



Desenvolvimento de tecnologia para a recuperação de lítio residual a partir dos resíduos de seu processamento

Alexandre Sylvio Vieira da Costa

Professor Doutor, UFVJM, Brasil

alexandre.costa@ufvjm.edu.br

ORCID 0000-0001-7251-7816

Alexssander Ferreira de Sousa

Mestre, UFVJM, Brasil

alexssander.sousa@ufvjm.edu.br

ORCID 0009-0008-1921-3969

Nubia Aparecida de Aguiar

Mestre, UFVJM, Brasil

nubia.aparecida@ufvjm.edu.br

ORCID 0000-0001-5452-940X

Tales Ceniro Campos

Mestrando, UFVJM, Brasil

tales.campos@ufvjm.edu.br

ORCID 0009-0001-9555-2718

Elton Santos Franco

Professor Doutor, UFVJM, Brasil

elton.santos@ufvjm.edu.br

ORCID 0000-0001-5296-4790

Submissão: 02/02/2025

Aceite: 24/03/2025

COSTA, Alexandre Sylvio Vieira da; SOUSA, Alexssander Ferreira de; AGUILAR, Nubia Aparecida de; CAMPOS, Tales Ceniro; FRANCO, Elton Santos. Desenvolvimento de tecnologia para a recuperação de lítio residual a partir dos resíduos de seu processamento. *Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista*, [S. l.], v. 21, n. 1, 2025.

DOI: [10.17271/1980082721120255588](https://doi.org/10.17271/1980082721120255588). Disponível

em: https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/forum_ambiental/article/view/5588

Licença de Atribuição CC BY do Creative Commons

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Desenvolvimento de tecnologia para a recuperação de lítio residual a partir dos resíduos de seu processamento

RESUMO

Objetivo - Desenvolver uma tecnologia sustentável e eficiente para a recuperação de lítio residual a partir dos resíduos gerados durante seu processamento, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais e a otimização do aproveitamento desse recurso crítico.

Metodologia - A pesquisa envolveu experimentos laboratoriais baseados em flotação, reação química e lavagem, utilizando diferentes reagentes, incluindo vinagre, acetona, ácido clorídrico, carbonato de sódio, querosene, álcool 99,5%, sabão líquido, óleo de eucalipto e removedor contendo surfactantes. As amostras foram analisadas por espectrometria de fluorescência de raios X, espectrometria de massa e difração de raios X, e os dados foram submetidos a análises estatísticas, incluindo coeficientes de variação e correlação de Pearson.

Originalidade/relevância - O estudo preenche uma lacuna na recuperação de lítio a partir de resíduos industriais, considerando a viabilidade técnica e ambiental de diferentes processos. A pesquisa contribui para a economia circular e para a redução da dependência de fontes primárias, tema de crescente interesse na transição energética global.

Resultados - Os resultados indicaram que a lixiviação ácida apresentou a maior eficiência na concentração de lítio, atingindo um aumento de 105% na concentração do metal. Houve uma correlação positiva entre lítio e alumínio ($r = 0,956$) e negativa com cálcio ($r = -0,987$), fornecendo diretrizes para otimização do processo. O método de reação química demonstrou maior reprodutibilidade ($CV = 28,48\%$) em relação à flotação ($CV = 97,74\%$) e à lavagem ($CV = 79,90\%$).

Contribuições teóricas/metodológicas - A pesquisa estabelece parâmetros para a otimização dos processos de recuperação de lítio, fornecendo subsídios para futuras investigações sobre a melhoria da eficiência e escalabilidade industrial dessas técnicas.

Contribuições sociais e ambientais - A recuperação de lítio a partir de resíduos reduz a necessidade de extração primária, minimizando impactos ambientais, consumo de água e emissões associadas à mineração convencional. Os achados podem orientar políticas públicas e estratégias industriais voltadas à gestão sustentável de recursos minerais.

PALAVRAS-CHAVE: Lítio residual. Recuperação de lítio. Sustentabilidade. Resíduos industriais. Processos químicos.

Development of Technology for the Recovery of Residual Lithium from Its Processing Waste

ABSTRACT

Objective - To develop a sustainable and efficient technology for the recovery of residual lithium from waste generated during its processing, contributing to the mitigation of environmental impacts and the optimization of the utilization of this critical resource.

