REVISEA
REVISTA SERGIPANA DE EDUCAÇÃO AMBIENTAL

Terras raras no Brasil: mineração, conflitos socioambientais e perspectivas para a educação ambiental

Rare earths in Brazil: mining, socio-environmental conflicts, and perspectives for environmental education

Tierras raras em Brasil: minería, conflictos socioambientales y perspectivas para la educación ambiental

Esther Rodrigues Alves dos Reis[1]

Submetido em: 17/09/2026
Aceito em: 26/10/2026
Publicado em: 06/11/2026

RESUMO

As terras raras são recursos estratégicos para diversas tecnologias contemporâneas, mas sua exploração pode estar associada a impactos ambientais e questões socioambientais que demandam investigação. Este estudo teve como objetivo analisar a produção científica sobre terras raras no Brasil, com ênfase na mineração, nos impactos e conflitos socioambientais e nas possibilidades de contribuição da Educação Ambiental. Realizou-se uma revisão integrativa da literatura, de abordagem qualitativa e caráter descritivo-analítico. As buscas foram conduzidas entre junho e agosto de 2026 nas bases Scopus, Web of

[1] Universidade Estácio de Sá.

Science, ScienceDirect, SciELO e PubMed, com buscas complementares no Google Scholar e nas referências das publicações identificadas. Após a triagem e a avaliação de elegibilidade, 18 estudos compuseram o corpus analítico. Os resultados revelaram predominância de pesquisas sobre depósitos, ocorrências minerais e caracterização geológica, mineralógica e geoquímica. Metade dos estudos foi publicada entre 2020 e 2026, e Minas Gerais concentrou sete trabalhos associados a localidades específicas. As dimensões relativas à Educação Ambiental, à justiça ambiental, à participação social e aos conflitos socioambientais não constituíram o foco central de nenhum estudo incluído. Conclui-se que são necessárias pesquisas interdisciplinares que articulem monitoramento ambiental, análise territorial e participação social, ampliando as possibilidades de diálogo entre conhecimento científico e Educação Ambiental crítica.
Palavras-chave: Educação ambiental; Impactos ambientais; Mineração; Sustentabilidade; Terras raras.

ABSTRACT

Rare earth elements are strategic resources for various contemporary technologies, but their extraction may be associated with environmental impacts and socio-environmental issues that require further investigation. This study aimed to analyze scientific literature on rare earth elements in Brazil, focusing on mining, environmental and socio-environmental impacts and conflicts, and potential contributions of Environmental Education. An integrative literature review with a qualitative, descriptive-analytical approach was conducted. Searches were carried out between June and August 2026 in Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SciELO, and PubMed, supplemented by Google Scholar searches and reference-list checking. Following screening and eligibility assessment, 18 studies were included in the analytical corpus. The results showed a predominance of research on mineral deposits and occurrences, as well as geological, mineralogical, and geochemical characterization. Half of the studies were published between 2020 and 2026, and seven studies focused on specific locations in Minas Gerais. Environmental Education, environmental justice, social participation, and socio-environmental conflicts were not the primary focus of any included study. The review highlights the need for interdisciplinary research integrating environmental monitoring, territorial analysis, and social participation, thereby expanding opportunities to connect scientific knowledge with critical Environmental Education.
Keywords: Environmental education; Environmental impacts; Mining; Rare earths; Sustainability.

RESUMEN
Las tierras raras son recursos estratégicos para diversas tecnologías contemporáneas, pero su explotación puede estar asociada con impactos ambientales y cuestiones socioambientales que requieren investigación. Este estudio tuvo como objetivo analizar la producción científica sobre tierras raras en Brasil, con énfasis en la minería, los impactos y conflictos socioambientales y las posibles contribuciones de la Educación Ambiental. Se realizó una revisión integradora de la literatura, con enfoque cualitativo y carácter descriptivo-analítico. Las búsquedas se llevaron a cabo entre junio y agosto de 2026 en Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SciELO y PubMed, complementadas con búsquedas en Google Scholar y la revisión de las referencias de las publicaciones identificadas. Tras la selección y la evaluación de elegibilidad, se incluyeron 18 estudios en el corpus analítico. Los resultados mostraron un predominio de investigaciones sobre depósitos y ocurrencias minerales, así como sobre caracterización geológica, mineralógica y geoquímica. La mitad de los estudios se publicó entre 2020 y 2026, y siete investigaciones se centraron en localidades específicas de Minas Gerais. La Educación Ambiental, la justicia ambiental, la participación social y los conflictos socioambientales no constituyeron el enfoque principal de ninguno de los estudios incluidos. Se concluye que se necesitan investigaciones interdisciplinarias que articulen el monitoreo ambiental, el análisis territorial y la participación social, ampliando el diálogo entre el conocimiento científico y la Educación Ambiental crítica.
Palabras clave: Educación ambiental; Impactos ambientales; Minería; Sostenibilidad; Tierras raras.

1 INTRODUÇÃO

As terras raras compreendem 17 elementos químicos: os 15 lantanídeos, o escândio e o ítrio, cujas propriedades físico-químicas são relevantes para aplicações tecnológicas, equipamentos eletrônicos e sistemas de energia renovável. O crescimento da demanda por esses recursos tem ampliado o interesse pela identificação de depósitos e pelo desenvolvimento de cadeias produtivas voltadas às necessidades tecnológicas contemporâneas (Balaram, 2019; Zapp et al., 2022).

O Brasil apresenta potencial para a exploração desses elementos em diferentes contextos geológicos, incluindo depósitos associados a carbonatitos, complexos alcalinos e pegmatitos. Pesquisas nacionais têm contribuído para caracterizar essas ocorrências e avaliar seu aproveitamento econômico (Beurlen et al., 2020; Takehara et al., 2016). Contudo, a extração, o beneficiamento e o processamento dos minérios podem gerar resíduos e alterar a qualidade dos solos e das águas, conforme as características dos depósitos e as técnicas utilizadas (Migaszewski; Gałuszka, 2015; Schreiber et al., 2021).

A expansão da mineração também suscita questões relacionadas ao uso dos territórios, à distribuição dos impactos ambientais e à participação das populações potencialmente afetadas. Assim, a avaliação desses empreendimentos deve considerar não apenas sua viabilidade econômica, mas também a distribuição dos riscos e benefícios. Essa abordagem amplia a análise dos aspectos ambientais da mineração e permite considerar suas possíveis repercussões sociais e territoriais.

Nesse debate, a Educação Ambiental, especialmente em sua vertente crítica, pode favorecer a compreensão das relações entre exploração mineral, impactos socioambientais, consumo e sustentabilidade. Além de abordar a conservação da natureza, essa perspectiva permite discutir as dimensões políticas e sociais das questões ambientais, bem como a participação da sociedade nos processos decisórios.

