SciELO Preprints

Estado da publicação: O preprint foi publicado em outro meio.
DOI do preprint publicado: https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2026.224757.pt

Geografia global da transição energética e extração mineral

João Henrique Santana Stacciarini, Ricardo Junior de Assis Fernandes Gonçalves

https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.16108

Submetido em: 2026-05-11
Postado em: 2026-05-12 (versão 1)
(AAAA-MM-DD)

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.16108

Artigo

Geografia global da transição energética e extração mineral

Global geography of the energy transition and mineral extraction

Geografía global de la transición energética y la extracción minera

João Henrique Santana Stacciarini[1] 0000-0003-3517-9410
Universidade Estadual de Goiás (UEG), Anápolis, GO, Brasil
https://orcid.org/0000-0003-3517-9410
joaostacciarini@hotmail.com

Ricardo Junior de Assis Fernandes Gonçalves
Universidade Estadual de Goiás (UEG), Anápolis, GO, Brasil
https://orcid.org/0000-0002-8033-0426
ricardo.goncalves@ueg.br

Recebido em: 15-08-2024
Aprovado em: 07-10-2025

Editor do artigo: Paula Juliasz

Resumo

Desafios ambientais e compromissos internacionais reforçam a necessidade da transição para fontes renováveis de energia, impulsionada pela crescente viabilidade econômica das tecnologias eólica e solar. Essa transição, contudo, enfrenta obstáculos relevantes: a menor densidade energética dessas fontes, em relação às fósseis, exige instalações de maior porte para alcançar potência equivalente; além disso, as infraestruturas eólica e solar apresentam vida útil inferior à das usinas baseadas em combustíveis fósseis, o que demanda reposições mais frequentes. Somadas às limitações atuais dos processos de reciclagem, essas reposições ampliam a demanda por minerais – frequentemente extraídos em países do Sul Global – e tendem a intensificar problemáticas sociais, ambientais e econômicas associadas à mineração nesses territórios. Com base na coleta e na análise de dados

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.16108

provenientes de relatórios, artigos e investigações em escala global, este estudo examina a relação entre a expansão das energias renováveis e o incremento da atividade mineradora, destacando as implicações desse processo.
Palavras-chave: Energia renovável; mineração; impactos; Sul Global.

Abstract

Environmental challenges and international commitments reinforce the need for a transition to renewable energy sources, driven by the growing economic viability of wind and solar technologies. However, this transition faces significant challenges: the lower energy density of these sources compared to fossil fuels requires larger installations to achieve equivalent power output. Additionally, wind and solar infrastructures have shorter lifespans than fossil fuel-based plants, which require more frequent replacements. Combined with current limitations in recycling processes, these replacements increase the demand for minerals – often extracted in countries of the Global South – and tend to intensify social, environmental, and economic issues associated with mining in these territories. Based on the collection and analysis of data from global reports, articles, and investigations, this study examines the relationship between the expansion of renewable energy and the growth of mining activities, highlighting the implications of this process.
Keywords: Renewable energy; mining; impacts; Global South.

Resumen

Los desafíos ambientales y los compromisos internacionales refuerzan la necesidad de la transición hacia fuentes de energía renovable, impulsada por la creciente viabilidad económica de las tecnologías eólica y solar. No obstante, esta transición enfrenta obstáculos relevantes: la menor densidad energética de estas fuentes, en comparación con los combustibles fósiles, exige instalaciones de mayor porte para alcanzar una potencia equivalente; además, las infraestructuras eólica y solar presentan una vida útil inferior a la de las centrales basadas en combustibles fósiles, lo que requiere reposiciones más frecuentes. Sumadas a las limitaciones actuales de los procesos de reciclaje, dichas reposiciones amplían la demanda de minerales – a menudo extraídos en países del Sur Global – y tienden a intensificar problemáticas sociales, ambientales y económicas asociadas a la minería en esos territorios. Con base en la recopilación y el análisis de datos provenientes de informes, artículos e investigaciones a escala global, este estudio examina la relación entre la expansión de las energías renovables y el incremento de la actividad minera, destacando las implicaciones de este proceso.
Palabras clave: Energía renovable; minería; impactos; Sur Global.

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.16108

Introdução

Os seres humanos e as sociedades têm sido historicamente dependentes de energia para a sobrevivência, bem como para o progresso econômico e social (Haberl, 2006). Como organismos vivos, os indivíduos obtêm energia principalmente da alimentação, que transforma nutrientes em combustível para funções vitais. Em escala coletiva, a energia constitui um pilar da organização, manutenção e avanço das sociedades (Chu *et al.*, 2016).

Atualmente, a produção e o consumo de energia atingiram patamares inéditos (EnerData, 2024), impulsionando a infraestrutura, alimentando indústrias, fortalecendo sistemas de comunicação, viabilizando o transporte de pessoas e mercadorias e garantindo serviços essenciais como iluminação, refrigeração, aquecimento e suporte a equipamentos médicos, entre inúmeras outras aplicações.

A crescente capacidade de produzir energia ao longo do tempo desencadeou sucessivas transições energéticas – processos dinâmicos marcados pela ascensão de novas fontes em relação às predominantes. Historicamente, essas mudanças associam-se a inovações tecnológicas e transformações socioeconômicas (Chow *et al.*, 2003). A biomassa, sobretudo madeira e outros materiais orgânicos, foi a primeira fonte dominante; com a Revolução Industrial, entre o final do século XVIII e o início do XIX, ocorreu a virada para o carvão; já no século XX, observou-se a expansão do petróleo e do gás natural (Khan *et al.*, 2019). Importa notar, contudo, que as fontes anteriores não necessariamente desaparecem. Em 2024, por exemplo, todas as principais fontes globais de energia atingiram recordes (Energy Institute, 2025), impulsionadas pelo aumento do consumo mundial (EnerData, 2024). Nesse sentido, parte da literatura descreve tais mudanças também como “adições” (York; Bell, 2019).

Embora essenciais para atender à demanda global, as principais fontes atuais – derivados de petróleo, carvão e gás natural – contribuem significativamente para as emissões de gases de efeito estufa (Gani, 2021), com impactos ambientais amplos, entre os quais está o aquecimento global (IPCC, 2022). Diante desses efeitos, intensifica-se o movimento em direção a fontes renováveis, especialmente solar fotovoltaica e eólica (Chen *et al.*, 2019). Todavia, ainda que centrais para a transição energética, as tecnologias de geração renovável apresentam características que as tornam intensivas em minerais: menor densidade energética (Van Zalk; Behrens, 2018), vida útil mais curta

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.16108

em comparação às fontes tradicionais (Statista, 2023c) e limitações nos processos de reciclagem (Chowdhury *et al.*, 2020; Jensen *et al.*, 2020; Massoud *et al.*, 2023).

Essa dependência tende a intensificar desafios socioambientais associados à mineração – atividade de alto impacto (Blight, 2011; Mancini; Sala, 2018) que envolve desapropriações de terras, controle e ocupação de grandes territórios, apropriação de bens comuns (como terra e água), uso intensivo de energia e água e a geração de volumes expressivos de resíduos (EPA, 2024). Some-se a isso o fato de que grande parte dos minerais necessários à transição é extraída no Sul Global (Stacciarini; Gonçalves, 2025b) – países da África, América Latina e Ásia que frequentemente combinam menor renda, maior desigualdade, histórico de colonização, marcos regulatórios mais brandos, governos dependentes da mineração e sociedades civis fragilizadas. Esse contexto favorece a atuação de multinacionais, reduzindo custos e ampliando lucros, ao passo que transfere para as populações locais os impactos socioambientais (Stacciarini; Gonçalves, 2025b). No Brasil, exemplos emblemáticos incluem as tragédias de Mariana (2015), Brumadinho (2019) e Maceió (2023), com centenas de mortes, deslocamentos populacionais e danos ambientais em larga escala (PoEMAS, 2015; Milanez; Felippe, 2021).

Com o objetivo de compreender esse vínculo entre transição energética e mineração, este artigo está organizado em cinco seções, além desta introdução, da metodologia, das conclusões e das referências. A primeira apresenta “transição energética e energia renovável”. A segunda examina “a relação entre energia renovável e extração de minerais”. A terceira discute “a interação entre vida útil, reciclagem e demanda por minerais”. A quarta aborda “o impacto dos veículos elétricos sobre a demanda por minerais”. Por fim, a quinta seção considera “implicações sociais, ambientais e econômicas do aumento da demanda por minerais”.