Methodology - The research involved laboratory experiments based on flotation, chemical reaction, and washing, using different reagents, including vinegar, acetone, hydrochloric acid, sodium carbonate, kerosene, 99.5% alcohol, liquid soap, eucalyptus oil, and surfactant-containing remover. The samples were analyzed by X-ray fluorescence spectrometry, mass spectrometry, and X-ray diffraction, and the data were subjected to statistical analyses, including variation coefficients and Pearson correlation.

Originality/relevance - The study fills a gap in lithium recovery from industrial waste, considering the technical and environmental feasibility of different processes. The research contributes to the circular economy and the reduction of dependence on primary sources, a topic of growing interest in the global energy transition.

Results - The results indicated that acid leaching presented the highest efficiency in lithium concentration, achieving a 105% increase in metal concentration. A positive correlation was observed between lithium and aluminum ($r = 0.956$) and a negative correlation with calcium ($r = -0.987$), providing guidelines for process optimization. The chemical reaction method demonstrated greater reproducibility ($CV = 28.48\%$) compared to flotation ($CV = 97.74\%$) and washing ($CV = 79.90\%$).

Theoretical/methodological contributions - The research establishes parameters for optimizing lithium recovery processes, providing insights for future investigations aimed at improving efficiency and industrial scalability of these techniques.

Social and environmental contributions - Recovering lithium from waste reduces the need for primary extraction, minimizing environmental impacts, water consumption, and emissions associated with conventional mining. The findings can guide public policies and industrial strategies focused on the sustainable management of mineral resources.

KEYWORDS: Residual lithium. Lithium recovery. Sustainability. Industrial waste. Chemical processes.

Desarrollo de tecnología para la recuperación de litio residual a partir de los residuos de su procesamiento

RESUMEN

Objetivo - Desarrollar una tecnología sostenible y eficiente para la recuperación de litio residual a partir de los residuos generados durante su procesamiento, contribuyendo a la mitigación de los impactos ambientales y a la optimización del aprovechamiento de este recurso crítico.

Metodología - La investigación involucró experimentos de laboratorio basados en flotación, reacción química y lavado, utilizando diferentes reactivos, incluyendo vinagre, acetona, ácido clorhídrico, carbonato de sodio, queroseno, alcohol 99,5%, jabón líquido, aceite de eucalipto y removedor con surfactantes. Las muestras fueron analizadas mediante espectrometría de fluorescencia de rayos X, espectrometría de masas y difracción de rayos X, y los datos fueron sometidos a análisis estadísticos, incluyendo coeficientes de variación y correlación de Pearson.

Originalidad/relevancia - El estudio llena un vacío en la recuperación de litio a partir de residuos industriales, considerando la viabilidad técnica y ambiental de diferentes procesos. La investigación contribuye a la economía circular y a la reducción de la dependencia de fuentes primarias, un tema de creciente interés en la transición energética global.

Resultados - Los resultados indicaron que la lixiviación ácida presentó la mayor eficiencia en la concentración de litio, logrando un aumento del 105% en la concentración del metal. Se observó una correlación positiva entre el litio y el aluminio ($r = 0,956$) y una correlación negativa con el calcio ($r = -0,987$), proporcionando directrices para la optimización del proceso. El método de reacción química demostró una mayor reproducibilidad ($CV = 28,48\%$) en comparación con la flotación ($CV = 97,74\%$) y el lavado ($CV = 79,90\%$).

Contribuciones teóricas/metodológicas - La investigación establece parámetros para la optimización de los procesos de recuperación de litio, proporcionando insumos para futuras investigaciones sobre la mejora de la eficiencia y la escalabilidad industrial de estas técnicas.

Contribuciones sociales y ambientales - La recuperación de litio a partir de residuos reduce la necesidad de extracción primaria, minimizando los impactos ambientales, el consumo de agua y las emisiones asociadas a la minería convencional. Los hallazgos pueden orientar políticas públicas y estrategias industriales enfocadas en la gestión sostenible de los recursos minerales.

PALABRAS CLAVE: Litio residual. Recuperación de litio. Sostenibilidad. Residuos industriales. Procesos químicos.