Embora a literatura sobre terras raras contemple aspectos geológicos, geoquímicos e ambientais, é pertinente examinar como a produção científica sobre o Brasil aborda a mineração, os impactos socioambientais e as possibilidades de contribuição da Educação Ambiental. Essa análise permite identificar os temas predominantes e as dimensões que necessitam de maior aprofundamento, sem pressupor a inexistência de estudos sobre essas questões.

Diante disso, este artigo tem como objetivo analisar a produção científica sobre terras raras no Brasil, com ênfase na mineração, nos impactos e conflitos

socioambientais e nas possibilidades de contribuição da Educação Ambiental para a compreensão crítica desses processos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Delineamento e questão de pesquisa

Realizou-se uma revisão integrativa da literatura, de abordagem qualitativa e caráter descritivo-analítico, com o objetivo de examinar a produção científica sobre elementos terras raras (ETRs) no Brasil, considerando a ocorrência e a exploração mineral, os impactos ambientais, os conflitos socioambientais e as possíveis contribuições para a Educação Ambiental.

A questão norteadora foi: como a literatura científica sobre terras raras no Brasil aborda os impactos ambientais e os conflitos socioambientais relacionados à mineração, e de que maneira essas discussões podem contribuir para a Educação Ambiental?

A análise foi orientada por quatro dimensões: (i) ocorrência, distribuição e aproveitamento dos ETRs; (ii) extração, beneficiamento, geração de resíduos e alterações ambientais; (iii) riscos ambientais, exposição humana, justiça ambiental e participação comunitária; e (iv) sustentabilidade e possíveis articulações com a Educação Ambiental. O processo de identificação, seleção e inclusão dos estudos foi descrito com referência às etapas de relato do PRISMA 2020 (Page et al., 2021), sem caracterizar a revisão como sistemática nem pressupor o cumprimento integral dos requisitos aplicáveis a esse tipo de revisão. Considerando a heterogeneidade do corpus, os resultados foram sintetizados de forma qualitativa e narrativa.

2.2 Estratégia de busca e critérios de elegibilidade

As buscas foram realizadas entre junho e 31 de agosto de 2026 nas bases Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SciELO e PubMed, complementadas pelo Google Scholar e pela análise das listas de referências. Foram considerados trabalhos publicados entre 1990 e 2026.

A estratégia combinou termos em português e inglês referentes a terras raras, Brasil, mineração, impactos ambientais, saúde humana, conflitos territoriais e sustentabilidade. A expressão geral foi:

- (“rare earth elements” OR “rare earth” OR REE OR LREE OR HREE OR “terras raras” OR “elementos terras raras”) AND (Brazil OR Brazilian OR Brasil OR brasileiro OR brasileira) AND (mining OR extraction OR exploration OR processing OR beneficiation OR tailings OR waste OR residue* OR mineração OR extração OR beneficiamento) AND (“environmental impact*” OR “environmental risk*” OR contamination OR pollution OR soil OR water OR sediment* OR groundwater OR ecotoxicity OR toxicity OR bioaccumulation OR radioactivity OR thorium OR uranium OR “human health” OR community OR “territorial conflict*” OR “social impact*” OR “environmental justice” OR sustainability OR recycling OR “circular economy” OR remediation OR restoration OR “impactos ambientais” OR contaminação OR sustentabilidade OR “justiça ambiental”).

A expressão foi adaptada às funcionalidades de cada plataforma: títulos, resumos e palavras-chave na Scopus; campo de tópicos na Web of Science; busca textual na ScienceDirect; termos em português e inglês na SciELO; e títulos e resumos na PubMed, com ênfase nos aspectos ambientais e sanitários.

No Google Scholar, as buscas complementares abrangeram seis eixos: depósitos e mineração; contaminação e riscos; matrizes ambientais e toxicidade; saúde, comunidades e justiça ambiental; sustentabilidade e recuperação; e terminologia em português. Foram utilizadas combinações de termos relacionados a terras raras, Brasil, mineração, contaminação, solo, água, sedimentos, saúde humana, conflitos, sustentabilidade e remediação.

Foram incluídas publicações sobre ETRs no contexto brasileiro que contribuíssem para a compreensão de sua ocorrência, caracterização, exploração, comportamento ambiental, contaminação, riscos, exposição humana, sustentabilidade ou implicações sociais e territoriais. Estudos geológicos e mineralógicos foram aceitos quando relevantes para essas dimensões. Excluíram-se trabalhos sem contexto brasileiro pertinente, sem relação suficiente com a questão de pesquisa, restritos a aplicações industriais sem conexão ambiental ou com sustentabilidade, incompatíveis com os critérios de elegibilidade ou com informações insuficientes. A ocorrência de ETRs, isoladamente, não foi considerada evidência de contaminação, risco à saúde ou conflito socioambiental.

A seleção foi conduzida exclusivamente pela autora, sem avaliação independente por um segundo revisor.

2.3 Processo de seleção dos estudos

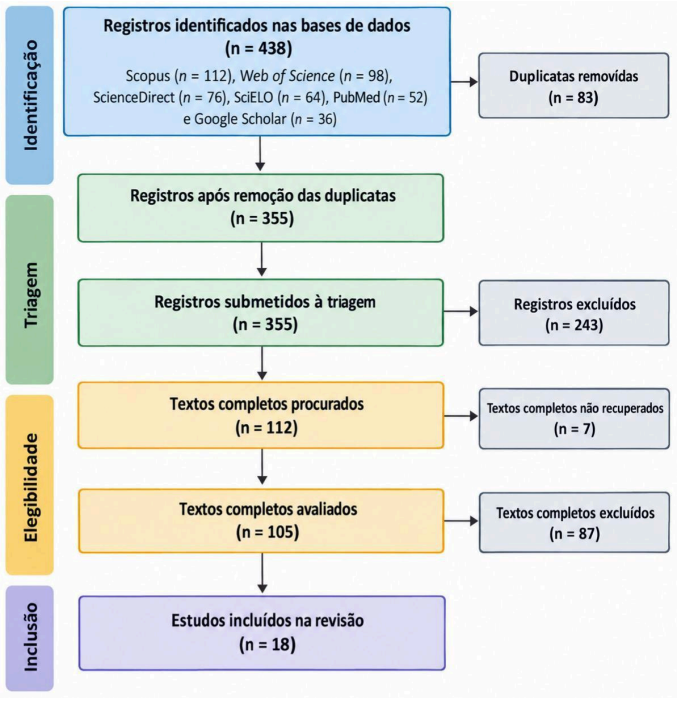
O processo de seleção compreendeu identificação dos registros, remoção de duplicatas, triagem de títulos e resumos, recuperação e avaliação dos textos completos e inclusão dos estudos elegíveis, com relato organizado com referência ao PRISMA 2020 (Page et al., 2021).

Foram identificados 438 registros: 112 na Scopus, 98 na Web of Science, 76 na ScienceDirect, 64 na SciELO, 52 na PubMed e 36 no Google Scholar. Após a remoção de 83 duplicatas, 355 registros foram submetidos à triagem de títulos e

resumos, dos quais 243 foram excluídos. Assim, 112 publicações foram selecionadas para recuperação do texto completo. Sete não foram recuperadas, e as 105 restantes foram avaliadas quanto à elegibilidade.