Metodologia

Para a realização da pesquisa que gerou este artigo, adotou-se uma abordagem metodológica que envolveu a coleta, tabulação e análise extensiva de dados e informações relacionadas ao nexo entre transição energética e demanda mineral, bem como às implicações sociais, ambientais e econômicas decorrentes desse processo. A interpretação e a discussão dos dados foram enriquecidas pelo diálogo com uma variedade de fontes bibliográficas científicas, incluindo artigos acadêmicos de diversos periódicos internacionais.

O debate iniciou-se mapeando as diferentes fontes energéticas e suas respectivas contribuições para a Matriz Energética Mundial, utilizando dados fornecidos pela Agência Internacional de Energia

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.16108

(IEA, 2023). Para compreender a importância das fontes de energia renováveis na mitigação do aumento da temperatura global, consultou-se o relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2022).

O investimento total em infraestrutura de energia renovável baseou-se no relatório "Global Landscape of Renewable Energy Finance 2023", publicado pela Agência Internacional de Energia Renovável em parceria com a Climate Policy Initiative (IRENA; CPI, 2023).

Para discutir a quantidade e a demanda de metais necessários à fabricação de infraestruturas geradoras de energia eólica e solar, bem como de carros elétricos, foram cruzados dados transversais dos relatórios "Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition", elaborado pelo Banco Mundial (WB, 2020), e "The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions", disponibilizado pela Agência Internacional de Energia (IEA, 2021). Incluíram-se também estatísticas e informações de outros repositórios globais, como a Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA, 2024a; 2024b) e a Statista (2023a; 2023b; 2023c), empresa alemã especializada na coleta e visualização de dados.

Para avaliar as implicações sociais, ambientais e econômicas do aumento da demanda por minerais, partiu-se da definição de "minerais críticos" para a transição energética proposta pela IRENA (2021). A partir dela, identificaram-se, em fontes internacionais, os principais países produtores de cobalto (USGS, 2024), níquel (Statista, 2024c), cobre (Statista, 2024b), lítio (Williams, 2024) e elementos de terras raras (Statista, 2024d). Após a tabulação, realizou-se pesquisa bibliográfica e documental – livros, artigos acadêmicos, reportagens, relatórios de campo e entrevistas – para caracterizar as formas de extração nesses países e os desdobramentos ambientais, econômicos e políticos associados.

Transição energética e energia renovável

Transição energética refere-se ao processo dinâmico de substituição de uma fonte de energia dominante por outra ao longo do tempo. Essas mudanças podem se estender por longos períodos e são influenciadas por variáveis como competitividade de preços; choques nas fontes dominantes (restrições temporárias por diferentes motivos); estímulos governamentais (ambiente institucional e regulatório, subsídios e incentivos fiscais); e atributos que agregam valor simbólico ao consumo – como menor poluição, maior flexibilidade dos serviços energéticos ou facilidade de acesso –, mesmo quando os preços iniciais são mais elevados (Fouquet, 2016). York e Bell (2019), contudo, sugerem que o surgimento e a dominância de uma nova fonte configuram "adições", uma vez que, com

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.16108

frequência, a fonte anterior permanece em uso, mesmo diante do rápido desenvolvimento e da eventual predominância da nova – em parte devido à recorrente expansão da produção e do consumo energéticos em escala global (Chow *et al.*, 2003; EnerData, 2024; Energy Institute, 2025).

O mapeamento e a análise (Gráfico 1) da matriz energética global atual mostram que, apesar da ascensão do petróleo (29,5%) e do gás natural (23,6%), fontes anteriormente dominantes, como o carvão (27,2%) e a biomassa (9,5%), permanecem relevantes.

Gráfico 1 – Matriz Energética Mundial (2023).
Fonte: IEA (2023). Elaborado pelos autores.

Em síntese, a matriz mundial segue predominantemente não renovável: petróleo, carvão, gás natural e energia nuclear somam 85,3% do total. Embora cumpram papel central no atendimento à demanda, essas fontes – especialmente os combustíveis fósseis – respondem por emissões significativas de gases de efeito estufa, contribuindo para o aquecimento global e outros impactos ambientais (Gani, 2021; IPCC, 2022). Diante desse quadro, intensifica-se a necessidade de transição para fontes renováveis (Chen *et al.*, 2019), o que tem impulsionado investimentos em pesquisa, desenvolvimento e implementação de soluções como a energia solar fotovoltaica, a eólica, a bioenergia, os biocombustíveis, a hidrelétrica, a energia das ondas, a geotérmica e tecnologias híbridas que integram múltiplas fontes com sistemas de armazenamento. Segundo a Agência Internacional de Energia Renovável e o Climate Policy Initiative (IRENA; CPI, 2023), entre 2013 e 2022, foram investidos aproximadamente 3,4 trilhões de dólares em infraestrutura para energia renovável. Desse total, 86,5% destinaram-se a projetos de energia solar e eólica, correspondendo a 47,8% (cerca de 1,63 trilhão de dólares) e 38,7% (aproximadamente 1,31 trilhão de dólares), respectivamente.

A relação entre energia renovável e extração de minerais

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.16108

A transição para uma matriz energética mundial baseada em fontes renováveis apresenta desafios significativos, pois essas tecnologias demandam uma quantidade consideravelmente maior de bens minerais em comparação às fontes convencionais baseadas em combustíveis fósseis (WB, 2020; IEA, 2021; IRENA, 2021). Dados da IEA (2021) indicam que uma usina eólica *onshore* pode requerer até nove vezes mais recursos minerais do que uma usina a gás natural de capacidade semelhante (Gráfico 2); em projetos *offshore*, esse número pode chegar a 15 vezes.

Esse diferencial decorre, sobretudo, da menor densidade de potência dos parques eólicos (Van Zalk; Behrens, 2018) em relação às usinas a carvão ou a gás natural. Em outras palavras, como a conversão de energia do vento apresenta limitações físicas e requer espaçamento entre turbinas, é necessário instalar uma infraestrutura mais extensa – e, portanto, mais intensiva em materiais – para produzir quantidade equivalente de energia. A título de ilustração, enquanto a usina termoelétrica chinesa Tuoketuo Power Station, uma das maiores do mundo, possui 6.720 MW de capacidade instalada, as turbinas eólicas mais potentes, com pás superiores a 100 m, situam-se na faixa de 10 a 20 MW (EERE, 2024).

Gráfico 2 – Intensidade material (kg/MW) na construção de diferentes tecnologias de geração de energia.
Fonte: IEA (2021). Elaborado pelos autores.

À luz desse panorama, um modelo proposto por Watari *et al.* (2019) projetou que a transição energética poderá resultar em aumento de 200-900% nos fluxos de produção mineral no setor elétrico e de 350-700% no setor de transportes (veículos elétricos) entre 2015 e 2050, a depender dos cenários de cumprimento de metas delineados por agências internacionais. Nesse contexto, alguns minerais passaram a ser classificados como “críticos” para a transição energética. Embora a definição varie entre instituições e autores, a IRENA (2021) caracteriza esses minerais como essenciais às tecnologias de transição, cujas cadeias de suprimento enfrentam desafios significativos – como alta concentração geográfica da produção, declínio do teor/qualidade dos minérios e potenciais expansões de oferta com efeitos desestabilizadores sobre preços e equilíbrio entre oferta e demanda.

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.16108

Para a IRENA (2021), os minerais críticos incluem cobalto, cobre, níquel, lítio e elementos de terras raras (ETRs), com ênfase em neodímio e disprósio. Essa lista, contudo, pode variar conforme autores, recortes analíticos e períodos, abrangendo, ainda, alumínio, cromo, gálio, germânio, grafite, índio, ferro, lantânio, chumbo, manganês, molibdênio, platina, rênio, rutênio, escândio, nióbio, prata, vanádio, tântalo, titânio, ítrio e zinco (Church; Crawford, 2018; IEA, 2021; IRENA, 2021). Esses minerais são indispensáveis à manufatura das infraestruturas e equipamentos do setor, conferindo resistência, durabilidade, condutividade e eficiência aos componentes. No caso dos sistemas de geração eólica, por exemplo, são fundamentais na produção de torres, pás do rotor, caixas de engrenagens, geradores, sistemas de armazenamento em baterias e fiações internas e externas, entre outros (Eberle *et al.*, 2023).

