

O paradoxo do lítio: uma análise crítica da sustentabilidade do ciclo de vida de baterias na transição energética

Iara Ferreira Braga* e Fernando Paiva Scardua

Universidade de Brasília. Centro de Estudos Avançados Multidisciplinares. Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento, Sociedade e Cooperação Internacional. *Campus* Darcy Ribeiro. Asa Norte, Brasília-DF (CEP 70910-900).
*E-mail: iara.fb@outlook.com.

Resumo. O presente estudo visa a analisar criticamente se o benefício da descarbonização proporcionado pelas baterias de íon-lítio na transição energética compensa o impacto ambiental causado ao longo de todo o seu ciclo de vida. A urgência da crise climática e a alta emissão do setor de energia impulsionam a eletrificação e o aumento exponencial da demanda por minerais críticos, como o lítio. A abordagem metodológica adotada é a análise qualitativa, ancorada em revisão bibliográfica crítica e análise documental de políticas e evidências de análise do ciclo de vida. Os resultados consolidam o lítio como mineral crítico devido à sua vulnerabilidade geopolítica e a divergência das estratégias globais: a União Europeia foca em regulação e mandatos ambientais, os Estados Unidos priorizam incentivos financeiros e autonomia industrial, e a China adota o controle industrial centralizado via sistema de rastreabilidade. A discussão estabelece um paradoxo de sustentabilidade: a mitigação do gás carbônico na fase de uso é confrontada pela pegada ambiental na fase de produção e no final do ciclo de uso da bateria. Este deslocamento ocorre porque a produção gera uma “dívida de carbono” e agrava indicadores de toxicidade, e a reciclagem não fecha o ciclo eficientemente, com a taxa de recuperação de lítio inferior a 1% devido à ineficiência tecnológica e à baixa atratividade econômica. Conclui-se que o benefício líquido da transição energética só será integralmente alcançado se as políticas de gestão assegurarem, por meio de mandato legal e tecnológico, a descarbonização da matriz energética da produção e a recuperação e reuso de minerais em larga escala, superando as barreiras do descarte.

Palavras-chave: Lítio; Minerais críticos; Transição energética; Economia circular.

Abstract. *The lithium paradox: A critical analysis of the sustainability of battery life cycle in the energy transition.* The present study aims to critically assess whether the

Recebido
06/01/2026

Aceito
25/03/2026

Publicado
30/04/2026



Acesso aberto



ORCID

0009-0006-6375-0345
Iara Ferreira Braga

0000-0003-4949-3283
Fernando Paiva Scardua

decarbonization benefit provided by lithium-ion batteries in the energy transition outweighs the environmental impact generated throughout their entire life cycle. The urgency of the climate crisis and the high emissions of the energy sector drive electrification and the exponential increase in demand for critical minerals, such as lithium. The methodological approach adopted is qualitative analysis, grounded in a critical literature review and document analysis of policies and life-cycle-assessment evidence. The results consolidate lithium as a critical mineral due to its geopolitical vulnerability and the divergence of global strategies: the European Union focuses on regulation and environmental mandates, the United States prioritizes financial incentives and industrial autonomy, and China adopts centralized industrial control through a traceability system. The discussion establishes a sustainability paradox: the mitigation of carbon dioxide in the use phase is confronted by the environmental footprint in the production phase and at the end of the battery's life cycle. This displacement occurs because production generates a "carbon debt" and worsens toxicity indicators, and recycling does not efficiently close the loop, with lithium recovery rates below 1% due to technological inefficiency and low economic attractiveness. It is concluded that the net benefit of the energy transition will only be fully achieved if management policies ensure, through legal and technological mandates, the decarbonization of the energy mix in production and the large-scale recovery and reuse of minerals, overcoming the barriers of disposal.

Keywords: Lithium; Critical raw materials; Energy transition; Circular economy.