Na avaliação dos textos completos, 87 publicações foram excluídas pelos seguintes motivos: ausência de relação direta com impactos ambientais ou socioambientais (n = 31); abordagem exclusivamente geológica ou mineralógica (n = 20); contexto brasileiro insuficiente (n = 14); aplicações industriais sem relação com sustentabilidade ou impactos ambientais (n = 9); tipo de publicação incompatível com os critérios de elegibilidade (n = 7); e dados insuficientes para responder à questão de pesquisa (n = 6). Ao final, 18 estudos foram incluídos no corpus analítico. As referências utilizadas exclusivamente para fundamentação teórica, contextualização ou descrição metodológica não foram contabilizadas como estudos incluídos. O fluxo de identificação, triagem, recuperação, avaliação de elegibilidade e inclusão é apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma do processo de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos, segundo as recomendações PRISMA 2020



Fonte: Autora (2026)

2.4 Extração e análise de dados

Os 18 estudos foram organizados em uma matriz contendo autoria, ano, localização, ambiente analisado, ocorrência mineral ou atividade minerária, elementos investigados, métodos, impactos e riscos ambientais, exposição humana, dimensões territoriais, conflitos, medidas de mitigação e principais conclusões. Também foram registrados dados sobre urânio, tório, justiça ambiental, participação social, reciclagem e gestão socioambiental, quando disponíveis.

A classificação espacial considerou o principal recorte geográfico de cada publicação, distinguindo estudos locais ou regionais daqueles de abrangência nacional. Na análise temática, as categorias foram definidas conforme os objetivos, objetos e resultados dos estudos e não foram consideradas mutuamente excludentes.

A síntese descritiva examinou ano, distribuição espacial, ambientes, atividades minerárias, elementos e métodos. Para organizar a discussão, os resultados foram agrupados em seis categorias: impactos em água, solo e sedimentos; mineração, processamento e resíduos; riscos ambientais e à saúde; radioatividade e elementos associados, especialmente urânio e tório; dimensões socioambientais e territoriais; e sustentabilidade e gestão ambiental.

As lacunas foram identificadas considerando o foco central e a contribuição explícita de cada estudo. As possíveis articulações com a Educação Ambiental foram interpretadas a partir das evidências sobre impactos, riscos, conflitos e gestão, considerando participação social, comunicação de riscos, justiça socioambiental e integração de conhecimentos científicos e locais. Essas articulações foram tratadas como possibilidades interpretativas, não como resultados de intervenções educativas não documentadas.

A ausência de estudos centrados em Educação Ambiental, justiça ambiental, conflitos ou participação social foi considerada restrita ao corpus selecionado, sem pressupor a inexistência desses temas na literatura mais ampla. Não foi realizada meta-análise devido à heterogeneidade dos estudos; adotou-se, portanto, síntese qualitativa e narrativa.

2.5 Limitações metodológicas

A heterogeneidade dos estudos, as diferenças terminológicas, a indexação das bases e a disponibilidade dos textos completos podem ter influenciado a composição do corpus. Os sete textos não recuperados foram excluídos da síntese. A seleção por uma única autora, sem avaliação independente, também pode ter afetado as decisões de inclusão e classificação.

A distribuição das publicações não representa necessariamente a distribuição das ocorrências minerais, dos impactos ou dos conflitos no Brasil. Da mesma forma, a baixa representação de determinadas dimensões não demonstra sua ausência na literatura mais ampla. Como predominam estudos geológicos, mineralógicos, geoquímicos e ambientais, as contribuições da Educação Ambiental foram discutidas interpretativamente. Essas limitações reforçam a necessidade de pesquisas que integrem monitoramento ambiental, análise territorial, participação social e processos educativos.

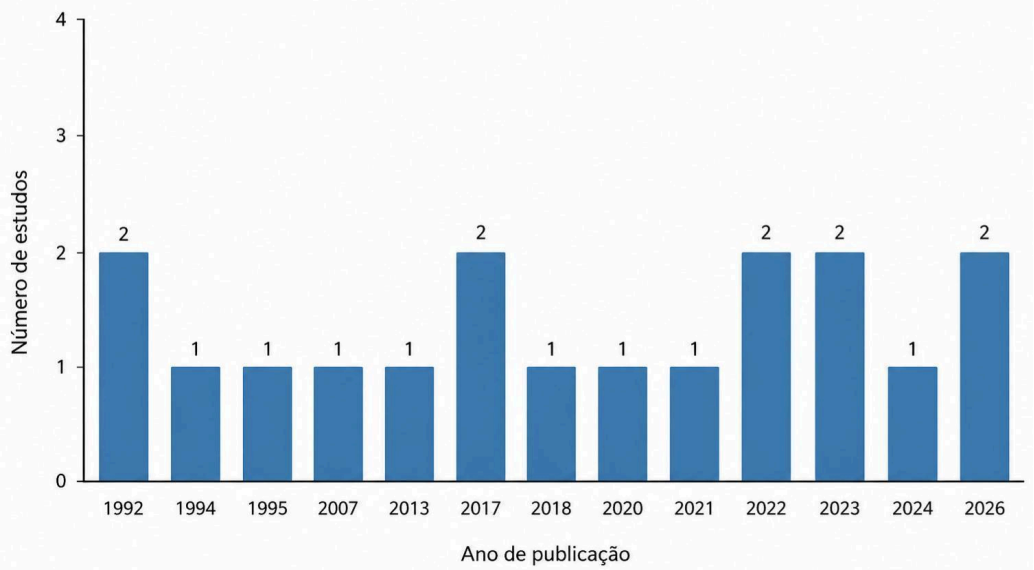
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização temporal e espacial da produção científica

A análise dos 18 estudos incluídos na revisão revelou diferenças na distribuição temporal das publicações. Nove trabalhos (50,00%) foram publicados

entre 2020 e 2026, quatro (22,22%) entre 2010 e 2019, outros quatro (22,22%) entre 1990 e 1999 e um (5,56%) entre 2000 e 2009. Esses resultados indicam maior concentração de publicações no período mais recente, embora as pesquisas sobre elementos terras raras (ETRs) no Brasil já estivessem presentes desde a década de 1990. A distribuição temporal dos estudos está apresentada na Figura 2.

Figura 2 – Distribuição temporal dos estudos incluídos na revisão



Fonte: Autora (2026)

Entre as publicações mais antigas, Miekeley et al. (1992) investigaram a ocorrência de ETRs em águas subterrâneas na região de Poços de Caldas, enquanto Waber (1992) caracterizou o depósito de tório e terras raras de Morro do Ferro. Posteriormente, Loureiro (1994) sistematizou informações sobre depósitos, recursos e reservas brasileiras, contribuindo para o conhecimento da distribuição desses elementos no território nacional.