Nas instalações eólicas marítimas (*offshore*), a demanda por minerais é ainda maior, em razão das fundações de grande porte, das estruturas de transição e da extensa malha de cabos submarinos necessários para a conexão e o escoamento da energia. Um exemplo é o parque eólico Hollandse Kust Zuid (HKZ), em construção na costa dos Países Baixos (Figura 1). Desenvolvido pela Vattenfall (2024), o projeto reúne 139 turbinas, com 251 metros de altura e pás de 94 metros, assentadas sobre fundações subaquáticas entre 18 e 27 metros de profundidade – conjunto de características que evidencia a elevada intensidade material requerida pelos avanços no setor de energia renovável (WB, 2020; IEA, 2021).

Figura 1 – Estruturas da geração eólica *offshore* e sua elevada dependência de minerais na fabricação e na instalação.
Fonte: Vattenfall (2024). Compilado pelos autores.

Embora ainda tenham participação reduzida na matriz energética mundial (Gráfico 1), as infraestruturas de geração eólica e solar são as que mais crescem atualmente. Entre 1997 e 2022, a capacidade global de geração eólica aumentou cerca de 120 vezes – de 7,5 GW para 899 GW (IRENA, 2024b). Hoje, aproximadamente 93% dessa capacidade é em terra (*onshore*) e 7% no mar (*offshore*) (IRENA, 2024b). Apesar de ainda modesta, a parcela *offshore* avança de forma contínua e expressiva:

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.16108

há uma década respondia por apenas 1,9% do total. Já a tecnologia solar fotovoltaica (PV) – que converte luz solar em eletricidade por meio de células solares (IRENA, 2024b) – passou de 74 GW, em 2011, para 1.062 GW, em 2022 (Gráfico 3), um crescimento de 14 vezes.

Gráfico 3 – Rápida expansão da geração global de energia solar.
Fonte: IRENA (2024b). Elaborado pelos autores.

Essa expansão decorre, em grande parte, das reduções de custo, que tornaram a energia solar uma das opções mais atrativas para investidores em várias regiões (Statista, 2023a). Em países como o Brasil, a energia solar já se mostra significativamente mais vantajosa do que tecnologias baseadas em combustíveis fósseis (EPE, 2021). Assim, espera-se que a adoção dessa fonte continue crescendo em ritmo acelerado, especialmente em países com alta incidência de luz solar, como muitos situados na África, América Latina e Ásia.

As tecnologias fotovoltaicas atuais incluem, predominantemente, alumínio, silício, cobre e prata, além de outros minerais em menores quantidades, como chumbo, zinco, índio, molibdênio, gálio, telúrio e níquel (WB, 2020). Segundo projeções do Banco Mundial, a expansão dos painéis solares deve impulsionar significativamente a demanda – e a extração – desses minerais críticos nas próximas décadas (WB, 2020).

A energia fotovoltaica é altamente modular e distribui-se em empreendimentos que variam de pequenas instalações residenciais integradas à rede a grandes centrais com milhões de painéis. Do ponto de vista da escala espacial, a Índia emergiu como uma das líderes na implementação de parques solares de grande porte. Até 2020, cerca de nove “Ultra Mega Parques de Energia Solar” estavam em operação ou desenvolvimento no país, somando aproximadamente 14.693 MW (Shah, 2020). O maior deles, o Parque Solar Bhadla, tem capacidade de 2.245 MW, e ocupa cerca de 5,7 mil hectares – o equivalente a quase oito mil campos de futebol (BRC, 2023). Com cerca de 10 milhões de módulos, visíveis do espaço (Figura 2), o complexo ilustra a vasta quantidade de recursos minerais necessária ao desenvolvimento dessa atividade energética.

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.16108

Figura 2 – Parques solares com milhões de módulos fotovoltaicos, como o Bhadla Solar Park (Índia), exemplificam a elevada intensidade de uso de minerais.
Fonte: Google Earth (2024). Elaborado pelos autores.

A potência média de um painel solar depende de fatores como tipo, eficiência, tamanho e condições locais de insolação, incluindo inclinação e sombreamento (Dobos, 2013). Os modelos variam de menos de 150 watts a mais de 550 watts por painel. Em equipamentos mais modernos, a potência média é de cerca de 400 watts (Allen; Tynan, 2023), sendo necessários aproximadamente 2,5 mil painéis para gerar 1 MW. Considerando essa média de 400 watts por painel, a produção atual de 1.062 gigawatts (GW) (Gráfico 3) requer aproximadamente 2,7 bilhões de painéis solares.

Além disso, no cenário de acelerada digitalização da economia, grandes empresas de tecnologia vêm intensificando aportes em energias renováveis – tanto no âmbito de estratégias de sustentabilidade quanto para reforçar sua reputação perante o público e os investidores –, o que acelera ainda mais a expansão de usinas solares e eólicas (Stacciarini; Gonçalves, 2025a). Entre os exemplos, Google (2024) e Amazon (2024) afirmam compensar 100% de seu consumo de eletricidade – inclusive o de data centers – por meio de mecanismos corporativos de aquisição de energia renovável. A Microsoft, por sua vez, comprometeu-se a alcançar essa meta até 2030 (Welsch, 2022). Para atingir tais metas, a Amazon declara manter, em propriedade ou parceria, cerca de 500 projetos solares e eólicos distribuídos globalmente (Amazon, 2024). Já o Google informa que, entre 2010 e 2023, firmou mais de 115 contratos de compra de energia limpa, com capacidade equivalente a aproximadamente 36 milhões de painéis fotovoltaicos (Google, 2024). Em 2024, a empresa também anunciou que seus futuros data centers serão estrategicamente implantados próximos a parques solares e eólicos, assegurando suprimento direto dessas fontes (Calma, 2024a). Um caso ilustrativo é o complexo Orion Solar Belt, no Texas, projetado para abastecer data centers do Google: com mais de 1,3 milhão de módulos, possui capacidade de 900 MW (SP Energy, 2024). No mesmo ano, a Microsoft divulgou a assinatura de um dos maiores contratos corporativos de compra futura de energia renovável, estimado em cerca de US$ 17 bilhões (Calma, 2024b). Números que evidenciam a extraordinária demanda por minerais como matéria-prima para a viabilização dessas estruturas.

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.16108

A interação entre vida útil, reciclagem e demanda por minerais

Além de demandarem uma quantidade maior de minerais para produzir a mesma quantidade de energia, as infraestruturas de geração renovável – como solar e eólica – apresentam vida útil significativamente menor que aquelas operadas por combustíveis fósseis. Isso implica substituições mais frequentes e, por consequência, incremento adicional na demanda por bens minerais. A título de exemplo, enquanto usinas a carvão mineral ou nucleares podem operar por aproximadamente 40 a 50 anos, instalações solares têm vida útil estimada em 25 a 30 anos e usinas eólicas, em 20 a 25 anos (Statista, 2023c).

A esse quadro soma-se o fato de a reciclagem dessas infraestruturas – especialmente painéis solares, turbinas eólicas e baterias – ainda ser bastante limitada. As barreiras envolvem desde a viabilidade econômica até a complexidade técnica, bem como a insuficiência de infraestrutura dedicada e de políticas e incentivos específicos (Chowdhury *et al.*, 2020; Jensen *et al.*, 2020; Milanez, 2021; Massoud *et al.*, 2023). Como resultado, muitas dessas estruturas convertem-se em passivos ambientais relevantes (Liu; Barlow, 2017; Qi; Zhang, 2017; Dehghani-Sanij *et al.*, 2019), ampliando a pressão sobre o meio ambiente e reforçando a necessidade de novas extrações minerais para viabilizar suas substituições.

O impacto dos veículos elétricos sobre a demanda por minerais

Outra tecnologia central para a transição energética – e diretamente associada ao aumento da demanda por bens minerais – são os carros elétricos. Eles se destacam não apenas por utilizarem eletricidade, muitas vezes proveniente das fontes renováveis discutidas anteriormente, em substituição aos combustíveis fósseis, mas também por exigirem maior quantidade de minerais em sua composição e fabricação, especialmente devido às baterias e aos sistemas elétricos (Ballinger *et al.*, 2019).