INTRODUÇÃO

O lítio emergiu como um elemento estratégico na transição energética global, impulsionando tecnologias sustentáveis e baterias de alto desempenho. Sua crescente demanda, especialmente para veículos elétricos e sistemas de armazenamento de energia renovável, intensificou a exploração de fontes primárias, como salares e depósitos de pegmatito (Frota, Lima, 2023). No entanto, a extração intensiva apresenta desafios ambientais e econômicos significativos, incluindo alto consumo de água e energia, além da geração de resíduos prejudiciais aos ecossistemas.

A segurança e estabilidade do suprimento de lítio a longo prazo são preocupações crescentes devido à concentração geográfica das reservas em poucos países (Peiró, Méndez, Ayres, 2013). Como alternativa, a recuperação de lítio residual surge como uma solução promissora, alinhando-se aos princípios da economia circular. Garcia *et al.* (2023) enfatizam que estratégias de recuperação são fundamentais para garantir a sustentabilidade na cadeia produtiva do lítio, reduzindo a dependência de fontes primárias e mitigando impactos ambientais associados à mineração.

Para o Brasil, país com reservas expressivas desse metal, o domínio de tecnologias avançadas de recuperação representa uma oportunidade estratégica. O desenvolvimento dessas tecnologias pode fortalecer a posição do país na cadeia global de valor do lítio, fomentando inovação, geração de empregos qualificados e sustentabilidade ambiental no setor mineral. Segundo Braga e França (2013), o aprimoramento dessas tecnologias pode conferir um diferencial competitivo ao Brasil no cenário internacional.

Apesar dos avanços recentes, há uma lacuna no desenvolvimento de tecnologias que integrem alta eficiência de recuperação, baixo impacto ambiental e viabilidade econômica. A recuperação de lítio residual apresenta desafios técnicos significativos, principalmente devido à complexidade da matriz dos resíduos e às interações químicas envolvidas no processo (Liu *et al.*, 2023). Diante desse cenário, este estudo busca preencher essa lacuna ao desenvolver e avaliar métodos inovadores de recuperação de lítio residual.

Este estudo tem como objetivo desenvolver tecnologias sustentáveis e eficientes para a recuperação de lítio a partir de resíduos gerados durante seu processamento. Os objetivos específicos incluem: (i) identificar a rota química mais eficaz para a recuperação do lítio presente nos resíduos; (ii) avaliar as viabilidades técnica, econômica e ambiental do processo de recuperação; (iii) investigar o potencial de diferentes substâncias químicas para melhorar a eficiência do processo; e (iv) comparar a eficiência da tecnologia proposta com outras rotas existentes de recuperação do lítio. Resultados preliminares indicam que a lixiviação ácida é o método mais promissor, alcançando uma taxa de concentração de lítio de 105% nos resíduos processados.

Dessa forma, esta pesquisa pode contribuir para o desenvolvimento de processos sustentáveis de recuperação de lítio, otimizando o uso de recursos minerais e reduzindo impactos ambientais. Além disso, pode fornecer subsídios técnicos para a indústria e políticas públicas voltadas à gestão sustentável de metais estratégicos.

METODOLOGIA

Este estudo caracteriza-se como experimental e foi conduzido no Laboratório de Solos da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), campus do Mucuri, em Teófilo Otoni, Minas Gerais. O material experimental consistiu em silicato de alumínio residual, gerado durante o processamento do espodumênio para a extração de lítio, fornecido pela Companhia Brasileira de Lítio (CBL). A composição química média do material experimental está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Composição do silicato utilizado nos experimentos

RESULTADOS DAS ANÁLISES											
MATERIAL: SILICATO DE ATERRO											
Composição	Li ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	P ₂ O ₅ (%)	CaO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Mn ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	SiO ₂ (%)	SO ₄ ²⁻ (%)
Média	0,869	1,403	0,391	0,149	4,490	21,061	0,719	0,108	0,189	59,877	2,796
DP	0,092	0,123	0,036	0,031	1,657	1,731	0,088	0,010	0,036	1,001	0,402

Fonte: Companhia Brasileira de Lítio (CBL) (2023).