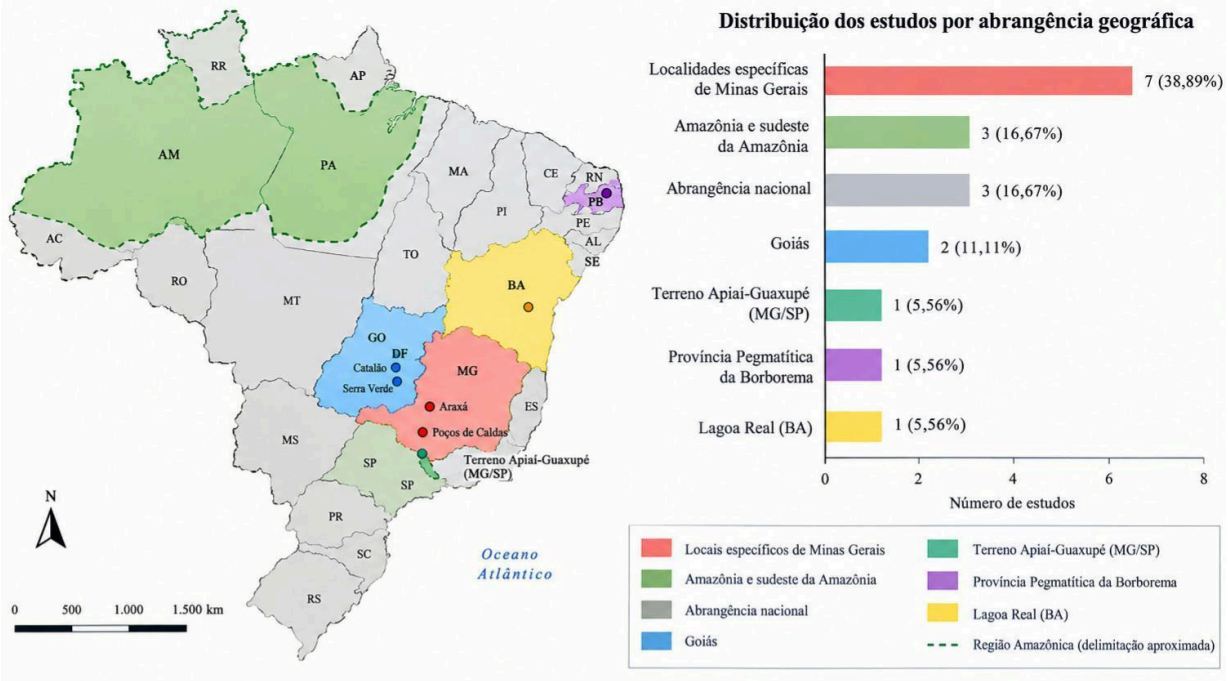
Nos anos seguintes, as pesquisas contemplaram ocorrências minerais em diferentes contextos geológicos. Sanematsu (2017) abordou o depósito de Serra Verde, em Goiás, enquanto Beurlen et al. (2020) examinaram o potencial de depósitos associados à Província Pegmatítica da Borborema. De Ferreira et al.

(2021), por sua vez, investigaram pegmatitos enriquecidos em ETRs na região de Lagoa Real, na Bahia. Em Minas Gerais, os trabalhos de Biondi e Braga (2023) e Braga e Biondi (2023) contribuíram para a caracterização geológica, geoquímica e mineralógica de materiais associados às mineralizações de Araxá. Mais recentemente, Mano et al. (2026) investigaram ETRs leves associados à monazita em carbonatitos alcalinos de Catalão, Goiás.

Em relação à distribuição espacial, sete estudos (38,89%) foram associados a localidades específicas de Minas Gerais, enquanto três (16,67%) abordaram a Amazônia e o sudeste da Amazônia e dois (11,11%) investigaram ocorrências em Goiás. Três publicações (16,67%) tiveram abrangência nacional. O Terreno Apiaí-Guaxupé, que abrange Minas Gerais e São Paulo, a Província Pegmatítica da Borborema e a região de Lagoa Real, na Bahia, foram representados por um estudo cada (5,56%). Essa classificação considera o principal recorte geográfico de cada publicação, atribuindo cada estudo a uma única categoria.

A distribuição evidencia a concentração geográfica dos trabalhos que compõem o corpus, mas não representa necessariamente a distribuição das ocorrências minerais, das atividades minerárias ou dos impactos ambientais no Brasil. A localização dos estudos está sintetizada na Figura 3.

Figura 3 – Distribuição por abrangência geográfica dos estudos incluídos na revisão



Fonte: Autora (2026)

A evolução recente desse campo também é abordada por Tetzner et al. (2026), que analisaram a produção científica relacionada aos ETRs, à sustentabilidade e às argilas de adsorção iônica. Embora essa publicação contribua para contextualizar o desenvolvimento das pesquisas sobre o tema, seu enfoque bibliométrico difere do adotado nesta revisão, que priorizou a análise da literatura sobre terras raras no Brasil, com atenção aos aspectos ambientais, socioambientais e às possibilidades de articulação com a Educação Ambiental.

A caracterização dos estudos incluídos, considerando sua abrangência geográfica, os objetos investigados e suas principais contribuições para a temática, é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização dos estudos incluídos na revisão

Referência	Localização ou abrangência	Objeto ou matriz investigada	Abordagem principal	Contribuição para a revisão
Miekeley et al. (1992)	Poços de Caldas (MG)	Águas subterrâneas	Geoquímica ambiental	Contribui para a compreensão da ocorrência de terras raras em águas subterrâneas em contexto associado à mineração
Waber (1992)	Morro do Ferro, Poços de Caldas (MG)	Depósito de tório e terras raras	Caracterização geológica e geoquímica	Oferece informações sobre o depósito e a associação entre terras raras e tório
Loureiro (1994)	Brasil	Depósitos, recursos e reservas	Caracterização e sistematização mineral	Contextualiza a distribuição dos recursos brasileiros
Franklin (1995)	Poços de Caldas (MG	Mineração e beneficiamento de urânio	Avaliação de impactos ambientais	Fornece contexto sobre avaliação ambiental em área de atividade mineral, embora não se restrinja à mineração de terras raras
Bonotto et al. (2007)	Morro do Ferro (MG)	Materiais de depósito mineral	Intemperismo e processos geoquímicos	Contribui para compreender processos naturais que podem alterar a distribuição dos elementos
Loureiro e Santos (2013)	Brasil	Reservas e características químico-mineralógicas	Caracterização dos recursos minerais	Sistematiza informações sobre depósitos brasileiros e suas características