De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2021), um carro elétrico típico pode requerer até seis vezes mais minerais críticos do que um carro convencional (Gráfico 4). Os minerais predominantes incluem cobre, grafite, níquel, manganês, cobalto, lítio e terras raras. Alumínio e aço – produzidos a partir de bauxita e ferro, respectivamente – são comuns em ambos os tipos de veículos. As baterias, que representam parcela significativa do volume e do peso de um veículo elétrico, podem ocupar todo o chassi e pesar centenas de quilos (Valdes-Dapena, 2021).

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.16108

Gráfico 4 – Intensidade material (kg de minerais por veículo): comparação entre elétricos e convencionais.
Fonte: IEA (2021). Elaborado pelos autores.

Em 2022, havia cerca de 26 milhões de veículos elétricos em circulação no mundo (Statista, 2023b). Aproximadamente 63,5% dessa frota foi comercializada apenas nos dois anos anteriores, sinalizando um crescimento acelerado e alinhado à "Declaração de Paris sobre Eletromobilidade e Mudanças Climáticas", de 2015, que projetava cerca de 100 milhões de carros elétricos até 2030 (UNFCCC, 2015). Esse ritmo de expansão reforça a magnitude da demanda por minerais necessária para sustentar a eletromobilidade.

Implicações sociais, ambientais e econômicas do aumento da demanda por minerais

Ciente de que a transição para fontes renováveis será intensiva em minerais, torna-se necessário refletir sobre os desdobramentos do avanço da mineração para atender a essa nova demanda. Afinal, a mineração é, por si só, uma atividade de alto impacto, caracterizada pela desapropriação de terras, pelo controle e ocupação de grandes territórios e pela apropriação da natureza e de bens comuns (como terra e água). O processo – da extração no solo e subsolo ao transporte para usinas de processamento, trituração, separação e refino – exige grandes quantidades de energia e água e gera volumosos resíduos (Freslon; Cooney, 2018). Não por acaso, a cada ano são produzidas dezenas de bilhões de toneladas de rejeitos derivados da mineração (EPA, 2024), o que a coloca entre as atividades humanas de maior impacto na atualidade (Blight, 2011).

Mostramos, em outro artigo (Stacciarini; Gonçalves, 2025b), que a maioria dessas extrações ocorre no Sul Global – termo utilizado nas últimas décadas para designar países da África, América Latina e Ásia, em substituição a expressões como "países subdesenvolvidos" ou "terceiro mundo" (Buarque, 2023). Historicamente, a exploração mineral nesses países tem sido vantajosa para

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.16108

companhias multinacionais, que encontram abundância de recursos e marcos trabalhistas e ambientais menos rígidos, reduzindo custos de produção e ampliando lucros (Hilson; Haselip, 2004; Davis; Tilton, 2005; Freslon; Cooney, 2018; Coumans, 2019; Gonçalves; Milanez, 2019; Svampa, 2019; Alonso, 2024). Diante do imperativo do desenvolvimento, muitos governos são induzidos a ceder territórios e recursos a megaempreendimentos neoextrativistas, aceitando impactos sociais e ambientais em troca de contrapartidas econômicas limitadas, como royalties (Gonçalves; Milanez, 2019). Com frequência, os países anfitriões do Sul Global obtêm poucos benefícios fiscais (tributos e royalties), enquanto arcam com o ônus socioambiental (Davis; Tilton, 2005).

O caso do cobalto – essencial às infraestruturas da transição energética, com as baterias de veículos elétricos respondendo por parcela expressiva da demanda recente (Statista, 2024c) – é emblemático. Aproximadamente 74% da produção mundial está concentrada na República Democrática do Congo (RDC) (USGS, 2024), país da África Central colonizado pela Bélgica até a década de 1960. Ali, a extração ocorre muitas vezes sem condições adequadas de segurança, expondo trabalhadores a metais tóxicos e elevando o risco de doenças graves (Sovacool *et al.*, 2020). Além das grandes mineradoras, milhares de congoleses atuam na mineração artesanal em condições precárias. Investigações recentes identificam trabalho infantil, mortes por desabamentos e manuseio inseguro do minério por mulheres e crianças (Maconachie, 2024). O cobalto extraído é repassado a intermediários e, assim, chega às grandes empresas, que evitam vínculos diretos com as violações. Organizações também denunciam contaminação da água nas proximidades das minas, com impactos sobre pesca, agricultura e saúde das comunidades, incluindo aumento de doenças ginecológicas, dermatológicas e reprodutivas (Raid; Afrewatch, 2024).

Situação análoga de tensões e contradições aparece no níquel – mineral crítico para baterias e sistemas de armazenamento. Cerca de metade da produção mundial provém da Indonésia, ex-colônia holandesa independente apenas em 1945 (Statista, 2024c). Impulsionado pela demanda associada à transição energética, o país multiplicou por seis sua produção entre 2010 e 2023 (Statista, 2024g). Todavia, antes de se transformar em painéis solares, torres eólicas e baterias, boa parte do níquel indonésio é extraído e processado com uso intensivo de carvão – fonte altamente poluente (Jong, 2023). O consumo de carvão elevou a Indonésia ao grupo dos maiores produtores, consumidores e emissores de CO_2 do mundo (IEA, 2024; Climate Watch, 2024). Além disso, atividades de mineração e fundição têm contaminado solos, águas e áreas costeiras do arquipélago, prejudicando ecossistemas e comunidades dependentes da pesca e da agricultura (Sawal, 2022; CRI, 2024). As condições de trabalho também são precárias, com ao menos 47 mortes registradas entre 2015 e 2022 em minas de níquel (Amindoni, 2023).

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.16108

O cobre – metal de maior condutividade elétrica entre os não preciosos – é indispensável a turbinas eólicas, painéis solares, veículos elétricos e redes modernas, sendo classificado como crítico para a transição energética (ICA, 2024). A produção global saltou de 16 milhões de toneladas métricas em 2010 para 22 milhões em 2023, com perspectiva de alta nas próximas décadas (Statista, 2024g). O Chile lidera (24%), seguido por Peru e RDC (10% cada) (Statista, 2024b). No Chile, os impactos socioambientais são significativos: no norte, comunidades indígenas convivem com poeira tóxica que eleva riscos de adoecimento (Zanetta-Colombo *et al.*, 2022); na costa central, a Fundição de Ventanas foi encerrada em 2023 após protestos contra décadas de poluição, convertendo a região em "zona de sacrifício", com episódios recorrentes de contaminação do ar, da água e do solo (Balcazar, 2016; Gorena *et al.*, 2020; Milesi, 2022). No Peru, investigações revelaram contaminação hídrica e altos níveis de metais tóxicos – como arsênio, chumbo e mercúrio – entre moradores de áreas afetadas por projetos mineradores (Anistia Internacional, 2021; Custodio, 2022). Na República Democrática do Congo, os desafios são os mesmos já observados na cadeia do cobalto, incluindo precarização laboral, contaminação ambiental e violações de direitos humanos (Sovacool *et al.*, 2020; Amnesty International, 2023; Maconachie, 2024; Raid; Afrewatch, 2024).

O lítio também ilustra as assimetrias da transição. O consumo global aumentou 686% entre 2010 e 2023, impulsionado sobretudo pelas baterias de íons de lítio para veículos elétricos, que responderam por 87% da demanda em 2023 (Statista, 2024g). Embora a Austrália lidere a produção (46,6%), cerca de 60% das reservas conhecidas estão na América Latina, especialmente no "Triângulo do Lítio" – Chile, Argentina e Bolívia –, já responsável por cerca de 30% da produção global (Williams, 2024). Nessa região, a extração ocorre em desertos salinos, por meio do bombeamento de salmouras e evaporação em grandes piscinas a céu aberto (Ahmad, 2020). O processo, intensivo em uso de água, afeta a disponibilidade hídrica em áreas áridas, com prejuízos à agricultura, à pecuária e aos modos de vida das comunidades locais (Liu; Agusdinata, 2020). Além da contaminação de solos e ecossistemas, destacam-se a baixa geração de empregos, a arrecadação limitada de royalties e o aumento de conflitos socioambientais (Ahmad, 2020; Mazzieri; Montanari, 2024).

