



Short Communication



Recovery of lithium from spent batteries via a low-cost hydrometallurgical route

Recuperación de litio de baterías en desuso por ruta hidrometalúrgica de bajo costo

Vayolet E. Coro Flores¹ · José M. Cayo Andacahua¹ · Alexander Martinez Vedia¹ ·
Elvis T. Ochoa Choque^{1,2*}

¹ Universidad Nacional "Siglo XX", Carrera de Ingeniería en Recursos Evaporíticos del Litio, Llallagua, Potosí, Bolivia

² Universidad Mayor de Andrés, Carrera de Ingeniería Metalúrgica y Materiales, La Paz, Bolivia

* Autor de correspondencia: eteddy.ochoa@gmail.com

Received: 30 April 2026. Accepted: 25 May 2026. Published: 8 June 2026.

Abstract

Given the increasing demand for electric vehicles and storage systems, the recycling of end-of-life lithium-ion batteries is crucial to mitigate environmental impact and recover valuable metals. This study evaluates lithium recovery from black mass using two hydrometallurgical routes under laboratory conditions with operational constraints. Leaching using sulfuric acid (H_2SO_4 , 2 M) was compared to a treatment with commercial acetic acid (~5 % v/v), controlling variables such as temperature and solid-to-liquid ratio. Metal quantification was performed by atomic absorption spectroscopy. The results showed that sulfuric acid achieved a recovery efficiency of 98.1 %, significantly outperforming acetic acid, which only reached 50.3 %. This performance difference was influenced by the chemical nature of the leachant and the particle size of the material. It is concluded that the sulfuric acid route is an efficient alternative for hydrometallurgical recycling under these conditions.

Keywords: baterías; hidrometalurgia; lixiviación; litio; reciclado; recuperación.

Resumen

Ante el incremento en la demanda de vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento, el reciclaje de baterías de ion-litio en desuso es crucial para mitigar el impacto ambiental y recuperar metales valiosos. Este estudio evalúa la recuperación de litio a partir de masa negra mediante dos rutas hidrometalúrgicas bajo condiciones de laboratorio con limitaciones operativas. Se comparó la lixiviación utilizando ácido sulfúrico (H_2SO_4 , 2M) frente a un tratamiento con ácido acético comercial (~5 % v/v), controlando variables de temperatura y relación sólido-líquido. La cuantificación del metal se efectuó mediante espectroscopía de absorción atómica. Los resultados demostraron que el ácido sulfúrico alcanzó una eficiencia de recuperación del 98,1 %, superando significativamente al ácido acético, que solo obtuvo un 50,3 %. Esta diferencia de rendimiento estuvo influenciada por la naturaleza química del lixivante y la granulometría del material. Se concluye que la ruta con ácido sulfúrico es una alternativa eficiente para el reciclaje hidrometalúrgico bajo estas condiciones.

Palabras clave: batteries; hydrometallurgy; leaching; lithium; recycling; recovery.

Introducción

El incremento acelerado del uso de baterías de ion-litio en dispositivos electrónicos y vehículos eléctricos ha generado una creciente preocupación ambiental debido al aumento proyectado de residuos electroquímicos a nivel mundial. Se estima que para el año 2030 se producirán más de 11 millones de toneladas de baterías desechadas, las cuales contienen compuestos potencialmente tóxicos capaces de afectar los ecosistemas y la salud humana si no son gestionados adecuadamente (Perdana et al., 2025). No obstante, estos residuos constituyen una importante fuente secundaria de metales estratégicos como litio, cobalto y níquel, promoviendo el interés científico por el desarrollo de tecnologías de recuperación eficientes y sostenibles (Ali et al., 2025; Soleimani et al., 2025).

En este contexto, la hidrometalurgia se ha consolidado como una de las alternativas más viables para la recuperación de metales valiosos a partir de baterías agotadas, debido a su menor impacto ambiental y a sus menores requerimientos energéticos respecto a otros métodos extractivos convencionales (Sahu et al., 2023). Diversos estudios han demostrado que la eficiencia de lixiviación depende directamente del tipo de agente lixivante, las condiciones operativas y la incorporación de agentes reductores auxiliares (Tang et al., 2023). Particularmente, el ácido acético ha mostrado recuperaciones de litio superiores al 98 % cuando es combinado con peróxido de hidrógeno u otros reductores orgánicos; sin embargo, su desempeño disminuye considerablemente en ausencia de estos compuestos y bajo condiciones de laboratorio no optimizadas (Ali et al., 2025; Dobó et al., 2023; Kovačević et al., 2024).