Introdução

A mudança climática se apresenta como uma das preocupações mais urgentes do século XXI, tendo em vista sua ameaça iminente ao meio ambiente, à sociedade e à economia. Para combater essa crise, em 2015, foi pactuado o Acordo de Paris sobre o Clima, um tratado internacional com o objetivo de limitar o aquecimento global a 1,5° C-2 °C, pavimentando o caminho para um futuro de baixo carbono. O tratado possui 195 signatários e foi firmado no âmbito da Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, de 2015, chamada COP21 (UNFCCC, 2017).

A transição energética é considerada parte crucial nas ações para alcançar o objetivo proposto no acordo. Dados da plataforma ClimateWatch (2022) apontam que o setor de energia foi responsável por 76% das emissões de gases de efeito estufa (GEE), em 2022. As emissões de dióxido de carbono (CO₂) correspondem a 74% de todas as emissões de GEE, sendo 92% advindas de combustíveis fósseis (Ge et al., 2024).

Para reverter esse quadro de emissões do setor de energia, o uso de fontes alternativas, como a solar e a eólica, é imperativo. Porém, essas fontes de energia possuem natureza intermitente, exigindo soluções de armazenamento.

Nesse cenário, as baterias de íon-lítio emergem. A Agência Internacional de Energia (IEA) aponta que a demanda por lítio crescerá pelo menos 40 vezes no cenário de desenvolvimento sustentável até 2040, impulsionada pelo aumento de pelo menos 30

vezes na procura mineral para veículos elétricos e armazenamento de energia em baterias (IEA, 2021).

Com o aumento exponencial na demanda buscando a transição energética, o lítio, antes usado em cerâmicas, lubrificantes e produtos farmacêuticos, tornou-se um mineral crítico. Um estudo da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA) e do Instituto Norueguês de Relações Internacionais (NUPI) analisou 35 listas de minerais críticos para aplicação em energias renováveis e constatou que o lítio aparece em 26 delas, sendo um dos minerais mais frequentemente classificado como “crítico” (IRENA, 2024).

Não há um consenso propriamente dito sobre a definição de criticidade, mas há concordâncias na literatura em pontos subjetivos. Erdmann e Graedel (2011) colocam a avaliação da criticidade mineral por meio de três principais categorias metodológicas apresentadas em estudos sobre risco de oferta: matrizes de criticidade, índices de criticidade e análises de cenários ou séries temporais.

O Conselho Nacional de Pesquisa Americano (National Research Council, 2008) apresentou uma matriz de criticidade mensurada pelo risco de oferta e o impacto de restrições na oferta. Seguindo a mesma linha, Gloser et al. (2015) demonstram que uma matriz de duas dimensões pode determinar a criticidade de um mineral colocando em um eixo o risco de oferta, e no outro a vulnerabilidade, também sendo expressa como o cruzamento da probabilidade de disrupções na cadeia de suprimentos e as consequências econômicas.

Convergências em estudos acabam por apontar para uma definição comum de criticidade ligada ao risco de disrupção na oferta e a importância das matérias-primas para a economia, onde as dimensões econômicas e geopolíticas sobressaem restrições físicas de reserva (Erdmann e Graedel, 2011).

Em síntese, os minerais críticos são aqueles considerados essenciais para o desenvolvimento econômico de uma nação e o funcionamento pleno das suas linhas de produção, onde há riscos devido a fatores como a escassez, as regulações comerciais, as dinâmicas geopolíticas, entre outros (Castro et al., 2022).

Apesar das baterias de íon-lítio serem apontadas como uma das soluções tecnológicas para atingir os abjetivos climáticos (fonte), concentra-se muito nos benefícios da redução das emissões de dióxido carbono durante a fase do uso da eletrificação. No entanto, é essencial levar em consideração o ciclo de vida completo dos componentes utilizados.

O uso exacerbado do lítio e de outros minerais traz apreensões sobre a sustentabilidade da extração, o consumo energético da produção e, substancialmente, as práticas de descarte e reciclagem no fim do ciclo de vida (Kilavuz, 2025).