Por fim, os elementos de terras raras (ETRs) – um grupo de 17 metais com propriedades singulares – são indispensáveis a uma vasta gama de tecnologias (GAAG, 2024), incluindo ímãs e superímãs, ligas metálicas, eletrônicos, baterias, catalisadores, vidros e cerâmicas especiais, com papel central em painéis solares, geradores eólicos e veículos elétricos (Balaram, 2019; GAAG, 2024). A liderança da China na produção (68,3%) (Statista, 2024d) convive com impactos ambientais severos, como poluição da água e do solo decorrente do uso intensivo de reagentes na extração e no processamento, impondo riscos à saúde de populações locais (Liu *et al.*, 2019; Standaert, 2019; Caixin Global, 2022). Já Mianmar, terceiro maior produtor (Statista, 2024d), dobrou sua produção entre 2018

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.16108

e 2023 (Statista, 2024h), mas essa expansão tem ocorrido sob graves irregularidades – mineração ilegal, controle por milícias, ausência de regulamentação ambiental e violações de direitos humanos (Global Witness, 2022; 2024). Registros incluem adoecimentos, mortes por acidentes e exposição química, além do aumento da violência, do tráfico de drogas e da prostituição nas áreas mineradas (Global Witness, 2022; 2024; Naing, 2024).

Conclusões

Este estudo examinou a interconexão entre a transição energética e a demanda mineral em escala global. Partiu-se da constatação de que a matriz energética mundial permanece majoritariamente não renovável – 85,3% do total –, com destaque para petróleo (29,5%), carvão (27,2%) e gás natural (23,6%), todos com impactos ambientais significativos. Em seguida, evidenciou-se que desafios ambientais e acordos internacionais impulsionam a transição para fontes renováveis, movimento favorecido pela recente viabilidade econômica das tecnologias solar e eólica em diversas regiões, o que atraiu, entre 2013 e 2022, cerca de US$ 1,63 trilhão e US$ 1,31 trilhão, respectivamente, e resultou em forte expansão da geração.

Contudo, ainda que centrais para a transição, as tecnologias renováveis apresentam características – menor densidade energética, vida útil mais curta em comparação às fontes tradicionais e limitações nos processos de reciclagem – que as tornam intensivas em minerais, tensionando o discurso de "energia sustentável, renovável e limpa". À luz desse quadro, a procura por certos minerais cresceu de forma acelerada, e alguns passaram a ser tratados como críticos para a transição energética.

A análise da procedência desses minerais – cobalto na RDC, níquel na Indonésia, cobre nos Andes, lítio no "Triângulo do Lítio" e elementos de terras raras (ETRs) na China e em Mianmar – mostrou que sua extração ocorre, em grande medida, em nações do Sul Global. Trata-se de países da África, América Latina e Ásia que frequentemente combinam menor renda, maior desigualdade, histórico de colonização, marcos regulatórios mais brandos, governos dependentes da mineração e sociedades civis fragilizadas. Nesses contextos, são recorrentes problemas socioambientais: precarização do trabalho, violações de direitos, contaminação de água e solo, emissões associadas ao processamento mineral e a formação de "zonas de sacrifício". Em geral, as populações locais auferem poucos benefícios econômicos e pouco acessam as tecnologias que ajudaram a viabilizar – como painéis solares, torres eólicas e veículos elétricos –, o que revela a reprodução de assimetrias históricas entre centros de consumo e periferias extrativas.

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.16108

Dessa forma, a transição energética só cumprirá sua promessa climática se for também material e territorialmente justa. Isso implica alinhar metas de descarbonização a objetivos explícitos de redução da intensidade material, fortalecimento de direitos e repartição equitativa de benefícios, sobretudo nos territórios fornecedores de minerais críticos. Sem esse duplo movimento, corremos o risco de enfrentar a crise climática reproduzindo, sob novas roupagens, antigas formas de desigualdade e degradação.

Referências

AHMAD, Samar. The Lithium Triangle: where Chile, Argentina, and Bolivia meet. **Harvard International Review**, v. 41, n. 1, p. 51-53. 15 jan. 2020. Disponível em: https://www.jstor.org/stable/26917284. Acesso em: 12 ago. 2024.

ALLEN, Nafeesah; TYNAN, Corinne. How Much Power Does a Solar Panel Produce? **Forbes**, 28 maio 2023. Disponível em: https://www.forbes.com/home-improvement/solar/how-much-power-does-a-solar-panel-produce/. Acesso em: 29 jan. 2024.

ALONSO, Aleida Azamar. **El multicolor de la energía**: desafíos y oportunidades para la transición energética. Cidade do México: Monarca Impresoras, 2024.

AMAZON. **Amazon meets 100% renewable energy goal 7 years early. 2024**. Written by Amazon Staff. Disponível em: https://www.aboutamazon.com/news/sustainability/amazon-renewable-energy-goal. Acesso em: 16 dez. 2024.

AMINDONI, Ayomi. As EVs surge, so does nickel mining's death toll: in the mineral-rich fringes of indonesia, whose nickel will feed EV giants like tesla, the deaths of miners continue to mount. **Rest of World**, 23 jul. 2023. Disponível em: https://restofworld.org/2023/indonesia-nickel-mining-deaths/. Acesso em: 28 jun. 2024.

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.16108

AMNESTY INTERNATIONAL. **DRC**: powering change or business as usual? London (UK): Amnesty International, 2023. 100 p. Disponível em: https://www.amnesty.org/en/documents/AFR62/7009/2023/en/. Acesso em: 23 ago. 2024.

ANISTIA INTERNACIONAL. **Estado de Salud Fallido**: emergencia de salud en pueblos indígenas de espinar, perú. London (UK): Amnistía Internacional, 2021. 48 p. Disponível em: https://www.amnesty.org/es/documents/amr46/3829/2021/es/. Acesso em: 23 ago. 2024.

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

BALCAZAR, Sebastián. Poisoned lives: five decades of pollution in Chile's quintero-ventanas bay. **Mongabay**, 04 out. 2016. Disponível em: https://news.mongabay.com/2016/10/poisoned-lives-five-decades-of-pollution-in-chiles-quintero-ventanas-bay/. Acesso em: 19 ago. 2024.

BALLINGER, Benjamin *et al.* The vulnerability of electric vehicle deployment to critical mineral supply. **Applied Energy**, v. 255, p. 113844, dez. 2019. http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113844.

BLIGHT, Geoffrey. Mine Waste: a brief overview of origins, quantities, and methods of storage. *In*: LETCHER, Trevor; VALLERO, Daniel (ed.). **Waste**: a handbook for management. Cambridge (U.S): Academic Press, 2011. p. 77-88. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381475-3.10005-1.

BRC – Blackridge Research & Consulting. **India Builds World's Largest Solar Park at Bhadla in Rajasthan to Decarbonize its Energy Production**. 2023. Blackridge Research & Consulting: Hyderabad, Telangana, India. Disponível em: https://www.blackridgeresearch.com/project-profiles/bhadla-solar-park-the-largest-solar-pv-power-plant-project-in-the-world. Acesso em: 30 jan. 2024.

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.16108

BUARQUE, Daniel. O Sul Global está em ascensão: mas o que é exatamente o sul global? **Interesse Nacional**, 10 jul. 2023. Disponível em: https://interessenacional.com.br/portal/o-sul-global-esta-em-ascensao-mas-o-que-e-exatamente-o-sul-global/. Acesso em: 01 jul. 2024.

CAIXIN GLOBAL. China's rare earth mining could cause irreversible environmental harm. **ThinkChina**, 06 maio 2022. Disponível em: https://www.thinkchina.sg/society/chinas-rare-earth-mining-could-cause-irreversible-environmental-harm. Acesso em: 16 set. 2024.

CALMA, Justine. Google's future data centers will be built next to solar and wind farms. **The Verge**, 10 dez. 2024a. Disponível em: https://www.theverge.com/2024/12/10/24317888. Acesso em: 16 dez. 2024.

CALMA, Justine. Microsoft made the biggest renewable energy agreement ever to fuel its AI ambitions. **The Verge**, 02 maio 2024b. Disponível em: https://www.theverge.com/2024/5/2/24147153. Acesso em: 20 dez. 2024.

CHEN, Bin *et al.* Pathways for sustainable energy transition. **Journal of Cleaner Production**, v. 228, p. 1564-1571, ago. 2019. http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.372.