A pesar de los avances reportados en la literatura científica, en regiones como Latinoamérica y especialmente en Bolivia, las investigaciones orientadas al reciclaje hidrometalúrgico de baterías aún son limitadas debido a restricciones tecnológicas, económicas y normativas asociadas al manejo de residuos del denominado “triángulo del litio” (Chacana-Olivares et al., 2025). Bajo estas condiciones, resulta relevante evaluar alternativas de bajo costo y fácil implementación para laboratorios académicos que no disponen de infraestructura industrial avanzada. En consecuencia, el presente estudio consideró condiciones operativas limitadas, incluyendo secado natural del material, trituración y tamizado manual, ausencia de control térmico y la no utilización de agentes reductores químicos, utilizando una muestra homogénea de masa negra obtenida de baterías desechadas (Sahu et al., 2023; Tawonezvi et al., 2023).

Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue comparar la eficiencia de recuperación de litio mediante dos tratamientos hidrometalúrgicos basados en ácido sulfúrico 2 M y ácido acético comercial al ~5 % v/v con las referencias reportadas en la literatura, utilizando masa negra proveniente de baterías de ion-litio bajo condiciones limitadas de laboratorio. En este contexto, la pregunta de investigación fue la siguiente: ¿En qué medida el tipo de agente lixivante afecta el porcentaje de recuperación de litio medido mediante espectroscopía de absorción atómica al trabajar sin agentes reductores y bajo condiciones operativas restringidas? En este estudio, el término recuperación de litio se refiere al porcentaje de litio transferido desde la masa negra hacia la solución de lixiviación.

Materiales y Metodos

Área de estudio

Los experimentos se realizaron en los laboratorios del Área Tecnológica de la Universidad Nacional “Siglo XX” (UNSXX), en Llallagua, Potosí, Bolivia. Las pruebas se desarrollaron bajo las condiciones técnicas disponibles para procesos hidrometalúrgicos. La cuantificación de litio, se realizó en el laboratorio especializado SPECTROLAB mediante Espectrometría de Absorción Atómica (EAA).

Diseño y material de estudio

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, mediante un diseño cuasi-experimental de carácter comparativo. Se aplicó un diseño con cinco repeticiones por tratamiento. Los tratamientos correspondieron a dos sistemas de lixiviación hidrometalúrgica, ácido sulfúrico denominado Método A (H_2SO_4 2 M) y ácido acético comercial Método B (~5 % v/v). El material experimental estuvo conformado por 66 baterías de ion-litio tipo pouch recolectadas en centros técnicos de la región (baterías de dispositivos eléctricos portátiles de química LCO/NMC). Antes del desensamblado, se verificó el estado de descarga eléctrica de cada batería mediante un multímetro digital para minimizar riesgos electroquímicos y térmicos. Durante el proceso de apertura y separación mecánica se descartaron dos unidades por daños físicos, obteniéndose finalmente 64 baterías aptas para el estudio. La masa negra (MB) recuperada fue sometida a secado ambiental durante siete días. Posteriormente, el material fue triturado y tamizado manualmente hasta alcanzar una granulometría menor a 1 mm. Se obtuvo un total de 408,65 g de MB con una concentración inicial de litio de 3,15 % p/p.

Ensayos y procedimiento operativo

Se realizaron ensayos preliminares utilizando 10 g de masa negra con la finalidad de establecer las condiciones operativas de lixiviación y definir una relación líquido/sólido de 25 mL/g. Para los ensayos definitivos se emplearon 200 g de MB, distribuidos en dos tratamientos con cinco réplicas de 20 g cada una. En el Método A, cada réplica fue tratada con 500 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4 2 M) a temperaturas entre 60 y 70 °C durante 120 minutos bajo agitación manual continua y sin uso de agentes reductores.