Sanematsu (2017)	Serra Verde (GO)	Depósito de terras raras	Caracterização mineral	Amplia o conhecimento sobre ocorrências minerais no Brasil
Silva et al. (2017)	Brasil	Rochas e solos associados a granitos	Mineralogia e geoquímica	Discute a relação entre mineralogia das rochas e distribuição de terras raras em rochas e solos
Faria Júnior et al. (2018)	Terreno Apiaí-Guaxupé (MG e SP)	Corpos ígneos	Geoquímica e gamaespectrometria	Investiga o potencial de concentrações de terras raras associadas a argilas de adsorção iônica
Beurlen et al. (2020)	Província Pegmatítica da Borborema	Depósitos associados a pegmatitos	Avaliação do potencial mineral	Contribui para a caracterização de ocorrências potenciais de terras raras
De Ferreira et al. (2021)	Lagoa Real (BA)	Pegmatitos enriquecidos em terras raras	Caracterização geológica e mineral	Amplia a compreensão das ocorrências de terras raras na região
Pereira et al. (2022)	Amazônia	Materiais de área de mineração de ouro	Avaliação de concentrações e riscos ambientais	Contribui para a discussão sobre terras raras em ambientes minerários e riscos potenciais
Ashraf et al. (2022)	Minas Gerais	Espécies vegetais e terras raras leves	Acumulação vegetal	Apresenta elementos para discutir o potencial de plantas na investigação e no monitoramento ambiental
Biondi e Braga (2023)	Araxá (MG)	Complexo alcalino-carbonatítico	Geologia e mineralização	Contribui para a caracterização geológica das

				mineralizações da região
Braga e Biondi (2023)	Araxá (MG)	Materiais associados a depósitos minerais	Geoquímica e mineralogia	Complementa a caracterização dos materiais associados às mineralizações
Da Costa Alves Filho et al. (2024)	Amazônia	Mineração artesanal de monazita e cassiterita	Riscos ambientais e à saúde humana	Aborda riscos potenciais relacionados à atividade minerária e aos materiais envolvidos
Mano et al. (2026)	Catalão (GO)	Monazita em carbonatitos alcalinos	Caracterização mineralógica e geoquímica	Contribui para o conhecimento das terras raras leves em ocorrências minerais brasileiras
Rodrigues et al. (2026)	Sudeste da Amazônia	Solos afetados pela mineração ilegal de cassiterita e monazita	Distribuição e mobilidade de terras raras, urânio e tório	Contribui para a discussão sobre mobilidade dos elementos e possíveis riscos ambientais em áreas mineradas

Fonte: Autora (2026)

3.2 Caracterização mineralógica e potencial dos recursos

Considerando os estudos cujo objeto principal envolve depósitos, recursos, mineralizações ou ocorrências minerais, foram identificadas dez publicações (55,56%). Essa classificação abrange pesquisas sobre depósitos de terras raras, recursos e reservas nacionais, ocorrências associadas a pegmatitos e carbonatitos e áreas com potencial de concentração desses elementos. A categoria considera o objeto principal descrito na matriz de extração e não implica que todos os trabalhos tenham investigado a exploração efetiva dos recursos.

A avaliação do potencial mineral depende da integração de informações sobre composição, mineralogia e características geológicas. Faria Júnior et al. (2018) investigaram dados geoquímicos e gamaespectrométricos de corpos ígneos do Terreno Apiaí-Guaxupé, considerando seu potencial para concentrações de ETRs do tipo *ion-adsorption clay*. O estudo evidencia a utilidade da combinação de diferentes métodos para investigar áreas de interesse mineral, mas a identificação de potencial não comprova exploração efetiva ou viabilidade econômica.

Os estudos de Araxá oferecem exemplos de caracterização em escala regional. Biondi e Braga (2023) abordaram a geologia e a mineralização do complexo alcalino-carbonatítico, enquanto Braga e Biondi (2023) aprofundaram a análise das características geoquímicas e mineralógicas dos materiais associados aos depósitos. Em outro contexto, Silva et al. (2017) examinaram a relação entre a mineralogia de granitos e a geoquímica dos ETRs em rochas e solos ao longo de uma sequência climática brasileira, contribuindo para compreender a influência do material de origem sobre a distribuição dos elementos.

A sistematização dos recursos nacionais realizada por Loureiro e Santos (2013) complementa esses estudos ao reunir informações sobre reservas e características químico-mineralógicas de depósitos brasileiros. Já Takehara et al. (2016) discutiram o potencial dos ETRs no país. Essas contribuições devem ser interpretadas considerando a diferença entre ocorrência mineral, recurso identificado, reserva e exploração efetiva: a presença de ETRs em determinado material não demonstra, isoladamente, que sua extração seja economicamente viável ou ambientalmente sustentável.

Os processos naturais também influenciam a distribuição dos elementos. Bonotto et al. (2007) investigaram a taxa de intemperismo do depósito de Morro do Ferro, enquanto Migaszewski e Gałuszka (2015) discutiram a ocorrência e o comportamento geoquímico dos ETRs no ambiente. Esses trabalhos contribuem

para distinguir a composição original dos materiais dos processos que podem alterar a distribuição e a mobilidade dos elementos.

3.3 Mineração e ambientes potencialmente afetados

Seis estudos (33,33%) foram classificados como diretamente relacionados a áreas ou atividades minerárias. Esse conjunto inclui investigações sobre águas subterrâneas em locais associados à mineração, avaliação de impactos da mineração e do beneficiamento de urânio, materiais de áreas de mineração de ouro, espécies vegetais de áreas minerárias e ambientes afetados pela mineração de monazita e cassiterita. Os trabalhos investigam contextos distintos, o que limita comparações diretas entre os resultados.

Em Poços de Caldas, Miekeley et al. (1992) analisaram ETRs em águas subterrâneas de locais associados à mineração. Franklin (1995) examinou a avaliação de impactos ambientais da mineração e do beneficiamento de urânio na mesma região, oferecendo contexto para a discussão do monitoramento ambiental em áreas de atividade mineral. Os dois trabalhos, entretanto, abordam objetos diferentes: um se concentra em águas subterrâneas, enquanto o outro trata da avaliação de impactos de uma atividade específica. Como Franklin (1995) não se restringe à mineração de terras raras, seus resultados não devem ser interpretados como evidência direta dos impactos da extração desses elementos.

Na Amazônia, Pereira et al. (2022) avaliaram concentrações de ETRs e riscos ambientais em uma área de mineração de ouro. Embora essa atividade não tenha como objetivo principal a extração de ETRs, o estudo contribui para a discussão sobre a presença desses elementos em ambientes minerários. Ashraf et al. (2022) investigaram espécies vegetais com potencial de acumulação de ETRs leves em uma área de Minas Gerais, oferecendo subsídios para discutir o uso de plantas em pesquisas de investigação e monitoramento ambiental. Da Costa Alves

Filho et al. (2024) investigaram a mineração artesanal de monazita e cassiterita, abordando riscos potenciais ao ambiente e à saúde humana. Rodrigues et al. (2026), por sua vez, examinaram a distribuição e a mobilidade de ETRs, urânio e tório em solos afetados pela mineração ilegal de cassiterita e monazita no sudeste amazônico.

