-4, Wiley.

Steinbrenner, R.A., Guerreiro Neto, G., Bragança, P.L., Castro, E.M.R. 2020. Desastre da mineração em Barcarena, Pará e cobertura midiática: diferenças de duração e direcionamentos de escuta. *Reciis*, 14 (2). DOI: <https://doi.org/10.29397/reciis.v14i2.2063>

Tabereaux, A. 2012. The discovery, commercialization, and development of the aluminum industry in France. *Light Metal Age*, v. **70**, 2, 8.

Thomé, R., Passini, M. L. 2018. Barragens de rejeitos de mineração: características do método de alteamento para montante que fundamentaram a suspensão de sua utilização em Minas Gerais. *Ciências Sociais Aplicadas em Revista*, **18**, 34, 49-65.

United States Geological Survey – USGS. 2019. Mineral Commodity Summaries. Reston, Virginia. Disponível em: https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/atoms/files/mcs2019_all.pdf. Acesso em: 28 de setembro de 2022.

United States Geological Survey – USGS. 2021. Mineral Commodity Summaries. Reston, Virginia. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-bauxite-alumina.pdf>. Acesso em: 28 de setembro de 2022.

Vieira, P. H., Vieira, A. C. A. S. 2019. A atividade minerária e sua relação no aumento da fragilidade ambiental no município de Cordeirópolis/SP. *Revista Geografar*, **14**(1), 108-130.

Zobbi, R. 2017. Transport Research and Innovation Achievements Report - Study and Report. Research and Innovation. European Commission. 92p.

Recebido em 13 de novembro de 2023.
Aceito em 18 de dezembro de 2023.