En el Método B, se utilizaron 500 mL de ácido acético comercial (~5 % v/v; 0,87 M) a temperaturas entre 50 y 60 °C durante 90 minutos con agitación manual intermitente y sin adición de reductores químicos. Finalizada la lixiviación, las soluciones fueron separados mediante filtración al vacío. La cuantificación del litio recuperado se realizó mediante espectroscopía de absorción atómica (EAA) realizado en el laboratorio externo SPECTROLAB. Finalmente, los efluentes residuales fueron neutralizados con hidróxido de sodio (NaOH) hasta alcanzar un pH aproximado de 7 para su disposición segura.

Análisis estadístico

Los resultados obtenidos para cada réplica fueron organizados y procesados en hojas de cálculo de Microsoft Excel profesional plus 2021. El porcentaje de recuperación de litio se calculó a partir de las concentraciones determinadas por espectroscopía de absorción atómica (EAA), tomando como referencia el contenido inicial de litio presente en la masa negra. Posteriormente, se aplicó estadística descriptiva para determinar el promedio y la desviación estándar de cada tratamiento, permitiendo evaluar la variabilidad y reproducibilidad experimental de ambos métodos de lixiviación.

Resultados

Eficiencia de extracción de Litio

Las determinaciones mediante espectroscopía de absorción atómica evidenciaron una mayor capacidad de extracción de litio en el Método A (H_2SO_4) respecto al Método B (ácido acético). La **Figura 1A**, mostró concentraciones significativamente superiores de litio disuelto en los licores obtenidos con ácido sulfúrico, tendencia que se mantuvo en los porcentajes netos de recuperación presentados en la **Figura 1B**, calculados sobre una concentración inicial de 3,15 % p/p de litio en la masa negra.

Estabilidad operativa y dispersión de los datos

En la **Tabla 1**, resumimos el intervalo de confianza y la media de los ensayos realizados para ambos agentes lixiviantes empleados. Estos valores nos indican que existe una mayor dispersión en los resultados obtenidos para el método B (6%) mientras que para el método A existe una menor dispersión de los resultados obtenidos para las 5 réplicas (2,5%). Con la finalidad de comparar estos resultados obtenidos, resumimos los valores de recuperación obtenidos en este trabajo con los valores obtenidos en la literatura (**Tabla 2**).

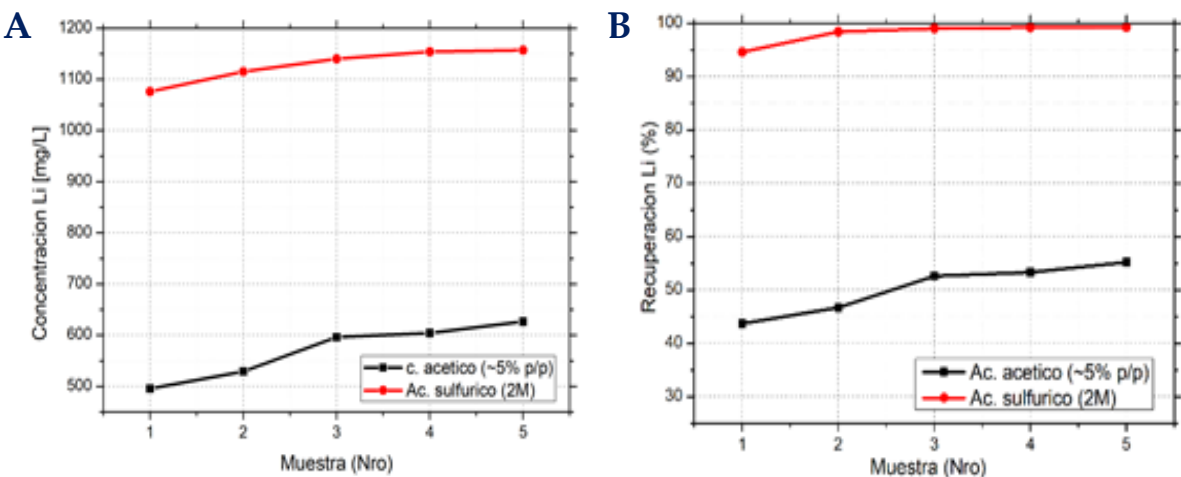


Figura 1. A) Concentración de litio reportado en las soluciones de lixiviación con los distintos agentes y **B)** Porcentaje de recuperación de litio obtenida con ambos lixiviantes.