Esse panorama nos coloca diante de um paradoxo de sustentabilidade: as tecnologias desenvolvidas de fato contribuem para a transição energética e, consequentemente, para a mitigação da crise climática apesar de gerarem novos desafios ambientais e de recursos ao longo do seu ciclo de vida?

Nesse contexto, esse estudo visa a analisar de forma crítica se o benefício da descarbonização proporcionado pelas baterias de lítio compensa o impacto causado ao longo de todo o seu ciclo de vida, avaliando estratégias de gestão e reciclagem para garantir uma transição energética efetivamente sustentável.

Metodologia

Essa análise fez uso de uma abordagem qualitativa, ancorada em uma revisão bibliográfica crítica e análise documental. A abordagem qualitativa foi escolhida em virtude da sua capacidade de oferecer uma compreensão acurada da transição energética e seus paradoxos, tornando possível a análise crítica do ciclo de vida das baterias de lítio em virtude das estratégias de gestão e reciclagem aplicadas por atores globais.

As informações foram coletadas por intermédio da base do *ScienceDirect*, *ResearchGate* e de portais de relatórios institucionais, como a IEA, a Comissão Europeia e a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos. A busca concentrou-se em publicações e documentos divulgados entre 2015 e 2025, para a obtenção de dados mais recentes, com pesquisas acerca de definição de conceitos sendo datadas de 2008 em diante. Foram utilizados como descritores de busca termos como: minerais críticos, lítio, transição energética, análise do ciclo de vida, reciclagem de baterias, entre outros, tanto em inglês, quanto em português.

Foi adotado um processo de seleção de documentos através da leitura dos títulos e dos resumos. Assim foram selecionados os documentos para leitura com a finalidade de extração de definições de criticidade, pilares das estratégias nacionais e impactos ambientais. Desse modo, buscou-se reconhecer convergências e divergências entre as estratégias colocá-las em confronto com os impactos do ciclo de vida.

A metodologia aplicada garantiu que a pesquisa se fundamentasse em bases sólidas, contribuindo para ampliar as reflexões sobre o paradoxo da sustentabilidade na transição energética.

Resultados e discussão

As análises documental e bibliográfica apontaram informações interrelacionadas que sustentam a discussão crítica acerca do ciclo de vida do lítio. Temos o lítio consolidado como mineral crítico e as divergências estratégicas no âmbito da geopolítica para garantir a segurança da oferta e a gestão sustentável dos resíduos.

A revisão das abordagens de criticidade (Erdmann e Graedel, 2011; Gloser et al., 2015) traz a matriz de dois eixos como ponto dominante, onde tem-se o risco de disrupção na oferta (geopolítico ou geográfico) e o impacto de restrições na economia. Portanto, o lítio se encaixa como crítico não por escassez física de reservas (Gardiner et al., 2024), mas sim por sua robusta importância na transição energética e concentração geográfica elevada, o que torna sua cadeia de suprimento vulnerável com potenciais consequências econômicas (IEA, 2021).

O lítio, que aparece em 26 das 35 listas de minerais críticos analisadas pela IRENA (2024), simboliza a nova era dos recursos estratégicos. Seu *status* consistente como mineral crítico traz à tona competições geopolíticas e o desenvolvimento de políticas locais, focadas tanto na garantia do suprimento da demanda, quanto na gestão ambiental do recurso, que também é ligado a questões de segurança e soberania (Eyselein e Dorne, 2025).

Diferentes atores globais apresentam estratégias para alcançar a segurança do suprimento e garantir a economia circular. A União Europeia tem como pilar estratégico a regulação e o mandato ambiental. Em 2023 foi implementado o Regulamento EU nº 1542/2023 (EU, 2023), que estabelece metas compulsórias de coleta e eficiência de recuperação de resíduos materiais, estabelecendo metas de conteúdo reciclado em baterias (*battery regulation*). As baterias que contêm lítio deverão ter pelo menos 6% do seu conteúdo reciclado a partir de agosto de 2031, vigorando até 2036, quando a meta passa a ser 12%.