Procedimentos Experimentais

Foram conduzidos 13 experimentos distintos, definidos com base em combinações específicas de reagentes e técnicas, conforme descrito a seguir. Os experimentos foram organizados em três categorias principais: flotação, reação química e lavagem. Todos os ensaios foram realizados em triplicata, e as amostras controle (silicato não tratado) foram utilizadas para comparação direta.

Flotação: Foram realizados seis experimentos, utilizando os seguintes reagentes como agentes coletores: vinagre, acetona, sabão líquido, óleo de eucalipto, álcool 99,5% e querosene. Em cada ensaio, foram utilizados 100 g de silicato de alumínio residual em solução aquosa, com tempo de flotação variando entre 10 e 12 horas. O sistema de aeração foi adaptado, utilizando um mecanismo de bombeamento de ar similar ao empregado em aquários.

Reação Química: Foram conduzidos experimentos utilizando ácido clorídrico (HCl \cong 2%) e uma combinação de HCl com carbonato de sódio (Na₂CO₃). Cada ensaio utilizou 50 g de silicato de alumínio residual, com tempo de reação de 20 horas.

Lavagem: O processo de lavagem foi realizado com água destilada, incluindo peneiramento em malha de 1,18 mm para separação granulométrica.

Análises e Caracterização

As amostras resultantes foram analisadas pela SGS Geosol Laboratórios LTDA, utilizando as seguintes técnicas de caracterização química e estrutural:

- Espectrometria de Fluorescência de Raios X (XRF).
- Espectrometria de Massa com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS).
- Difração de Raios X (XRD).

Análise Estatística

Os dados foram analisados utilizando o software IBM SPSS Statistics (versão 26), aplicando os seguintes métodos estatísticos:

- Análise de Variância (ANOVA): para comparar a eficiência dos diferentes tratamentos.
- Teste de Tukey: para comparações múltiplas entre os grupos experimentais.
- Correlação de Pearson: para avaliar relações entre as variáveis analisadas.
- Critério de significância: um nível de significância de 5% ($p < 0,05$) foi adotado para todas as análises.
- Cálculo do erro padrão: para avaliar a precisão das medições realizadas.

A eficácia dos diferentes métodos foi avaliada comparando-se a concentração de lítio nas amostras tratadas em relação à amostra controle, considerando também o consumo de reagentes e o tempo de processamento.

RESULTADOS

A seguir, são apresentados os resultados obtidos nos experimentos de flotação, reação química e lavagem, destacando a concentração de lítio nos resíduos tratados. É importante ressaltar que os processos testados não promoveram a recuperação total do lítio, mas resultaram no aumento da concentração do metal nas amostras processadas, juntamente com outros compostos presentes nos resíduos. O material experimental apresentou composição inicial de 0,869% de Li_2O (4.032 ppm de Li), 21,061% de Al_2O_3 , 0,719% de Fe_2O_3 , 0,108% de Mn_2O_3 , 59,877% de SiO_2 , 4,490% de CaO e 0,189% de MgO .

Experimentos de Flotação

Os seis experimentos de flotação apresentaram variações na concentração de lítio nos resíduos processados. A flotação com vinagre obteve a maior concentração relativa, atingindo 2.720 ppm de Li ($67,3\% \pm 2,5\%$). A acetona resultou em 1.841 ppm ($45,6\% \pm 3,0\%$), enquanto o sabão líquido e o óleo de eucalipto apresentaram valores menores, com 491 ppm ($12,2\% \pm 1,7\%$) e 274 ppm ($6,8\% \pm 2,1\%$), respectivamente.

Os tratamentos com álcool 99,5% e querosene não apresentaram variação significativa, com concentrações finais de 4.460 ppm e 3.960 ppm, valores próximos à amostra inicial. Esses resultados indicam que a flotação, apesar de ter promovido variações na concentração de lítio nos resíduos processados, não foi eficaz na separação seletiva do metal.

Processos de Reação Química

O tratamento com HCl 2% apresentou a maior concentração de lítio nos resíduos tratados, atingindo 4.240 ppm ($105\% \pm 2,0\%$). A combinação de HCl com Na_2CO_3 , aplicada por 30 minutos, resultou em 2.828 ppm ($70\% \pm 3,5\%$), enquanto a extensão do tempo de reação para 60 minutos levou a 2.472 ppm ($61,2\% \pm 4,2\%$).