Tabla 1. Comparación de resultados experimentales y referenciales de literatura

Método	%Recuperación Li
Método A (H_2SO_4 2M)	98,1±2,5%
Método B (Ac. Acético ~5%)	50,3±6,0%

Tabla 2.Comparativa de valores reportados en la literatura y los resultados obtenidos

Agente de lixiviación	Condiciones de estudio	Valor reportado	Referencia
Ácido acético	Reductor de melaza	99,8% Li	(Amalia et al., 2023)
	1,2 M y H2O2 como reductor	99,6% Li	(Sahu et al., 2023)
	1 M y 2ml H2O2	98,83% Li	(Dobó et al., 2023)
	0,87 M (~5% vol)	50,3% Li	Este estudio
Ácido sulfurico	2 M y 6% vol H2O2	96%	(Dobó et al., 2023)
	9,1 g/L	98,5% Li	(Jose et al., 2024)
	2 M y 4% vol H2O2	> 98% Li	(Ali et al., 2025)
	2 M t 2% vol H2O2	98% Li	
	2 M y 4% H2O2	98,8% Li	(Portia et al., 2022)
	2,5 M	97% Li	
	2 M y 5% vol H2O2	98% Li	(Tawonezvi et al., 2023)
	2 M y 5% vol H2O2	94% Li	(Kovačević et al., 2024)
	2 M y 5% vol H2O2	95% Li	(Li et al., 2022)
	2 M (sin uso de H2O2)	98,1% Li	Este estudio

Discusión

Los resultados muestran que el Método A (H₂SO₄ 2 M), alcanzando una recuperación de litio de 98,1 ± 2,5 %. El Método B reporta 50,3 ± 6,0 % (ácido acético comercial) mucho más bajo que lo reportado en la literatura. Esta diferencia se atribuye principalmente a la elevada capacidad de disociación del ácido sulfúrico, que proporciona una mayor disponibilidad de protones (H⁺) capaces de romper la estructura catódica y favorecer la disolución del litio en solución acuosa (Ali et al., 2025; Jose et al., 2024; Kovačević et al., 2024).

Al comparar estos resultados con la literatura, se observa que la eficiencia obtenida con H₂SO₄ es similar e incluso superior a valores reportados en estudios que emplearon agentes reductores como H₂O₂ bajo condiciones más controladas (Ali et al., 2025; Dobó et al., 2023; Portia et al., 2022). Esto sugiere que, bajo las condiciones experimentales aplicadas, el ácido sulfúrico mantiene una alta capacidad de lixiviación aun sin el uso de reductores adicionales, coincidiendo con lo reportado por Tang et al. (2023).

En contraste, el Método B presentó una eficiencia significativamente menor debido a la naturaleza débil del ácido acético y su baja capacidad de disociación, lo que limita la cantidad de protones disponibles para atacar la matriz sólida de la masa negra (Sahu et al., 2023). Además, este tratamiento mostró mayores dificultades operativas durante la filtración y una mayor dispersión experimental. Aunque algunos estudios reportan recuperaciones superiores al 98 % utilizando ácido acético, dichos resultados fueron obtenidos bajo condiciones optimizadas y con la incorporación de agentes reductores orgánicos y sistemas avanzados de agitación (Amalia et al., 2023; Sahu et al., 2023).

En conjunto, los resultados evidencian que la lixiviación con ácido sulfúrico constituye una alternativa eficiente y adaptable para la recuperación de litio en laboratorios académicos con recursos limitados. No obstante, futuras investigaciones deberían enfocarse en optimizar la granulometría del material y evaluar el uso de reductores de bajo costo para mejorar la recuperación simultánea de otros metales presentes en la masa negra tales como el Cobalto y Níquel (Jose et al., 2024).

Conclusión

El estudio confirmó la aplicabilidad de la recuperación hidrometalúrgica de litio en condiciones académicas con limitaciones operativas. El Método A alcanzó una recuperación de 98,1 %, valor comparable con estándares industriales, evidenciando la alta eficiencia del H₂SO₄ aún bajo infraestructura limitada. En contraste, el Método B obtuvo una recuperación de 50,3 %, constituyendo una alternativa funcional para fines académicos de bajo costo. Asimismo, se determinó que la granulometría influye significativamente en la cinética de extracción, restringiendo la recuperación cuando el tamaño de partícula es elevado. Finalmente, el desensamblado inicial de las baterías representó la etapa de mayor riesgo operativo del proceso.