Já a estratégia dos Estados Unidos está concentrada primariamente em incentivos financeiros e segurança econômica em busca da autonomia doméstica na cadeia de suprimentos de lítio. Essa estratégia é impulsionada por legislação como o *Bipartisan Infrastructure Law (BIL)* (The White House, 2024) e o *Inflation Reduction Act* (IRS, 2022). Onde os *Internal Revenue Services* (IRS) faz uso do estímulo à demanda por veículos elétricos e de requisitos de conteúdo mineral doméstico ou de países aliados, oferecendo crédito aos consumidores, e a *BIL* atua na promoção da indústria nacional alocando verba

em fundos voltados para o desenvolvimento da capacidade industrial e de tecnologias de reciclagem.

A estratégia da China foca na rastreabilidade do ciclo de vida e na responsabilidade estendida do produtor através do controle industrial centralizado. O país, na sua posição de líder da indústria de veículos elétricos, implementou um sistema de rastreabilidade, em 2018, para monitorar todo o ciclo de vida do material, desde sua produção até sua recuperação. Esse sistema estabelece codificação de baterias e abrange o reuso e reciclagem de materiais em busca de otimizar a economia circular (Pan, 2024; Xu et al., 2024).

O cenário apresentado demonstra que, apesar de grandes atores globais terem estabelecido mecanismos robustos de controle (China), regulamentação (União Europeia) e investimento (EUA), com foco na reciclagem e na busca da economia circular, o sucesso dessas estratégias não mitiga o impacto ambiental concentrado na fase inicial do ciclo de vida do lítio. A divergência na gestão de recursos com a uniformidade da alta demanda global por lítio encaminha para a discussão crítica sobre se os benefícios da descarbonização através da transição energética com uso de baterias de lítio verdadeiramente compensam a degradação ambiental por recursos e a ineficiência do fechamento do ciclo do mineral.

Voltando ao paradoxo da sustentabilidade da transição energética, onde a mitigação das emissões de CO₂ na fase de uso é confrontada pela geração de novos desafios ambientais e de recursos, porém nas fases iniciais e finais do ciclo de vida das baterias de íon-lítio. Deve-se cruzar as informações das estratégias de gestão com evidências de análises do ciclo de vida (ACV) para avaliar a contribuição líquida dessas tecnologias para uma sustentabilidade efetiva (Wang e Tang, 2022).

O principal argumento que sustenta o paradoxo apresentado é a dissociação entre o benefício do CO₂ na fase de uso e a pegada ambiental na fase de produção e no final do ciclo. Estudos de ACV indicam que o momento de maior pegada de carbono de uma bateria de íon-lítio é na fase de produção de materiais e das células para a bateria (Ellingsen et al., 2017; Wang e Tang, 2022).

As emissões de GEE relacionadas à produção de baterias de íon-lítio variam de acordo com a demanda energética na produção das células e montagem do *pack* (conjunto de células de lítio que resultam na bateria) e com a matriz energética utilizada no processo, apontam Ellingsen et al. (2017). Mesmo com essa variação, Wang e Tang (2022) consideram que o impacto de CO₂ na fase de produção de veículos elétricos é sempre maior do que o dos veículos a combustão. Adicionalmente, a mineração de lítio gera uma alta pegada de GEE, além de utilizar uma quantidade significativa de recursos hídricos (Zackrisson et al., 2016).

Ainda que os veículos elétricos sejam promovidos como soluções de emissão zero, a sua eficácia na mitigação da poluição é complexa, uma vez que as emissões de rodagem se transferem para a fase de geração de energia. Observa-se um impacto crítico da matriz energética regional sobre o benefício ambiental líquido dos veículos elétricos. Além disso, estudos apontam que a fabricação de novas baterias e o gerenciamento de baterias em fim de vida representam fontes significativas de poluição. Portanto, a avaliação do uso de veículos elétricos para atingir metas socioambientais deve ter uma perspectiva de todo o ciclo de vida, e não apenas da fase de uso do veículo (Wang e Tang, 2022).