CHOW, Jeffrey *et al.* Energy Resources and Global Development. **Science**, v. 302, n. 5650, p. 1528-1531, 28 nov. 2003. American Association for the Advancement of Science (AAAS). http://doi.org/10.1126/science.1091939.

CHOWDHURY, M. S. *et al.* An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. **Energy Strategy Reviews**, v. 27, p. 100431, jan. 2020. http://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100431.

CHU, Shahariar *et al.* The path towards sustainable energy. **Nature Materials**, v. 16, n. 1, p. 16-22, 20 dez. 2016. http://doi.org/10.1038/nmat4834.

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.16108

CHURCH, Clare; CRAWFORD, Alec. **Green Conflict Minerals**: the fuels of conflict in the transition to a low-carbon economy. Winnipeg (Canada): International Institute for Sustainable Development (IISD), 2018. 56 p. Disponível em: https://www.iisd.org/system/files/publications/green-conflict-minerals.pdf. Acesso em: 27 fev. 2024.

CLIMATE WATCH. **Historical GHG Emissions**. 2024. Disponível em: https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?breakBy=countries&end_year=2022&gases=co2&source=PIK&start_year=1850. Acesso em: 06 jul. 2024.

COUMANS, Catherine. Minding the "governance gaps": re-thinking conceptualizations of host state "weak governance". **The Extractive Industries and Society**, v. 6, n. 3, p. 675-687, jul. 2019. http://doi.org/10.1016/j.exis.2019.06.003.

CRI – Climate Rights International. **Nickel Unearthed**: the human and climate costs of Indonesia's nickel industry. California (United States): Climate Rights International, 2024. 139 p. Disponível em: https://cri.org/reports/nickel-unearthed/. Acesso em: 25 jun. 2024.

CUSTODIO, Leslie Moreno. "¿Cómo vamos a vivir?" El impacto de la minería en las comunidades del sur de Perú. **Dialogue Earth**, v. 6, n. 3, p. 675-687, dez. 2022. Disponível em: https://dialogue.earth/es/polucion/361618-como-vamos-a-vivir-el-impacto-de-la-mineria-en-las-comunidades-del-sur-de-peru/. Acesso em: 23 ago. 2024.

DAVIS, Graham A.; TILTON, John E. The resource curse. **Natural Resources Forum**, v. 29, n. 3, p. 233-242, ago. 2005. http://doi.org/10.1111/j.1477-8947.2005.00133.x.

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.16108

DEHGHANI-SANIJ, Alireza. *et al.* Study of energy storage systems and environmental challenges of batteries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 104, p. 192-208, abr. 2019. http://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.023.

DOBOS, Aron P. **PV Watts Version 1 Technical Reference**. Golden, CO (Estados Unidos): National Renewable Energy Lab. (NREL), 2013. 11 p. https://doi.org/10.2172/1096689.

EBERLE, Annika *et al.* Materials Used in U.S. Wind Energy Technologies: Quantities and Availability for Two Future Scenarios. **National Renewable Energy Laboratory** (NREL). Golden, Colorado, United States. 2023. https://doi.org/10.2172/1995805.

EERE – Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. Wind Turbines: the Bigger, the Better. U.S. **Department of Energy** (DOE). 2024. Disponível em: https://www.energy.gov/eere/articles/wind-turbines-bigger-better. Acesso em: 20 jan. 2025.

ENERDATA – An Independent Research Company that Specialises in the Analysis and Forecasting of Energy and Climate Issues. **Total energy production**. 2024. Disponível em: https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-energy-production.html. Acesso em: 19 fev. 2024.

ENERGY INSTITUTE – Statistical Review of World Energy. 2025. **Energy Institute**. Disponível em: https://www.energyinst.org/statistical-review. Acesso em: 10 jun.2025.

EPA – U.S. Environmental Protection Agency. **Metal Mining Waste Management Trend**. 2024. TRI National Analysis. Disponível em: https://www.epa.gov/trinationalanalysis/metal-mining-waste-management-trend. Acesso em: 03 jul. 2024.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Caderno de Preços da Geração 2021**. Brasília, DF, Brasil: Ministério de Minas e Energia (MME), 2021. 72 p. Disponível em:

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.16108

https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/caderno-de-precos-da-geracao. Acesso em: 01 fev. 2024.

FOUQUET, Roger. Historical energy transitions: speed, prices and system transformation. **Energy Research & Social Science**, v. 22, p. 7-12, dez. 2016. http://doi.org/10.1016/j.erss.2016.08.014.

FRESLON, William Sacher; COONEY, Paul. Transnational Mining and Accumulation by Dispossession. *In*: COONEY, Paul; FRESLON, William Sacher (ed.). **Environmental Impacts of Transnational Corporations in the Global South**. Bingley (England): Emerald, 2018. p. 11-34. https://doi.org/10.1108/S0161-723020180000033002.

GAAG – Geoscience Australia (Australian Government). **Rare Earth Elements**. 2023. Disponível em: https://www.ga.gov.au/scientific-topics/minerals/mineral-resources-and-advice/australian-resource-reviews/rare-earth-elements. Acesso em: 04 set. 2024.

GANI, Azmat. Fossil fuel energy and environmental performance in an extended STIRPAT model. **Journal of Cleaner Production**, v. 297, p. 126526, maio 2021. http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126526.

GLOBAL WITNESS. **Fuelling the future, poisoning the present**: Myanmar's rare earth boom. 2024. Disponível em: https://www.globalwitness.org/en/campaigns/natural-resource-governance/fuelling-the-future-poisoning-the-present-myanmars-rare-earth-boom/. Acesso em: 16 set. 2024.

GLOBAL WITNESS. **Myanmar's poisoned mountains**: the toxic rare earth mining industry at the heart of the global green energy transition. 2022. Disponível em: https://www.globalwitness.org/en/campaigns/natural-resource-governance/myanmars-poisoned-mountains/. Acesso em: 16 set. 2024.

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.16108

GONÇALVES, Ricardo Junior de Assis Fernandes; MILANEZ, Bruno. Extrativismo Mineral, Conflitos e Resistências no Sul Global. **Sapiência**, Iporá, Brasil, v. 2, n. 8, p. 6-33, dez. 2019. Disponível em: https://www.revista.ueg.br/index.php/sapiencia/article/view/9810. Acesso em: 08 jul. 2024.

GOOGLE EARTH. Ferramentas de apresentação tridimensional do globo terrestre para criação de mapas. 2024. **Google Earth** (Google LLC). Disponível em: https://earth.google.com/web/. Acesso em: 29 jan. 2024.

GOOGLE. Google's 2024 Environmental Report. [S.L]: **Google**, 2024. 86 p. Disponível em: https://sustainability.google/reports/google-2024-environmental-report/e-2024-environmental-report.pdf. Acesso em: 18 dez. 2024.

GORENA, Tamara *et al.* Cupressus macrocarpa leaves for biomonitoring the environmental impact of an industrial complex: the case of puchuncaví-ventanas in chile. **Chemosphere**, v. 260, p. 127521, dez. 2020. http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127521.

HABERL, Helmut. The global socioeconomic energetic metabolism as a sustainability problem. **Energy**, v. 31, n. 1, p. 87-99, jan. 2006. http://doi.org/10.1016/j.energy.2004.04.045.

HILSON, Glvin; HASELIP, James. The environmental and socioeconomic performance of multinational mining companies in the developing world economy. **Minerals & Energy**, v. 19, n. 3, p. 25-47, set. 2004. http://doi.org/10.1080/14041040410027318.

ICA – International Copper Association. **Copper's Role in the Transition to a Low-Carbon Economy**. 2024. Disponível em: https://internationalcopper.org/. Acesso em: 19 ago. 2024.

IEA – International Energy Agency. **Energy Statistics Data Browser**: total energy supply (tes) by source, world 1990-2022. Total energy supply (TES) by source, World 1990-2022. 2023. World

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.16108

Energy Balances. Disponível em: https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser. Acesso em: 20 jan. 2024.

IEA – International Energy Agency. **Indonesia**: Coal. 2024. Disponível em: https://www.iea.org/countries/indonesia/coal. Acesso em: 15 jun. 2024.