A comparação desses estudos evidencia a importância de considerar o tipo de atividade, os materiais envolvidos e a matriz ambiental analisada. Resultados obtidos em áreas de mineração de ouro não devem ser transferidos automaticamente para contextos de extração de monazita ou cassiterita. Da mesma forma, a presença de elementos em solos ou águas não comprova, por si só, contaminação causada pela mineração: essa interpretação depende de dados específicos sobre concentrações, condições de referência e possíveis fontes de alteração.

3.4 Mobilidade dos elementos e riscos ambientais

Três estudos (16,67%) foram identificados na matriz como abordando explicitamente a associação entre ETRs, urânio e tório: Waber (1992), Bonotto et al. (2007) e Rodrigues et al. (2026). Apesar desse interesse comum, as publicações investigam depósitos, matrizes ambientais e processos diferentes, de modo que seus resultados não são diretamente equivalentes. Miekeley et al. (1992) investigaram ETRs em águas subterrâneas em contexto associado à mineração; contudo, a descrição disponível na matriz não permite confirmar sua inclusão na categoria específica de associação entre ETRs, urânio e tório sem a verificação do texto completo.

A caracterização de um depósito permite identificar os elementos presentes, mas não determina automaticamente sua mobilidade ou disponibilidade ambiental. Essas propriedades dependem das características dos materiais e das condições

físico-químicas do meio. Nesse sentido, a análise de águas subterrâneas realizada por Miekeley et al. (1992) complementa a caracterização geológica de Waber (1992), enquanto o estudo de Bonotto et al. (2007) contribui para compreender processos de intemperismo que podem influenciar a alteração dos materiais.

Ashraf et al. (2022) investigaram espécies vegetais com potencial de hiperacumulação de ETRs leves em Minas Gerais. Esse enfoque amplia a discussão para a interação entre plantas e elementos químicos e pode contribuir para pesquisas de monitoramento ambiental. Entretanto, a acumulação vegetal não comprova, isoladamente, toxicidade, transferência para a cadeia alimentar ou exposição humana.

Na classificação do corpus, quatro estudos (22,22%) foram associados à avaliação de impactos ou riscos ambientais, incluindo pesquisas em áreas de mineração e contextos de atividade mineral. Dois estudos (11,11%) foram classificados na categoria ampla de saúde humana ou risco de exposição. Essas categorias podem se sobrepor e não devem ser interpretadas como evidência de exposição efetiva ou de danos comprovados à saúde. Risco potencial, exposição e efeito adverso são dimensões distintas: identificar uma substância ou uma possível via de exposição não demonstra, por si só, que tenham ocorrido danos.

A interpretação dos resultados requer, portanto, que a presença, a mobilidade e os possíveis efeitos dos ETRs sejam avaliados separadamente. Essa distinção é essencial para evitar tanto a atribuição de contaminação sem evidências suficientes quanto a desconsideração de situações que justifiquem monitoramento ambiental.

3.5 Sustentabilidade da cadeia produtiva e justiça socioambiental

A sustentabilidade dos ETRs envolve etapas que ultrapassam a identificação de depósitos e a extração mineral, incluindo beneficiamento, processamento, gestão de resíduos e recuperação de materiais. Balaram (2019) discute aplicações, exploração, reciclagem e impactos ambientais desses elementos, oferecendo uma visão abrangente da cadeia produtiva.

Koltun e Tharumarajah (2014) examinaram impactos relacionados ao ciclo de vida dos ETRs, enquanto Navarro e Zhao (2014) abordaram a avaliação do ciclo de vida da produção desses elementos para aplicações energéticas. Schreiber et al. (2021) revisaram estudos de avaliação do ciclo de vida da produção de ETRs, contribuindo para contextualizar as abordagens utilizadas nesse campo. Zapp et al. (2022) também discutiram os impactos ambientais associados à produção desses elementos.

A recuperação de materiais constitui outra dimensão dessa discussão. Sánchez Piloto et al. (2026) examinaram impactos ambientais associados à extração de ETRs de fontes primárias e de baterias de níquel-hidreto metálico. Turra (2018), por sua vez, discutiu a sustentabilidade da cadeia produtiva, da produção aos alimentos. Essas publicações ampliam o escopo da análise, mas seus resultados não devem ser tratados como evidência direta dos impactos de empreendimentos específicos no Brasil.

No corpus analisado, nenhum estudo teve como foco principal a reciclagem, a economia circular, a recuperação de ETRs, a remediação ou a restauração ambiental. Essa lacuna indica que tais dimensões não foram centrais nas publicações selecionadas, sem permitir concluir que essas práticas inexistam no país.

A dimensão territorial também merece atenção na análise da mineração. A distribuição dos estudos entre diferentes regiões e os distintos contextos de

atividade minerária identificados no corpus indicam a importância de investigar como os riscos e os benefícios associados aos empreendimentos podem variar conforme as características ambientais e sociais dos territórios. Entretanto, os 18 estudos analisados não tiveram como foco principal a investigação de conflitos socioambientais ou de desigualdades na distribuição dos impactos. Por isso, tais questões devem ser tratadas como perspectivas de investigação, e não como resultados diretamente demonstrados pela literatura selecionada.

3.6 Lacunas e perspectivas para a Educação Ambiental

Nenhum dos 18 estudos incluídos na revisão apresentou foco específico em conflitos socioambientais, justiça ambiental, participação social ou Educação Ambiental (0,00%). Esse resultado evidencia uma lacuna temática no corpus analisado, restrita às publicações selecionadas e aos critérios de inclusão e classificação adotados. Portanto, não permite afirmar que essas questões estejam ausentes dos territórios brasileiros ou da literatura mais ampla sobre mineração.

Nesse cenário, a Educação Ambiental constitui uma possibilidade de articulação entre o conhecimento científico sobre os elementos terras raras (ETRs) e a discussão de suas implicações socioambientais. Essa abordagem pode ampliar a compreensão das relações entre sociedade e natureza, considerando os aspectos políticos, sociais e territoriais envolvidos na exploração dos recursos minerais e na distribuição de seus possíveis impactos.

A relação entre mineração de terras raras, impactos socioambientais e Educação Ambiental pode ser compreendida de forma integrada. A exploração desses recursos, impulsionada pela demanda por minerais estratégicos, pode estar associada a pressões sobre os ecossistemas, transformações territoriais e repercussões socioeconômicas. Nesse contexto, a Educação Ambiental crítica oferece uma perspectiva para problematizar esses processos, favorecer a

compreensão dos riscos ambientais e estimular o diálogo entre os diferentes atores sociais.

A lacuna identificada também aponta caminhos para pesquisas futuras, especialmente sobre o acesso das comunidades à informação ambiental, a comunicação de riscos, a participação social nos processos de licenciamento e a distribuição dos custos e benefícios dos empreendimentos minerários. No campo educativo, mapas, dados geoquímicos e informações sobre a cadeia produtiva podem subsidiar atividades que diferenciem a ocorrência mineral, a exploração efetiva e os impactos ambientais documentados. Esses recursos podem contribuir para uma abordagem contextualizada, articulando o conhecimento científico, as decisões econômicas e as experiências das populações potencialmente afetadas.