Ainda que a reciclagem de baterias seja crucial, a taxa de recuperação de lítio nesse processo é de menos de 1%, apontam Yoo et al. (2018). Esse baixo retorno indica que a reciclagem de baterias não ocorrerá, a não ser que seja legalmente imposta (Wang et al., 2024), que vai de encontro à abordagem regulatória da União Europeia e ao sistema de rastreabilidade da China.

O investimento em infraestrutura e novas tecnologias, como o realizado pelos EUA, é essencial, porém, a transição energética só será sustentável quando a recuperação de minerais críticos for viável econômica e tecnologicamente, diminuindo a dependência de mineração primária. Sem uma recuperação eficiente dos recursos, o paradoxo do lítio permanece como um problema, onde a solução para a crise climática aprofunda a crise de recursos.

Conclusão

Com base na análise das fases poluentes do ciclo de vida das baterias e das estratégias de gestão de recursos de grandes atores globais, conclui-se que a transição energética está sujeita a um paradoxo de sustentabilidade. Ainda que a eletrificação reduza as emissões de dióxido de carbono na fase de uso, esse benefício é colocado em xeque quando se leva em consideração os impactos ambientais das baterias na fase de produção e fim de vida.

As estratégias de economia circular de grandes atores globais, implementadas por meio de controle industrial (China), regulamentação (UE) e investimento (EUA), reconhecem o lítio como mineral crítico e sua necessidade de mitigação do risco de suprimento. Entretanto, a baixa atratividade econômica devido a ineficiência tecnológica na recuperação de lítio (taxa inferior a 1%) entravam o fechamento efetivo do ciclo de vida desses materiais de forma sustentável.

O benefício da descarbonização proporcionado pelas baterias de íon-lítio apenas será integralmente alcançado com políticas de gestão de recursos voltadas também para a descarbonização de toda a matriz energética da produção e por um mandato legal e tecnológico que assegure a recuperação e reúso de minerais e materiais em larga escala.

Foi constatado, então, que a superação das barreiras do descarte se coloca como desafio final para a gestão ambiental do lítio, sendo essencial o desenvolvimento de modelos de rastreabilidade e reciclagem mais eficientes.

Conflitos de interesses

Os autores declaram não haver interesses concorrentes ou relações pessoais conhecidas que possam ter influenciado as inferências relatadas neste artigo.

Referências

Castro, F. F.; Peiter, C. C.; Góes, G. S. **Minerais estratégicos e críticos: uma visão internacional e da política mineral brasileira**. Brasília: IPEA, 2022. (Texto para discussão, 2768).

ClimateWatch. **Historical GHG emissions**. ClimateWatch, 2022. Disponível em: <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?apcid=00000000000000000000000000000000&breakBy=sector&chartType=percentage&end_year=2022&start_year=1990>. Acesso em: 22 nov. 2025.

Ellingsen, L. A.-W.; Hung, C. R.; Strømman, A. H. Identifying key assumptions and differences in life cycle assessment studies of lithium-ion traction batteries with focus on greenhouse gas emissions. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 55, p. 82-90, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.06.028>

Erdmann, L.; Graedel, T. E. Criticality of non-fuel minerals: A review of major approaches and analyses. **Environmental Science & Technology**, v. 45, n. 18, p. 7620-7630, 2011. <https://doi.org/10.1021/es200563g>

EU - European Union. **Regulation (EU) 2023/1542 of the European parliament and of the Council of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC (Text with EEA relevance)**. Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1542>>. Acesso em: 21 nov. 2025.