Esses resultados sugerem que a reação química promove modificações na composição dos resíduos, aumentando a concentração de lítio junto com outros elementos presentes no

material tratado, sem alcançar a recuperação seletiva do metal.

Experimentos de Lavagem

A lavagem simples com água destilada resultou em uma redução na concentração de lítio nos resíduos, atingindo 264 ppm (6,5% \pm 1,9%). No entanto, a separação do sobrenadante na lavagem com água apresentou uma concentração de 4.462 ppm (110,4% \pm 2,2%).

O fracionamento granulométrico também influenciou a distribuição do lítio nos resíduos, resultando em concentrações de 4.279 ppm (105,9% \pm 2,4%) para a fração fina e 4.879 ppm (120,8% \pm 1,7%) para a fração grossa. Esses dados indicam que a segregação granulométrica pode ter favorecido o enriquecimento relativo de lítio, sem promover sua separação eficiente.

Correlações Estatísticas

A análise de Correlação de Pearson revelou que a concentração de lítio nos resíduos tratados possui associação positiva significativa com alumínio ($r = 0,956$, $p < 0,001$) e associação negativa com cálcio ($r = -0,987$, $p < 0,001$). Esses resultados sugerem que o alumínio pode estar relacionado à estabilização do lítio nos resíduos, enquanto o cálcio pode atuar como um fator limitante no processo. Além disso, foram observadas correlações moderadas com ferro ($r = 0,714$, $p = 0,014$) e fracas com manganês ($r = 0,238$, $p = 0,480$).

A avaliação da reprodutibilidade dos métodos revelou que a reação química apresentou o menor coeficiente de variação (CV = 28,48%), indicando maior estabilidade nos ensaios. Já a lavagem obteve CV de 79,90%, enquanto a flotação apresentou a maior variabilidade (CV = 97,74%), o que demonstra baixa reprodutibilidade desse método nos experimentos realizados.

A concentração média global de lítio nos resíduos processados foi de 2.613,64 ppm ($\pm 1.736,13$ ppm), reforçando que os métodos testados alteraram a distribuição do lítio no material tratado, mas não promoveram sua recuperação seletiva e completa.

DISCUSSÃO

Os resultados obtidos demonstram que os processos testados não promoveram a recuperação seletiva do lítio, mas resultaram no aumento de sua concentração nos resíduos tratados, indicando que os métodos aplicados influenciaram a redistribuição dos elementos químicos no material processado. Essa observação está alinhada com estudos prévios que sugerem que a recuperação do lítio a partir de resíduos industriais é um processo desafiador, uma vez que sua extração seletiva é frequentemente limitada pela presença de outros compostos na matriz mineral (WANG *et al.*, 2023).

A flotação, frequentemente utilizada na separação seletiva de minerais, apresentou resultados variados, com melhor desempenho para o tratamento com vinagre (67,3%) e acetona (45,6%). No entanto, os valores de coeficiente de variação (CV = 97,74%) indicam uma baixa reprodutibilidade, sugerindo que fatores como a adsorção superficial e a interação do lítio com outros elementos podem ter influenciado negativamente a eficiência do processo. Estudos

recentes apontam que a flotação do lítio pode ser limitada pela interferência de silicatos e aluminosilicatos, que reduzem a seletividade do processo (Mendes *et al.*, 2018).

Nos experimentos de reação química, a lixiviação ácida com HCl foi o processo que apresentou a maior concentração relativa de lítio nos resíduos tratados (105%), enquanto a combinação HCl/Na₂CO₃ apresentou uma concentração inferior (70% em 30 minutos e 61,2% em 60 minutos). Esses resultados sugerem que o HCl teve um papel mais efetivo na dissolução parcial da matriz dos resíduos, promovendo um enriquecimento relativo do lítio junto com outros componentes, mas sem alcançar uma separação seletiva. Trabalhos prévios indicam que a lixiviação ácida é eficiente na remoção de impurezas e na liberação de lítio em solução, mas sua seletividade depende de variáveis como pH, temperatura e tempo de reação (Salakjani, Singh, Nikoloski, 2016; Dessemond *et al.*, 2018).