Essas possibilidades representam perspectivas de investigação decorrentes da análise realizada, e não resultados empiricamente demonstrados pelos estudos incluídos na revisão. Sua aplicação requer pesquisas específicas que considerem as particularidades dos contextos educativos e territoriais, bem como a participação das comunidades na identificação dos problemas, na definição das prioridades e na construção das estratégias de investigação.

3.7 Síntese dos resultados

A análise dos 18 estudos revelou concentração de publicações recentes e predominância de investigações sobre depósitos, recursos, mineralizações e ocorrências minerais. Nove estudos (50,00%) foram publicados entre 2020 e 2026, e dez (55,56%) foram classificados nessa categoria temática. A distribuição espacial concentrou sete estudos em localidades específicas de Minas Gerais (38,89%), enquanto a Amazônia e o sudeste da Amazônia foram contemplados por três (16,67%), Goiás por dois (11,11%) e a abrangência nacional por três (16,67%).

O Terreno Apiaí-Guaxupé, a Província Pegmatítica da Borborema e a região de Lagoa Real foram representados por um estudo cada (5,56%).

As investigações relacionadas a áreas ou atividades minerárias corresponderam a seis estudos (33,33%). Quatro (22,22%) foram classificados na categoria ampla de avaliação de impactos ou riscos ambientais, e dois (11,11%) incluíram aspectos de saúde humana ou risco de exposição. Essas categorias podem se sobrepor e não devem ser somadas como se fossem mutuamente exclusivas. Além disso, os resultados de pesquisas sobre mineração de urânio e ouro não devem ser interpretados automaticamente como evidências de impactos específicos da extração de terras raras.

A principal lacuna identificada diz respeito à ausência, no corpus, de estudos cujo foco central fosse a Educação Ambiental, os conflitos socioambientais, a justiça ambiental ou a participação social. Essa ausência aponta possibilidades para futuras pesquisas, mas não constitui evidência de que tais questões inexistam na realidade brasileira ou em outras áreas da literatura sobre mineração. Também não foram identificados estudos cujo foco principal fosse a reciclagem, a economia circular, a remediação ou a restauração ambiental.

Conclui-se que a produção selecionada oferece bases para compreender a ocorrência e as características dos ETRs no Brasil, além de incluir investigações ambientais em contextos específicos. O avanço do campo depende de maior articulação entre caracterização mineral, monitoramento ambiental, análise territorial e investigação das dimensões sociais e educativas, respeitando as diferenças entre evidências geológicas, riscos potenciais, exposição e efeitos efetivamente demonstrados.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta revisão integrativa analisou a produção científica sobre terras raras no Brasil, com foco na mineração, nos impactos ambientais e socioambientais e nas contribuições da Educação Ambiental. Dos 18 estudos incluídos, predominaram pesquisas sobre depósitos e ocorrências minerais, com metade das publicações concentrada entre 2020 e 2026. As dimensões sociais, territoriais e educativas foram pouco representadas.

Embora parte dos estudos aborde atividades minerárias, riscos ambientais e exposição humana, é essencial distinguir a ocorrência mineral da exploração econômica e a presença de elementos químicos da exposição efetiva e da comprovação de danos. A principal lacuna identificada foi a ausência de estudos centrados nos conflitos socioambientais, na justiça ambiental, na participação social ou na Educação Ambiental, sem que isso implique a inexistência dessas questões em outros contextos ou publicações.

Recomenda-se ampliar as pesquisas interdisciplinares que integrem caracterização geoquímica, monitoramento ambiental, análise territorial e participação das comunidades. A Educação Ambiental crítica pode contribuir para aproximar o conhecimento científico das discussões sobre riscos, benefícios da mineração e gestão dos territórios. As conclusões, contudo, limitam-se ao corpus analisado, considerando a heterogeneidade dos estudos, possíveis vieses de busca e a ausência de seleção independente. Conclui-se que a integração das dimensões científicas, ambientais, sociais e educativas é fundamental para fortalecer a prevenção de impactos, a transparência e a justiça socioambiental.

REFERÊNCIAS

ASHRAF, N.; RODRIGUES, E. S.; DE ALMEIDA, E.; MONTANHA, G. S.; ABREU-JUNIOR, C. H.; VÍTOVÁ, M.; GARCIA, R. H. L.; KÜPPER, H.; DE CARVALHO, H. W. P. Identification of potential plant species hyperaccumulating light rare earth elements (LREE) in a mining area in Minas Gerais, Brazil. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 60, p. 90779-90790, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-022-22009-9.

BALARAM, V. Rare earth elements: a review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. **Geoscience Frontiers**, v. 10, n. 4, p. 1285-1303, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.005.

BEURLEN, H.; RHEDE, D.; THOMAS, R.; SILVA, M. R. da; SOARES, D. R. Evaluation of the potential for rare earth element (REE) deposits related to the Borborema pegmatite province in northeastern Brazil. **Estudos Geológicos**, v. 29, n. 2, p. 40-53, 2020. DOI: https://doi.org/10.18190/1980-8208/estudosgeologicos.v29n2p40-53.

BIONDI, J.; BRAGA, J. Geology and mineralization of Nb, P, Fe and light rare earth elements of the Araxá alkaline-carbonatite complex, Minas Gerais state, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 131, p. 104623, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104623.

BONOTTO, D. M.; FUJIMORI, K.; MOREIRA-NORDEMANN, L. M. Determination of weathering rate of the Morro do Ferro Th-REEs deposit, Brazil using U-isotope method. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 65, n. 5, p. 474-481, 2007. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2006.11.003.

BRAGA, J.; BIONDI, J. Geology, geochemistry, and mineralogy of saprolite and regolith ores with Nb, P, Ba, REEs (+ Fe) in mineral deposits from the Araxá alkali-carbonatitic complex, Minas Gerais state, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 125, p. 104311, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104311.

DA COSTA ALVES FILHO, P. P.; DA SILVEIRA PEREIRA, W. V.; DIAS, Y. N.; FERREIRA DE MORAES, A. L.; RODRIGUES, F. H. S.; RAMOS, S. J.; SANTOS DE SOUZA, E.; FONTES DO AMARAL, A. M.; FERNANDES, A. R. Artisanal mining of monazite and cassiterite in the Amazon: potential risks of rare earth elements for the environment and human health. **Environmental Management**, v. 73, n. 6, p. 1201-1214, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s00267-024-01964-8.

DE FERREIRA, T.; RAMOS DE OLIVEIRA, L. A.; AMORIM, L.; PEDROSA, T.; RIOS, F. Rare earth element (REE)-enriched granitic pegmatite pockets of Lagoa Real Uranium Province, Brazil. **Geochemistry**, v. 81, p. 125810, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chemer.2021.125810.