Eyselein, G.; Dorn, F. M. Making critical raw materials from a multi-scalar perspective: The case of lithium in the European Union. **Geoforum**, v. 167, 104469, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2025.104469>

Gardiner, N. J.; Jowitt S. M.; Sykes J. P. Lithium: Critical, or not so critical? **Geoenergy**, v. 2, 2024. <https://doi.org/10.1144/geoenergy2023-045>

Ge, M.; Friedrich, J.; Vigna, L. **Where do emissions come from?** 4 charts explain greenhouse gas emissions by sector. Washington: World Resources Institute, 2024. Disponível em: <<https://www.wri.org/insights/4-charts-explain-greenhouse-gas-emissions-countries-and-sectors>>. Acesso em: 22 nov. 2025.

IEA - International Energy Agency. **The role of critical minerals in clean energy transitions**. Paris: IEA, 2021. Disponível em: <<https://iea.blob.core.windows.net/assets/ffd2a83b-8c30-4e9d-980a-52b6d9a86fdc/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2025.

IRENA - International Renewable Energy Agency. **Constructig a ranking of critical materials for the global energy transition**. Abu Dhabi: IRENA, 2024. Disponível em: <<https://www.irena.org/Publications/2024/Oct/Constructing-a-ranking-of-critical-materials-for-the-global-energy-transition>>. Acesso em: 20 nov. 2025.

IRS - Internal Revenue Services. **Inflation Reduction Act of 2022**. Charlotte: IRS, 2022. Disponível em: <<https://www.irs.gov/inflation-reduction-act-of-2022>>. Acesso em: 21 nov. 2025.

Kilavuz, E. Sustainable lithium-ion battery recycling: Challenges, innovations, and pathways to a circular economy. **ACS Sustainable Resource Management**, v. 10, p. 1838-1858, 2025. <https://doi.org/10.1021/acssusresmgt.5c00408>

National Research Council. **Minerals, critical minerals, and the U.S. economy**. Washington, DC: The National Academies Press, 2008.

Pan, W. **Chinese policy activities with respect to battery sustainability and battery ID**. Geneva: United Nations Economic Commission for Europe, 2024. (WP.29/GRPE - Working Party on Pollution and Energy; 91st session). Disponível em: <https://unece.org/sites/default/files/2024-10/1_China.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2025.

The White House. **A guidebook to the bipartisan infrastructure law**. The White House, 2024. Disponível em: <<https://bidenwhitehouse.archives.gov/build/guidebook/>>. Acesso em: 21 nov. 2025.

UNFCCC - United Nations Climate Change. **The Paris Agreement**. UNFCCC, 2017. Disponível em: <<https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>>. Acesso em: 22 nov. 2025.

Wang, N.; Tang, G. A review on environmental efficiency evaluation of new energy vehicles using life cycle analysis. **Sustainability**, v. 14, n. 6, 3371, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14063371>

Wang, P.; Cheng, M.; Wang, X. Analysis and reflection on the strategy benchmarking of power battery management in China and Europe. **Journal of Industry and Engineering Management**, v. 2, p. 70-74, 2024. <https://doi.org/10.62517/jiem.202403212>

Xu, Z.; Chang, X.; Zhang, N. An analysis of China's power battery industry policy for new energy vehicles from a product life cycle perspective. **Environment Development and Sustainability**, v. 27, n. 6, p. 13093-13115, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-04405-4>

Yoo E.; Lee U.; Kelly J. C.; Wang, M. Life-cycle analysis of battery metal recycling with lithium recovery from a spent lithium-ion battery. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 196, 107040, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107040>

Zackrisson, M.; Fransson, K.; Hildenbrand, J.; Lampic, G.; O'Dwyer, C. Life cycle assessment of lithium-air battery cells. **Journal of Cleaner Production**, v. 135, p. 299-311, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.104>



Informação da Licença: Este é um artigo Open Access distribuído sob os termos da Licença Creative Commons Attribution, que permite uso irrestrito, distribuição e reprodução em qualquer meio, desde que a obra original seja devidamente citada.