



Lixiviação sustentável de LIBs descartadas

Keycianne C. Silva (PG)¹, Vinícius S. Carmino (PG)¹, Flávia C. de Barros (PG)¹, Leandro R. de Lemos (PQ)¹

¹ Laboratório de Separações Químicas, Departamento de Química, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (leandro.lemos@ufvjm.edu.br)

RESUMO (Times New Roman, tam 12)

As baterias de íons lítio (LIBs) são indispensáveis a eletrônicos e veículos elétricos, mas seu descarte inadequado gera passivos ambientais. A reciclagem por rotas hidrometalúrgicas permite recuperar metais de alto valor alinhado à sustentabilidade, sobretudo quando se empregam lixiviantes verdes. Neste estudo, desenvolveu-se uma metodologia sustentável para a extração seletiva de cobre, lítio e cobalto de LIBs descartadas utilizando aminoácidos como agentes lixiviantes. Alanina, glicina e prolina foram avaliados; a glicina apresentou a maior extração simultânea de Cu, Li e Co e foi, portanto, escolhida para a etapa de otimização. Empregou-se uma matriz Doehlert para refinar as condições operacionais (concentrações de aminoácido e H_2O_2 , razão sólido/líquido, temperatura e tempo). Os resultados confirmam a viabilidade técnica e ambiental do processo, evidenciando um avanço alinhado aos princípios da Química Verde na reciclagem de LIBs.

Palavras-chave: baterias íons lítio, metais críticos, química verde, hidrometalurgia

Introdução

As baterias de íons lítio (LIBs) tornaram-se onipresentes em eletrônicos, veículos elétricos e sistemas de armazenamento de energia, ampliando a demanda por metais estratégicos como lítio, cobalto e cobre [1]. A extração primária desses recursos é energeticamente intensiva e ambientalmente impactante, e o descarte inadequado de LIBs agrava o problema ao liberar metais pesados e eletrólitos tóxicos, com risco de contaminação e incêndios [2]. Nesse cenário, rotas de reciclagem que empregam solventes e reagentes menos agressivos ganham relevância, uma vez que reduzem resíduos perigosos e emissões ao longo do processo hidrometalúrgico [3]. Solventes eutéticos profundos, ácidos orgânicos e ácidos inorgânicos diluídos têm se destacado como alternativas verdes, capazes de complexar metais com menor toxicidade, maior biodegradabilidade e potencial de reaproveitamento [4]. Além desses compostos, alguns aminoácidos, como glicina, alanina e prolina, apresentam potencial para a extração seletiva de metais por meio de complexação, oferecendo uma abordagem eficiente e de menor toxicidade [5]. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo desenvolver uma metodologia sustentável para a recuperação de cobre, cobalto e lítio presentes em LIBs, utilizando lixiviantes ecológicos para a extração dos metais. Para isso, foram selecionados os aminoácidos alanina, glicina e prolina como agentes lixiviantes. A otimização das condições de lixiviação será realizada por meio de um planejamento fatorial fracionário para a seleção das variáveis mais significativas do processo, seguido pelo planejamento Doehlert para maximizar a eficiência de extração dos metais.

Experimental

As lixiviações foram conduzidas utilizando uma montagem de vidrarias com balão de fundo redondo em banho de glicerina, conectado a um condensador para evitar perdas por evaporação. Para

cada experimento, 1,00 g de baterias de íon lítio previamente trituradas foi adicionada ao balão de fundo redondo, juntamente com a solução do aminoácido (alanina, glicina ou prolina) com pH ajustado e H_2O_2 . O sistema foi submetido à agitação constante de 100 rpm em um banho-maria contendo glicerina bidestilada, garantindo a manutenção de uma temperatura controlada e constante durante o processo de lixiviação. Após a lixiviação, o lixiviado foi avolumado, posteriormente diluído e a quantidade de cobalto, cobre e lítio mensurada via FAAS. A Figura 1 mostra o esquema adotado nos experimentos de lixiviação.

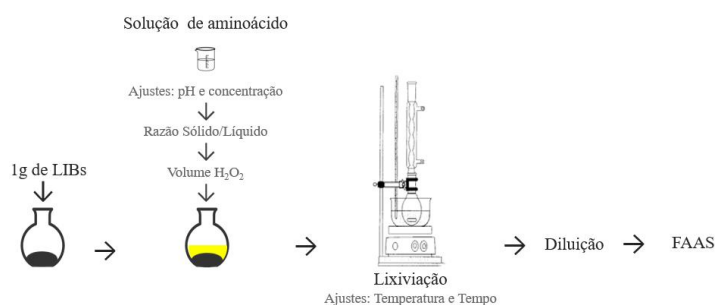


Figura 1. Esquema dos estudos de lixiviação.

Para identificar as variáveis mais relevantes no processo de lixiviação foi utilizado um planejamento fatorial fracionário 2^{6-1} , onde os parâmetros avaliados foram temperatura, tempo, concentração de aminoácido, pH, razão sólido/líquido e concentração de H_2O_2 . O planejamento Doehlert foi utilizado para otimizar os parâmetros do processo de lixiviação, onde o número de experimentos foi calculado pela fórmula $k^2 + k + PC$, onde k é o número de variáveis e PC é o número de pontos centrais [6].



Resultados e Discussão

A Figura 2 apresenta o gráfico de Pareto para o estudo do planejamento fatorial para definição das variáveis que exercem efeito estatisticamente significativo sobre o processo de lixiviação. No gráfico de Pareto, os efeitos de primeira ordem para as variáveis para cada aminoácido e íon metálico estão representadas no eixo vertical, enquanto os efeitos padronizados correspondentes aparecem no eixo horizontal. As linhas verticais vermelhas indicam os limites críticos, destacando as variáveis estatisticamente significativas (intervalo de confiança de 95,0%).