A lavagem dos resíduos, por sua vez, apresentou variação na concentração de lítio de acordo com a técnica aplicada. A lavagem simples com água destilada resultou em um decréscimo na concentração do metal (6,5%), indicando que esse processo isolado não é suficiente para modificar significativamente a distribuição do lítio nos resíduos. No entanto, a separação do sobrenadante após a lavagem apresentou uma concentração de lítio de 110,4%, enquanto o fracionamento granulométrico demonstrou uma tendência de maior concentração na fração grossa (120,8%) em comparação com a fração fina (105,9%). Esses dados reforçam a hipótese de que a granulometria e a segregação física podem ter um papel relevante na concentração diferencial do lítio no material processado, como defendido por Wills e Napier-Munn (2006).

As análises de correlação de Pearson indicaram uma relação positiva e significativa entre lítio e alumínio ($r = 0,956$, $p < 0,001$) e uma associação negativa com cálcio ($r = -0,987$, $p < 0,001$). A correlação positiva com alumínio sugere que o lítio pode estar associado a fases aluminosilicáticas, corroborando estudos que indicam que o lítio em rejeitos industriais pode estar ligado a minerais como espodumênio e lepidolita (Ibsaine *et al.*, 2023). Por outro lado, a correlação negativa com cálcio pode indicar que a presença desse elemento reduz a eficiência dos métodos empregados, possivelmente devido à formação de compostos menos solúveis ou à adsorção competitiva na matriz mineral.

Do ponto de vista da reprodutibilidade dos métodos, a reação química apresentou o menor coeficiente de variação (CV = 28,48%), indicando maior estabilidade nos ensaios realizados. A flotação, por outro lado, apresentou a maior variabilidade (CV = 97,74%), o que sugere a necessidade de otimização de parâmetros operacionais para melhorar a eficiência desse método. A lavagem obteve um CV intermediário (79,90%), reforçando que sua eficácia depende de fatores como o tempo de contato e a segregação granulométrica.

Os resultados obtidos reforçam que a recuperação total do lítio não foi atingida nos processos testados, mas os dados demonstram a influência significativa dos diferentes métodos na redistribuição e concentração do metal nos resíduos tratados. Estudos recentes apontam que a combinação de métodos pode ser uma estratégia mais eficaz, sendo que a lixiviação química associada a técnicas físicas, como flotação seletiva e separação por membranas, tem demonstrado maior eficiência na recuperação de lítio a partir de rejeitos industriais (Hasan, Hossain, Sahajwalla, 2023).

Além da recuperação direta do lítio, resíduos do processamento desse metal, como

silicato de alumínio e finos de forno calcinador, têm potencial para aplicações sustentáveis em outras cadeias produtivas. Pesquisas demonstram que o resíduo do processamento de lítio, composto principalmente por silicato de alumínio e finos de forno calcinador, pode ser utilizado como fertilizante alternativo no cultivo da mamona (*Ricinus communis* L.). Os resultados indicaram que doses de 8 e 10 t/ha do resíduo, associadas a 50% da adubação convencional, promoveram maior desenvolvimento vegetal e produtividade. Na análise da massa fresca e seca total, esses tratamentos apresentaram os maiores rendimentos, enquanto a análise do teor de óleo mostrou que as mesmas dosagens resultaram em valores semelhantes aos encontrados na literatura (35-55%), comprovando a viabilidade do uso desses resíduos como condicionador-fertilizante (Costa *et al.*, 2024). Essa abordagem não apenas reduz os impactos ambientais do descarte inadequado, mas também oferece uma solução viável para a agricultura em solos pobres em nutrientes.

A integração de estratégias de recuperação de lítio com políticas públicas de gestão de resíduos sólidos é imprescindível para maximizar seus benefícios ambientais e econômicos. Como evidenciado por Aguiar *et al.* (2024), a eficácia dessas políticas depende da colaboração entre atores sociais (catadores, empresas e governo) e da adoção de modelos como a economia circular, que priorizam a reutilização de materiais e a inclusão social. A tipologia proposta por esses autores destaca temas emergentes, como gestão municipal de resíduos, e motores, como meio ambiente, reforçando a necessidade de ações coordenadas para reduzir impactos ambientais e promover a sustentabilidade na cadeia produtiva do lítio.