Contribución de los autores

V.E.C.F. y E.T.O.C., conceptualizaron y diseñaron el estudio. **J.M.C.A. y A.M.V.**, procesaron las muestras, analizaron los datos y elaboraron las gráficas. **V.E.C.F.** redactó el manuscrito, **E.T.O.C.**, revisó y validó los resultados, y todos los autores leyeron y aprobaron la versión final.

Declaración de conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflictos de interés

Agradecimientos

Este trabajo fue posible gracias al respaldo institucional de la Universidad Nacional Siglo XX de Llagagua y de la carrera de Ingeniería en Recursos Evaporíticos del Litio. Los autores agradecen al plantel docente por su guía académica y soporte técnico, así como a los estudiantes colaboradores por su valiosa participación en el desarrollo de la fase experimental de la investigación.

Referencias

- Ali, A., Afrin, S., Asif, A. H., Arafat, Y., & Azhar, M. R. (2025). A comprehensive review on the recovery of lithium from lithium-ion batteries and spodumene. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 391). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126512>
- Amalia, D., Singh, P., Zhang, W., & Nikoloski, A. N. (2023). The Effect of a Molasses Reductant on Acetic Acid Leaching of Black Mass from Mechanically Treated Spent Lithium-Ion Cylindrical Batteries. *Sustainability* (Switzerland), 15(17). <https://doi.org/10.3390/su151713171>
- Chacana-Olivares, J., Peceño, B., Grageda, M., Cruz, C., & Rojas, L. (2025). Lithium-ion battery recycling: a perspective on key challenges and opportunities. *Npj Materials Sustainability*, 3(1). <https://doi.org/10.1038/s44296-025-00083-7>
- Jose, S. A., Stoll, J. L., Smith, T., Jackson, C., Dieleman, T., Leath, E., Eastwood, N., & Menezes, P. L. (2024). Critical Review of Lithium Recovery Methods: Advancements, Challenges, and Future Directions. In *Processes* (Vol. 12, Number 10). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/pr12102203>
- Kovačević, A., Tolazzi, M., Sanadar, M., & Melchior, A. (2024). Hydrometallurgical recovery of metals from spent lithium-ion batteries with ionic liquids and deep eutectic solvents. In *Journal of Environmental Chemical Engineering* (Vol. 12, Number 4). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113248>
- Perdana, I., Aprilianto, D. R., Fadillah, F. A., Fadli, R., Petrus, H. T. B. M., Astuti, W., Muflikhun, M. A., Nilasary, H., Oktaviano, H. S., Fathoni, F., Raihan, E., & Muzayanha, S. U. (2025). Lithium recovery from mixed spent LFP-NMC batteries through atmospheric water leaching. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-86542-6>
- Portia, C., Tang, M., Peng, Y., Lu, S., Zheng, L., Zhao, Z., & Zhen, A. (2022). Assessment of recycling methods and processes for lithium-ion batteries. <https://doi.org/10.1016/j.isci>
- Sahu, S., Pati, S., & Devi, N. (2023). A Detailed Kinetic Analysis of the Environmentally Friendly Leaching of Spent Lithium-Ion Batteries Using Monocarboxylic Acid. *Metals*, 13(5). <https://doi.org/10.3390/met13050947>
- Soleimani, A., Karimi, G., & Paydar, M. H. (2025). A comprehensive study on reutilizing recovered Li₂CO₃ in the direct recycling of lithium-ion batteries. *Next Energy*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2025.100318>
- Tang, Y. C., Wang, J. Z., Chou, C. M., & Shen, Y. H. (2023). Material and Waste Flow Analysis for Environmental and Economic Impact Assessment of Inorganic Acid Leaching Routes for Spent Lithium Batteries' Cathode Scraps. *Batteries*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/batteries9040207>
- Tawonezvi, T., Nomnqa, M., Petrik, L., & Bladergroen, B. J. (2023). Recovery and Recycling of Valuable Metals from Spent Lithium-Ion Batteries: A Comprehensive Review and Analysis. In *Energies* (Vol. 16, Number 3). MDPI. <https://doi.org/10.3390/en16031365>