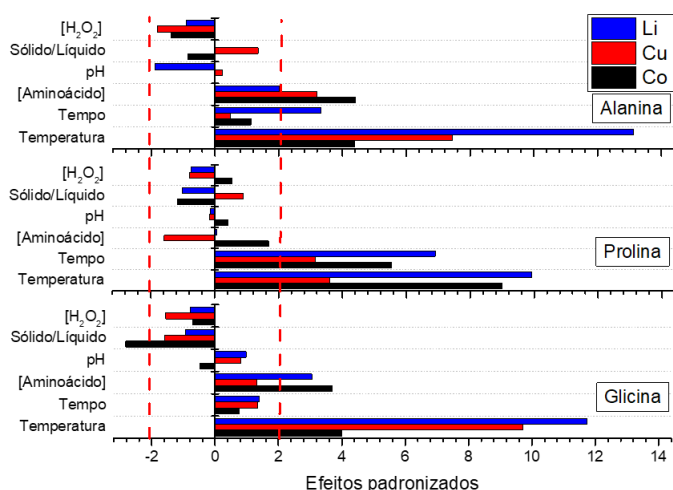


Figura 2. Gráfico de Pareto para os efeitos padronizados gerado do planejamento fatorial fracionário para os estudos de lixiviação com aminoácidos ($\alpha = 0,05$).

As variáveis com efeitos significativos foram utilizadas para otimização da lixiviação. Para a alanina, a temperatura e a concentração do aminoácido foram os parâmetros significativos, enquanto para a prolina foram temperatura e tempo, já para a glicina, a temperatura, concentração do aminoácido e razão s/l foram as variáveis consideradas no estudo de otimização.

Utilizando o planejamento Doehlert foi possível obter os valores otimizados pela função de desejabilidade composta para os metais cobalto, cobre e lítio utilizando os três aminoácidos estudados, de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1. Comparação dos resultados obtidos para os três aminoácidos na extração de metais

Aminoácido	Metal	Extração Máxima Individual (mg/L)	Extração Otimizada (mg/L)
Alanina	Co	36,5	21,3
	Cu	101,2	101,2
	Li	13,8	13,8
Glicina	Co	160,6	151,2
	Cu	188,8	120,9
	Li	25,6	25,3
Prolina	Co	57,8	42,5
	Cu	166,4	165,7
	Li	25,6	21,0

De acordo com a Tabela 1, a glicina foi o agente lixiviante mais eficiente, seguida pela prolina e alanina. Tanto na condição otimizada quanto na extração máxima individual, a glicina apresentou os melhores resultados para cobalto e cobre. Para o lítio, a prolina mostrou o melhor desempenho. A glicina mostrou desempenho superior na extração simultânea de cobalto, cobre e lítio. Suas características químicas, como a capacidade de formar complexos estáveis e sua ampla disponibilidade comercial, reforçam sua viabilidade como agente lixiviante.

Uma nova otimização para a glicina foi realizada utilizando a desejabilidade composta, com pesos calculados com base no valor estimado de mercado dos metais em março de 2025. Os preços considerados foram: US\$ 24.275,00 por tonelada de cobalto metálico, US\$ 9.248,09 por tonelada de cobre metálico e US\$ 10.350,00 por tonelada de hidróxido de lítio. Assim, a condição otimizada para maximizar a extração dos metais foi à 104,38 °C, razão s/l de 0,10 g/mL, concentração de glicina de 14,15 % (m/m), concentração de H₂O₂ de 10 % (m/m), pH = 6,00 e tempo de 60 min. Nessa condição foram extraídos 94,3% de cobalto, 63,1% de cobre e 98,7% de lítio.

Conclusões

Neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia ambientalmente amigável para a lixiviação de cobre, cobalto e lítio a partir de baterias de íons de lítio descartadas, utilizando aminoácidos como lixiviantes verdes. A otimização das condições de lixiviação, por meio dos planejamentos fatorial fracionário e Doehlert, demonstrou que a glicina foi o agente mais eficiente para a extração dos metais, operando sob condições brandas e com reduzido impacto ambiental. Esta abordagem agrega vantagens ambientais e econômicas, já que não utiliza ácidos minerais e solventes tóxicos, reduz a geração de efluentes perigosos e o consumo energético, permite a recuperação de metais de alto valor, diminuindo a dependência da mineração primária. Como perspectivas futuras, o lixiviado será submetido a uma separação líquido-líquido, baseada em reagentes sustentáveis, para separação e purificação dos metais de interesse.

Agradecimentos

FAPEMIG (APQ-03088-21 and APQ-02223-24); CNPq (307450/2022-8) e Capes (001).

Referências

1. L. Gaines; K. Richa; J. Spangenberg, *MRS Energy Sustain.* **2018**, 5, E14.
2. M. T. Islam; U. Iyer-Raniga, *Recycling* **2022**, 7, 33.
3. R. Bird; Z. J. Baum; X. Yu; J. Ma, *ACS Energy Lett.* **2022**, 7, 736–740.
4. S. S. de Jesus; R. M. Filho, *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2020**, 133, 110289.
5. D. L. Thompson; J. M. Hartley; S. M. Lambert; M. Shiref; G. D. J. Harper; E. Kendrick; P. Anderson; K. S. Ryder; L. Gaines; A. P. Abbott, *Green Chem.* **2020**, 22, 7585–7603.
6. R. F. Teófilo; M. M. C. Ferreira, *Quim. Nova* **2006**, 29, 338–350