Diante dessas observações, recomenda-se que futuras investigações avaliem estratégias combinadas, otimizando variáveis como tempo de reação, tipo de reagente e temperatura, bem como a implementação de técnicas de pré-tratamento para melhorar a seletividade dos processos. Além disso, o impacto ambiental dos métodos testados deve ser analisado, considerando a viabilidade industrial da recuperação do lítio a partir de rejeitos.

CONCLUSÃO

Este estudo avaliou diferentes métodos para a recuperação de lítio residual a partir de resíduos industriais gerados durante o processamento do espodumênio. Os resultados demonstraram que, embora nenhum dos processos tenha promovido a recuperação seletiva do lítio, houve um aumento da sua concentração nos resíduos tratados, evidenciando a influência dos métodos aplicados na redistribuição do metal na matriz mineral.

A lixiviação ácida com HCl apresentou os melhores resultados, atingindo uma concentração de 4.240 ppm de Li (105%), sugerindo que a dissolução parcial da matriz dos resíduos contribuiu para um enriquecimento relativo do lítio, sem, no entanto, proporcionar sua separação seletiva. A flotação, por sua vez, mostrou resultados variáveis e baixa reprodutibilidade (CV = 97,74%), indicando que a interação do lítio com outros componentes dos resíduos pode ter limitado a eficiência do processo. A lavagem simples não foi eficaz, mas o fracionamento granulométrico indicou uma maior concentração de lítio na fração grossa (120,8%), sugerindo que a segregação física pode desempenhar um papel relevante no enriquecimento diferencial do metal nos resíduos.

As análises estatísticas revelaram uma correlação positiva significativa entre lítio e

alumínio ($r = 0,956$, $p < 0,001$) e uma associação negativa com cálcio ($r = -0,987$, $p < 0,001$), indicando que a presença desses elementos pode influenciar a eficiência dos métodos empregados. Além disso, a reação química apresentou a menor variabilidade ($CV = 28,48\%$), demonstrando maior estabilidade nos experimentos, enquanto a flotação apresentou a maior dispersão dos dados, sugerindo a necessidade de otimização dos parâmetros operacionais.

Os achados desta pesquisa reforçam a necessidade de desenvolver estratégias mais eficazes para a recuperação seletiva do lítio, combinando diferentes abordagens físico-químicas. Estudos futuros devem avaliar técnicas híbridas, como a associação entre lixiviação química e processos físico-mecânicos, além da otimização dos parâmetros operacionais para melhorar a eficiência e reprodutibilidade dos métodos.

Do ponto de vista ambiental, a recuperação do lítio a partir de resíduos industriais pode reduzir a dependência da extração primária, mitigando impactos ambientais associados à mineração tradicional. No entanto, para que esses métodos sejam viáveis em escala industrial, é fundamental considerar aspectos econômicos, consumo de reagentes e geração de resíduos secundários.

Portanto, este estudo tem o potencial de contribuir para o avanço das pesquisas voltadas à valorização de rejeitos industriais contendo lítio, fornecendo dados relevantes para o aprimoramento de processos de recuperação do metal. O desenvolvimento de tecnologias mais seletivas e sustentáveis pode favorecer a economia circular no setor mineral, reduzindo impactos ambientais e aumentando a eficiência no aproveitamento de recursos estratégicos.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, João Carlos Belarmino *et al.* Tipologia e Tendências da Relação entre Gerenciamento de Resíduos Sólidos e Políticas Públicas: Uma Revisão Sistemática de Literatura. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 20, n. 1, p. 433-449, 2024. <https://doi.org/10.17271/1980082720120245277>.

BRAGA, Paulo Fernando Almeida; FRANÇA, Sílvia Cristina Alves. Lítio: Um mineral estratégico. 1. ed. Rio de Janeiro: **CETEM/MCTI**, 2013. 41 p. (Série Estudos e Documentos, 81).

COSTA, Aline Aparecida Andrade *et al.* Uso de Resíduo Mineral do processamento do lítio como fertilizante no cultivo da mamona (*Ricinus communis* L.). **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 20, n. 1, p. 30-43, 2024. <https://doi.org/10.17271/1980082720120243895>.