IEA – International Energy Agency. **The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions**. Paris, França: IEA, 2021. 287 p. Disponível em: https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions. Acesso em: 01 fev. 2024.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2022: impacts, adaptation and vulnerability**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2022. 3056 p. https://doi.org/10.1017/9781009325844.

IRENA – International Renewable Energy Agency. **Critical Materials for The Energy Transition**. Abu Dhabi (Emirados Árabes Unidos): International Renewable Energy Agency (IRENA), 2021. 43 p. Disponível em: https://www.irena.org/Technical-Papers/Critical-Materials-For-The-Energy-Transition. Acesso em: 03 jan. 2024.

IRENA – International Renewable Energy Agency. **Solar energy**. 2024a. Disponível em: https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Solar-energy. Acesso em: 31 jan. 2024.

IRENA – International Renewable Energy Agency. **Wind energy**. 2024b. Disponível em: https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/wind-energy. Acesso em: 01 fev. 2024.

IRENA – International Renewable Energy Agency; CPI – Climate Policy Initiative. **Global landscape of renewable energy finance 2023**. Abu Dhabi (Emirados Árabes Unidos): International Renewable Energy Agency (IRENA), 2023. 24 p. Disponível em:

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.16108

https://www.irena.org/Publications/2023/Feb/Global-landscape-of-renewable-energy-finance-2023. Acesso em: 31 jan. 2024.

JENSEN, Paul D. *et al.* Highlighting the need to embed circular economy in low carbon infrastructure decommissioning: the case of offshore wind. **Sustainable Production and Consumption**, v. 24, p. 266-280, out. 2020. http://doi.org/10.1016/j.spc.2020.07.012.

JONG, Hans Nicholas. Indonesia's coal burning hits record high: and "green" nickel is largely why. **Mongabay**. 03 jul. 2023. Disponível em: https://news.mongabay.com/2023/07/indonesias-coal-burning-hits-record-high-and-green-nickel-is-largely-why/. Acesso em: 10 jul. 2024.

KHAN, Nasrullah *et al.* Energy transition from molecules to atoms and photons. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, v. 22, n. 1, p. 185-214, fev. 2019. http://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.05.002.

LIU, Pu; BARLOW, Claire. Wind turbine blade waste in 2050. **Waste Management**, v. 62, p. 229-240, abr. 2017. http://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.02.007.

LIU, Wenjuan; AGUSDINATA, Datu B. Interdependencies of lithium mining and communities sustainability in Salar de Atacama, Chile. **Journal Of Cleaner Production**, v. 260, p. 120838, jul. 2020. http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120838.

LIU, Wen-Shen *et al.* Water, sediment and agricultural soil contamination from an ion-adsorption rare earth mining area. **Chemosphere**, v. 216, p. 75-83, fev. 2019. http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.109.

MACONACHIE, Roy. Appalling conditions and poverty wages: the lives of cobalt miners in the DRC. **The Conversation**, 30 dez. 2024. Disponível em: https://theconversation.com/we-miners-die-a-

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.16108

lot-appalling-conditions-and-poverty-wages-the-lives-of-cobalt-miners-in-the-drc-220986. Acesso em: 01 jun. 2025.

MANCINI, Lucia; SALA, Serenella. Social impact assessment in the mining sector: review and comparison of indicators frameworks. **Resources Policy**, v. 57, p. 98-111, ago. 2018. http://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.02.002.

MASSOUD, Mahmoud *et al.* Review on recycling energy resources and sustainability. **Heliyon**, v. 9, n. 4, p. 1-17, abr. 2023. http://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15107.

MAZZIERI, Alberto; MONTANARI, Ambra. Surviving the white gold rush – life in the 'lithium triangle'. **Al Jazeera**, 16 mar. 2024. Disponível em: https://www.aljazeera.com/features/longform/2024/3/16/surviving-the-white-gold-rush-life-in-south-americas-lithium-triangle-2. Acesso em: 15 ago. 2024.

MILANEZ, Bruno. **Crise climática, extração de minerais críticos e seus efeitos para o Brasil**. Brasília: Diálogo dos Povos, Sinfrajupe, Movimento pela Soberania Popular na Mineração (MAM), 2021. Disponível em: https://www.ufjf.br/poemas/files/2014/07/Milanez-2021-Crise-climática-extração-de-minerais-críticos.pdf. Acesso em: 09 abr. 2024.

MILANEZ, Bruno; FELIPPE, Miguel Fernandes (org.). **Minas esgotada**: antecedentes e impactos do desastre da Vale na Bacia do Paraopeba. Juiz de Fora: Editora UFJF, 2021.

MILESI, Orlando. Smelter finally closes due to extreme pollution in chilean bay. **Inter Press Service**, 4 jul. 2022. Disponível em: https://www.ipsnews.net/2022/07/smelter-finally-closes-due-extreme-pollution-chilean-bay. Acesso em: 18 ago. 2024.

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.16108

NAING, Anug. 30 people missing in mine landslide in Kachin State. **Myanmar Now**, 21 jun. 2024. Disponível em: https://myanmar-now.org/en/news/30-people-missing-in-mine-landslide-in-kachin-state/. Acesso em: 17 set. 2024.

POEMAS – Grupo Política, Economia, Mineração, Ambiente e Sociedade. Antes fosse mais leve a carga: avaliação dos aspectos econômicos, políticos e sociais do desastre da Samarco/Vale/BHP em Mariana (MG). Relatório final. Juiz de Fora: **PoEMAS**, 2015. Disponível em: https://www.ufjf.br/poemas/files/2014/07/PoEMAS-2015-Antes-fosse-mais-leve-a-carga-versão-final.pdf. Acesso em: 15 out. 2024.

QI, Liqiang; ZHANG, Yajuan. Effects of solar photovoltaic technology on the environment in China. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 28, p. 22133-22142, 31 ago. 2017. http://doi.org/10.1007/s11356-017-9987-0.

RAID – Rights and Accountability in Development; AFREWATCH – African Resources Watch. **Beneath the Green**: a critical look at the environmental and human costs of industrial cobalt mining in DRC. Online: RAID, 2024. 114 p. Disponível em: https://raid-uk.org/post-library/report-beneath-the-green/. Acesso em: 31 maio 2024.

SAWAL, Rabul. Red seas and no fish: Nickel mining takes its toll on Indonesia's spice islands. **Mongabay**, 16 fev. 2022. Disponível em: https://news.mongabay.com/2022/02/red-seas-and-no-fish-nickel-mining-takes-its-toll-on-indonesias-spice-islands/. Acesso em: 12 jul. 2024.

SHAH, Kashish. **India's utility-scale solar parks a global success story**. Lakewood, OH, US: Institute for Energy Economics and Financial Analysis (IEEFA), 2020. 14 p. Disponível em: https://ieefa.org/sites/default/files/2022-08/Indias-Utility-Scale-Solar-Parks-Success-Story_May-2020.pdf. Acesso em: 30 jan. 2024.

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.16108

SOVACOOL, Bejamin *et al.* Sustainable minerals and metals for a low-carbon future. **Science**, v. 367, n. 6473, p. 30-33, 03 jan. 2020. American Association for the Advancement of Science (AAAS). http://doi.org/10.1126/science.aaz6003.

SP ENERGY – SB Energy Announces Commercial Operation of American-made Solar Projects to Help Power Google Data Centers. 2024. Disponível em: https://sbenergy.com/american-made-solar-projects-power-google-data/. Acesso em: 20 dez. 2024.

STACCIARINI, João Henrique Santana; GONÇALVES, Ricardo Junior de Assis Fernandes. Data Centers, Minerais Críticos, Energia e Geopolítica: as bases da inteligência artificial. **Sociedade & Natureza**, v. 37, n. 1, jun. 2025a. http://doi.org/10.14393/sn-v37-2025-77215.

STACCIARINI, João Henrique Santana; GONÇALVES, Ricardo Junior de Assis Fernandes. Transição Energética e Mineração no Sul Global. **Mercator**, v. 24, jun. 2025b. https://doi.org/10.4215/rm2025.e24009.

STANDAERT, Michael. China wrestles with the toxic aftermath of rare earth mining. **Yale Environment 360**, 02 jul. 2019. Disponível em: https://e360.yale.edu/features/china-wrestles-with-the-toxic-aftermath-of-rare-earth-mining. Acesso em: 16 set. 2024.