FARIA JÚNIOR, I. R.; LUVIZZOTO, G. L.; GODOY, A. M. Dados geoquímicos e gamaespectrométricos na avaliação do potencial de corpos ígneos brasilianos para gerar concentrações de elementos terras raras do tipo ion adsorption clay (Terreno Apiaí-Guaxupé, estados de Minas Gerais e São Paulo, Brasil). **Geologia USP. Série Científica**, v. 18, n. 3, p. 59-74, 2018. DOI: https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v18-140459.

FRANKLIN, M. Environmental impact assessment of uranium mining and milling facilities: a study case at the Poços de Caldas uranium mining and milling site,

Brazil. **Journal of Geochemical Exploration**, 1995. DOI: https://doi.org/10.1016/0375-6742(94)00043-B.

KOLTUN, P.; THARUMARAJAH, A. Life cycle impact of rare earth elements. **ISRN Metallurgy**, v. 2014, p. 1-10, 2014. DOI: https://doi.org/10.1155/2014/907536.

LOUREIRO, F. E. L. **Terras raras no Brasil: depósitos, recursos identificados, reservas**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 1994. (Série Estudos e Documentos, 21).

LOUREIRO, F. E. L.; SANTOS, R. L. C. Terras raras no Brasil: reservas e características químico-mineralógicas de suas ocorrências e depósitos. In:

LOUREIRO, F. E. L.; SANTOS, R. L. C. (ed.). **O Brasil e a reglobalização da indústria das terras raras**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013. p. 69-144.

MANO, E. S.; OBA, C. A. I.; NEUMANN, R.; RIVERA, C. B.; CHAVES, A. P.; MEXIAS, A. S.; GASPAR, J. C.; MILANEZI, B. P.; FILHO, R. A. R.; COSTA, F. R.; PILON, M. L.; SARMENTO, P. T. LREE from monazite associated with alkaline-carbonatites from Catalão (GO), Brazil: mineralogical studies. **Minerals**, v. 16, n. 3, p. 306, 2026. DOI: https://doi.org/10.3390/min16030306.

MIEKELEY, N.; DE JESUS, H. C.; DA SILVEIRA, C. P.; LINSALATA, P.; MORSE, R. Rare-earth elements in groundwaters from the Osamu Utsumi mine and Morro do Ferro analogue study sites, Poços de Caldas, Brazil. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 45, p. 365-387, 1992. DOI: https://doi.org/10.1016/0375-6742(92)90131-Q.

MIGASZEWSKI, Z. M.; GAŁUSZKA, A. The characteristics, occurrence, and geochemical behavior of rare earth elements in the environment: a review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 45, n. 5, p. 429-471, 2015. DOI: https://doi.org/10.1080/10643389.2013.866622.

NAVARRO, J.; ZHAO, F. Life-cycle assessment of the production of rare-earth elements for energy applications: a review. **Frontiers in Energy Research**, v. 2, p. 45, 2014. DOI: https://doi.org/10.3389/fenrg.2014.00045.

PAGE, M. J.; MCKENZIE, J. E.; BOSSUYT, P. M.; BOUTRON, I.; HOFFMANN, T. C.; MULROW, C. D.; SHAMSEER, L.; TETZLAFF, J. M.; AKL, E. A.; BRENNAN, S. E.; CHOU, R.; GLANVILLE, J.; GRIMSHAW, J. M.; HRÓBJARTSSON, A.; LALU, M. M.; LI, T.; LODER, E. W.; MAYO-WILSON, E.; MCDONALD, S.; MCGUINNESS, L. A.; STEWART, L. A.; THOMAS, J.; TRICCO, A. C.; WELCH, V. A.; WHITING, P.; MOHER, D. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**, v. 372, p. n71, 2021. DOI: https://doi.org/10.1136/bmj.n71.

PEREIRA, W. V. da S. et al. Levels and environmental risks of rare earth elements in a gold mining area in the Amazon. **Environmental Research**, v. 211, p. 113090, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113090.

RODRIGUES, A. A. P.; GUIMARÃES, J. T. F.; MARTINS, G. C. et al. Distribution, mobility and exposure risk of rare earth elements, uranium and thorium in soils impacted by illegal cassiterite-monazite mining in the southeastern Amazon, Brazil. **Environmental Geochemistry and Health**, v. 48, p. 563, 2026. DOI: https://doi.org/10.1007/s10653-026-03447-7.

SANEMATSU, K. The Serra Verde rare earth deposit in Goiás State, Brazil. **Shigen-Chishitsu**, v. 67, n. 2, p. 117-123, 2017. DOI: https://doi.org/10.11456/shigenchishitsu.67.117.

SÁNCHEZ PILOTO, D.; ESPINOSA, D. C. R.; BOTELHO JUNIOR, A. B. Environmental impact of extraction of rare earth elements from primary sources and NiMH batteries: a literature review. **Metals**, v. 16, n. 3, p. 254, 2026. DOI: https://doi.org/10.3390/met16030254.

SCHREIBER, A.; MARX, J.; ZAPP, P. Life cycle assessment studies of rare earths production: findings from a systematic review. **Science of the Total Environment**, v. 791, p. 148257, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148257.

SILVA, Y.; BIONDI, C.; VAN STRAATEN, P.; SOUZA JÚNIOR, V.; SANTOS, C.; ARAÚJO, J. Influence of metaluminous granite mineralogy on the rare earth element geochemistry of rocks and soils along a climosequence in Brazil. **Geoderma**, v. 306, p. 28-39, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.06.031.

TAKEHARA, L.; SILVEIRA, F. V.; SANTOS, R. Potentiality of rare earth elements in Brazil. In: **Rare Earths Industry: Technological, Economic, and Environmental Implications**. [S. l.]: Elsevier, 2016. p. 57-72. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802328-0.00004-8.

TETZNER, A. B. G.; FARIAS, C. H. B. de; FREITAS, N. P. de; CAMPOS, A. B. de. Rare earth elements, sustainability, and ion-adsorption clay: a bibliometric study on global trends and Brazil's prominence. **Journal of the Geological Survey of Brazil**, v. 9, n. 1, p. 41-52, 2026. DOI: https://doi.org/10.29396/jgsb.2026.v9.n1.2.

TURRA, C. Sustainability of rare earth elements chain: from production to food – a review. **International Journal of Environmental Health Research**, v. 28, n. 1, p. 23-42, 2018. DOI: https://doi.org/10.1080/09603123.2017.1415307.

WABER, H. N. The supergene thorium and rare-earth element deposit at Morro do Ferro, Poços de Caldas, Minas Gerais, Brazil. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 45, n. 1-3, p. 113-157, 1992. DOI: https://doi.org/10.1016/0375-6742(92)90123-P.

ZAPP, P.; SCHREIBER, A.; MARX, J.; KUCKSHINRICHS, W. Environmental impacts of rare earth production. **MRS Bulletin**, v. 47, n. 3, p. 267-275, 2022. DOI: https://doi.org/10.1557/s43577-022-00286-6.