DESSEMOND, Colin *et al.* Revisiting the Traditional Process of Spodumene Conversion and Impact on Lithium Extraction. In: DAVIS, Boyd *et al.* (Eds.). *Extraction 2018*. Cham: **Springer**, 2018. p. 2281-2291. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.108682>.

FROTA, Ilgner Justa; LIMA, Rayanne Silva Vieira. Sais de lítio: os mais peculiares psicofármacos. **Diálogos Interdisciplinares em Psiquiatria e Saúde Mental**, Fortaleza, v. 2, n. 2, e12306, 2023. <https://doi.org/10.59487/2965-1956-2-12306>.

GARCIA, Laura Vega *et al.* Lithium in a Sustainable Circular Economy: A Comprehensive Review. **Processes**, v. 11, n. 2, p. 418, 30 jan. 2023. <https://doi.org/10.3390/pr11020418>.

HASAN, Md. Anik; HOSSAIN, Rumana; SAHAJWALLA, Veena. Critical metals (Lithium and Zinc) recovery from battery waste, ores, brine, and steel dust: A review. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 178, p. 976-994, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.08.069>.

IBSAINE, F. *et al.* Conversion of Aluminosilicate Residue Generated from Lithium Extraction Process to NaX Zeolite.

Minerals, v. 13, n. 12, p. 1467, 2023.

<https://doi.org/10.3390/min13121467>.

LIU, Xu *et al.* Life Cycle Impacts of Pyrometallurgical and Hydrometallurgical Recovery Processes for Spent Lithium-ion Batteries in China: Present and Future Perspectives. **Journal of Cleaner Production**, 2023.

<https://doi.org/10.1007/s10098-023-02640-x>.

MENDES, M. V. A. *et al.* Flotação de silicatos. **HOLOS**, Ano 34, v. 3, p. 46-53, 2018.

<https://doi.org/10.15628/holos.2018.7440>.

PEIRÓ, Laura Talens; MÉNDEZ, Gara Villalba; AYRES, Robert U. Lithium: Sources, Production, Uses, and Recovery Outlook. **JOM**, v. 65, n. 8, p. 986-996, ago. 2013. <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0666-4>.

SALAKJANI, Nasim Kh.; SINGH, Pritam; NIKOLOSKI, Aleksandar N. Mineralogical transformations of spodumene concentrate from Greenbushes, Western Australia. Part 2: Microwave heating. **Minerals Engineering**, v. 100, p. 191-199, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.05.003>.

WANG, Xiao-Qing *et al.* Bubble behaviors in lithium price and the contagion effect: An industry chain perspective.

Resources Policy, v. 83, p. 103725, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103725>.

WILLS, Barry A.; NAPIER-MUNN, Tim. Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. 7th ed. Oxford: **Elsevier Science & Technology Books**, 2006. 456 p.

DECLARAÇÕES

CONTRIBUIÇÃO DE CADA AUTOR

Alexandre Sylvio Vieira da Costa e Elton Santos Franco

Concepção e Design do Estudo, Curadoria de Dados, Investigação, Metodologia, Revisão e Edição Final, Supervisão.

Alexssander Ferreira de Sousa, Nubia Aparecida de Aguiar e Tales Ceniro Campos

Curadoria de Dados, Análise Formal, Investigação, Redação - Rascunho Inicial, Redação - Revisão Crítica.

DECLARAÇÃO DE CONFLITOS DE INTERESSE

Nós, **Alexssander Ferreira de Sousa, Alexandre Sylvio Vieira da Costa, Elton Santos Franco, Nubia Aparecida de Aguiar e Tales Ceniro Campos**, declaramos que o manuscrito intitulado "**Desenvolvimento de tecnologia para a recuperação de lítio residual a partir dos resíduos de seu processamento**":

Vínculos Financeiros: Nenhuma instituição ou entidade financiadora esteve envolvida no desenvolvimento deste estudo.

Relações Profissionais: Nenhuma relação profissional relevante ao conteúdo deste manuscrito foi estabelecida.

Conflitos Pessoais: Nenhum conflito pessoal relacionado ao conteúdo foi identificado.