STATISTA. **Average installed cost for solar photovoltaics worldwide from 2010 to 2022**. 2023a. Disponível em: https://www.statista.com/statistics/809796/. Acesso em: 30 jan. 2024.

STATISTA. **Distribution of cobalt demand worldwide in 2022, by application**. 2024a. Disponível em: https://www.statista.com/statistics/1143399/global-cobalt-consumption-distribution-by-application/. Acesso em: 31 maio 2024.

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.16108

STATISTA. **Distribution of mine production of copper worldwide in 2022, by country**. 2024b. Disponível em: https://www.statista.com/statistics/605533/distribution-of-global-copper-mine-production-by-select-country/. Acesso em: 19 ago. 2024.

STATISTA. **Distribution of mine production of nickel worldwide in 2022, by country**. 2024c. Disponível em: https://www.statista.com/statistics/603621/global-distribution-of-nickel-mine-production-by-select-country/. Acesso em: 12 ago. 2024.

STATISTA. **Distribution of rare earths production worldwide as of 2023, by country**. 2024d. Disponível em: https://www.statista.com/statistics/270277/mining-of-rare-earths-by-country/. Acesso em: 15 ago. 2024.

STATISTA. **Estimated plug-in electric light vehicle sales worldwide from 2015 to 2022**. 2023b. Disponível em: https://www.statista.com/statistics/665774/global-sales-of-plug-in-light-vehicles/. Acesso em: 08 fev. 2024.

STATISTA. **Global lithium industry – statistics & facts**. 2024e. Disponível em: https://www.statista.com/topics/3217/lithium/. Acesso em: 09 jul. 2024.

STATISTA. **Lifespan of low-carbon energy sources and power plants worldwide by type**. 2023c. Disponível em: https://www.statista.com/statistics/1264727/. Acesso em: 05 fev. 2024.

STATISTA. **Major countries in worldwide nickel mine production in 2023**. 2024f. Disponível em: https://www.statista.com/statistics/264642/nickel-mine-production-by-country/. Acesso em: 08 jul. 2024.

STATISTA. **Mine production of copper worldwide from 2010 to 2023**. 2024g. Disponível em: https://www.statista.com/statistics/254839/copper-production-by-country/. Acesso em: 10 jul. 2024.

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.16108

STATISTA. **Rare earths mine production in Myanmar 2018-2023**. 2024h. Disponível em: https://www.statista.com/statistics/1294383/. Acesso em: 09 jul. 2024.

SVAMPA, Maristella. **Las fronteras del neoextractivismo en América Latina**. Cidade do México/México: CALAS, 2019.

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change. **The Paris Declaration on Electro-Mobility and Climate Change and Call to Action**. Lima – Paris: United Nations, 2015. Disponível em: https://unfccc.int/media/521376/paris-electro-mobility-declaration.pdf. Acesso em: 08 fev. 2023.

USGS – United States Geological Survey. **Cobalt**: data in metric tons, cobalt content, unless otherwise specified. [S.L.]: USGS Publications, 2024. 2 p. Mineral Commodity Summaries. Disponível em: https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024-cobalt.pdf. Acesso em: 22 ago. 2024.

VALDES-DAPENA, Peter. Why electric cars are so much heavier than regular cars. **CNN**: Business, 07 jun. 2021. Disponível em: https://edition.cnn.com/2021/06/07/business/electric-vehicles-weight. Acesso em: 01 maio 2024.

VAN ZALK, John; BEHRENS, Paul. The spatial extent of renewable and non-renewable power generation: a review and meta-analysis of power densities and their application in the U.S. **Energy Policy**, v. 123, p. 83-91, dez. 2018. http://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.023.

VATTENFALL. **Hollandse Kust Zuid Wind Farm**. 2024. Disponível em: https://hollandsekust.vattenfall.nl/en/. Acesso em: 02 fev. 2024.

WATARI, Takuma *et al.* Total material requirement for the global energy transition to 2050: a focus on transport and electricity. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 148, p. 91-103, set. 2019. http://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.05.015.

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.16108

WB – World Bank. **Minerals for Climate Action: the mineral intensity of the clean energy transition.** Washington, DC, USA: World Bank Publications, 2020. 112 p. Elaborated by: K. Hund, D. Porta, T. Fabregas, T. Laing and J. Drexhage. Disponível em: https://pubdocs.worldbank.org/en/961711588875536384/Minerals-for-Climate-Action-The-Mineral-Intensity-of-the-Clean-Energy-Transition.pdf. Acesso em: 23 jan. 2024.

WELSCH, Chris. As the world goes digital, datacenters that make the cloud work look to renewable energy sources. **Microsoft**, nov. 2022. Disponível em: https://news.microsoft.com/source/emea/features/as-the-world-goes-digital-datacenters-that-make-the-cloud-work-look-to-renewable-energy-sources/. Acesso em: 21 dez. 2024.

WILLIAMS, Georgia. Top 9 Lithium-producing Countries: updated 2024. **Nasdaq**, 05 maio 2024. Disponível em: https://www.nasdaq.com/articles/top-9-lithium-producing-countries-updated-2024. Acesso em: 09 ago. 2024.

YORK, Richard; BELL, Shannon. Energy transitions or additions? **Energy Research & Social Science**, v. 51, p. 40-43, maio 2019. http://doi.org/10.1016/j.erss.2019.01.008.

ZANETTA-COLOMBO, Nicolás C. *et al.* Impact of mining on the metal content of dust in indigenous villages of northern Chile. **Environment International**, v. 169, p. 107490, nov. 2022. http://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107490.

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.16108

Contribuição de autoria:

João Henrique Santana Stacciarini: conceitualização, curadoria, pesquisa, metodologia, redação original e revisão e edição final do manuscrito.

Ricardo Junior de Assis Fernandes Gonçalves: conceitualização, curadoria, pesquisa, metodologia, redação original e revisão e edição final do manuscrito.

Ambos os autores participaram de todas as etapas do processo de pesquisa, elaboração e redação deste artigo científico.

Ambos os autores declaram ter participado de todas as etapas do processo: conceitualização, curadoria, pesquisa, metodologia, redação original e revisão e edição final do manuscrito.

Declaração de uso de IA

Não houve utilização de ferramentas de Inteligência Artificial.

Declaração de conflito de interesse:

O autor declara que não há conflito de interesse.

Declaração de disponibilidade de dados:

Todo o conjunto de dados de apoio aos resultados deste estudo foi publicado no próprio artigo.

Este preprint foi submetido sob as seguintes condições:

- Os autores declaram que os necessários Termos de Consentimento Livre e Esclarecido de participantes ou pacientes na pesquisa foram obtidos e estão descritos no manuscrito, quando aplicável.
- Os autores declaram que a elaboração do manuscrito seguiu as normas éticas de comunicação científica.
- Os autores declaram que estão cientes que são os únicos responsáveis pelo conteúdo do preprint e que o depósito no SciELO Preprints não significa nenhum compromisso de parte do SciELO, exceto sua preservação e disseminação.
- Os autores declaram que os dados, aplicativos e outros conteúdos subjacentes ao manuscrito estão referenciados.
- O manuscrito depositado está no formato PDF.
- Os autores declaram que a pesquisa que deu origem ao manuscrito seguiu as boas práticas éticas e que as necessárias aprovações de comitês de ética de pesquisa, quando aplicável, estão descritas no manuscrito.
- Os autores declaram que uma vez que um manuscrito é postado no servidor SciELO Preprints, o mesmo só poderá ser retirado mediante pedido à Secretaria Editorial do SciELO Preprints, que afixará um aviso de retratação no seu lugar.
- Os autores concordam que o manuscrito aprovado será disponibilizado sob licença Creative Commons CC-BY.
- O autor submissor declara que as contribuições de todos os autores e declaração de conflito de interesses estão incluídas de maneira explícita e em seções específicas do manuscrito.
- Os autores declaram que o manuscrito não foi depositado e/ou disponibilizado previamente em outro servidor de preprints ou publicado em um periódico.
- Caso o manuscrito esteja em processo de avaliação ou sendo preparado para publicação mas ainda não publicado por um periódico, os autores declaram que receberam autorização do periódico para realizar este depósito.
- O autor submissor declara que todos os autores do manuscrito concordam com a submissão ao SciELO Preprints.