

# EXTRACCIÓN DE METALES CONTENIDOS EN BATERÍAS LI-ION GASTADAS MEDIANTE LIXIVIACIÓN ÁCIDA Y ALCALINA

EXTRACTION OF METAL CONTAINED IN SPENT LI-ION BATERIES BY  
ACID AND ALKALINE LEACHING

BLANCA ROSA GONZÁLEZ  
BONILLA <sup>1-2</sup>

ADRIÁN AMILCARE  
GONZÁLEZ IBARRA <sup>1</sup>

GLORIA IVONE DÁVILA  
PULIDO <sup>1</sup>

ARMANDO SALINAS  
RODRÍGUEZ <sup>2</sup>

MITZUÉ GARZA GARCÍA <sup>1</sup>

1. Escuela Superior de  
Ingeniería, Unidad Norte,  
UAdeC.

2. CINVESTAV, Unidad  
Saltillo.

Correspondencia  
blancagonzalez@uadec.edu.mx  
ORCID: 0009-0006-1812-8346

## RESUMEN

El auge de las tecnologías verdes y el almacenamiento de energía renovable ha impulsado la demanda de baterías Li-ion. Sin embargo, el desecho inadecuado de estas baterías al final de su vida útil es un problema ambiental y económico, ya que contienen elementos como el cobalto (Co), litio (Li), cobre (Cu), aluminio (Al), entre otros. En el presente trabajo se evaluó la extracción de metales a partir de baterías Li-ion en desuso mediante lixiviación ácida y alcalina. Las pruebas de lixiviación se realizaron utilizando peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) como agente oxidante y ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) e hidróxido de amonio ( $NH_4OH$ ) como agentes lixiviantes. Se utilizó una relación sólida/líquido de 1:10 y la temperatura se evaluó en 60 y 70 °C. El contenido metálico del compuesto fue de 23.9 % Co, 13.8 % Cu, 4.4 % Al y 2.2 % Li. Mediante lixiviación ácida con  $H_2SO_4$  2M, las extracciones de Al, Li y Co fueron mayor al 90 %, mientras que para el Cu la extracción más alta fue de 69.4 %. Se concluye que la lixiviación alcalina fue selectiva; las extracciones más altas de Cu y Al fueron de 48.8 y 19.6 %, respectivamente, mientras que las de Li y Co fueron inferiores al 1 %, sin importar las condiciones evaluadas.

**Palabras clave:** baterías Li-ion; reciclaje; lixiviación; metales.

Fecha de recepción  
5 de diciembre de 2024.

Fecha de aceptación  
15 de enero de 2025.

## ABSTRACT

*The rise of green technologies and renewable energy storage has driven the demand for Li-ion batteries. However, the improper disposal of these batteries at the end of their life cycle poses environmental and economic challenges, as they contain elements such as cobalt (Co), lithium (Li), copper (Cu), aluminum (Al), among others. In this study, the extraction of metals from spent Li-ion batteries was evaluated through acidic and alkaline leaching. Leaching tests were conducted using hydrogen peroxide ( $H_2O_2$ ) as an oxidizing agent and sulfuric acid ( $H_2SO_4$ ) and ammonium hydroxide ( $NH_4OH$ ) as leaching agents. A solid/liquid ratio of 1:10 was employed, and temperatures of 60 and 70 °C were assessed. The metallic content of the composite was 23.9% Co, 13.8% Cu, 4.4% Al, and 2.2% Li. Using acidic leaching with 2M  $H_2SO_4$ , the extraction rates of Al, Li, and Co exceeded 90%, while the highest Cu extraction was 69.4%. It was concluded that alkaline leaching exhibited selectivity; the highest extractions of Cu and Al were 48.8% and 19.6%, respectively, while the extractions of Li and Co were below 1%, regardless of the evaluated conditions.*

**Keywords:** Li-ion batteries; recycling; leaching; metals.

## INTRODUCCIÓN

La adopción de nuevas tecnologías de vanguardia ha desempeñado un papel fundamental en el aumento constante del uso de baterías para los dispositivos electrónicos y vehículos eléctricos (Shaqsi y col., 2020). Entre las más comunes se encuentran las de níquel-hidruro metálico (NiMH), iones de litio (LIB), plomo-ácido (Pb-ácido) y níquel-cadmio (Ni-Cd). Sin embargo, debido a su rendimiento, las baterías de iones de litio son actualmente las más utilizadas y consumidas a nivel mundial (Tawonezvi y col., 2023).



Las LIBs están compuestas por metales como el cobre (Cu), aluminio (Al), litio (Li), cobalto (Co), manganeso (Mn) y níquel (Ni) (Ordóñez y col., 2016). En este sentido, las baterías gastadas representan una fuente de metales críticos y de alto valor económico. No obstante, su descarte inadecuado se convierte en un problema para el ecosistema y la salud pública (Hannis, 2009). Se estima que para el año 2030, la producción anual de LIBs alcanzará los 2 millones de toneladas a nivel global (Jacoby M, 2019). Sin embargo, en la actualidad, menos del 5 % de estas baterías son recicladas, lo que significa que el resto termina en vertederos (Heelan y col., 2016). Dicho esto, el reciclaje y la extracción de metales valiosos de las baterías gastadas puede contribuir a reducir la contaminación ambiental y a la economía circular (Zheng y col., 2018).

Los procesos para el reciclaje de baterías se centran en el uso de métodos pirometalúrgicos o hidrometalúrgicos (Harper y col., 2019). Los procesos pirometalúrgicos incluyen el pretratamiento, la tostación y la fundición. El pretratamiento del material se realiza antes de tostarlo para obtener el material del cátodo. Las tendencias actuales en el reciclaje de baterías de iones de litio gastadas apuntan a utilizar métodos de pretratamiento térmico como la incineración y pirólisis (Makuza y col., 2021). Sin embargo, requiere de un alto capital debido al consumo energético y a los complicados mecanismos de tratamiento de los gases residuales (Friedrich y col., 2017).

Por otro lado, la hidrometalurgia abarca el pretratamiento para la recuperación del cátodo, seguido de la lixiviación, purificación y técnicas de recuperación como la precipitación selectiva, el intercambio iónico o la extracción con solventes. Aunque se han obtenido resultados prometedores con estos métodos, aún es necesario llevar a cabo investigaciones adicionales para desarrollar estrategias de reciclaje eficientes a gran escala. La optimización de estos procesos es crucial para mejorar la rentabilidad y la sostenibilidad del reciclaje de baterías Li-ion (Shi y col., 2019).

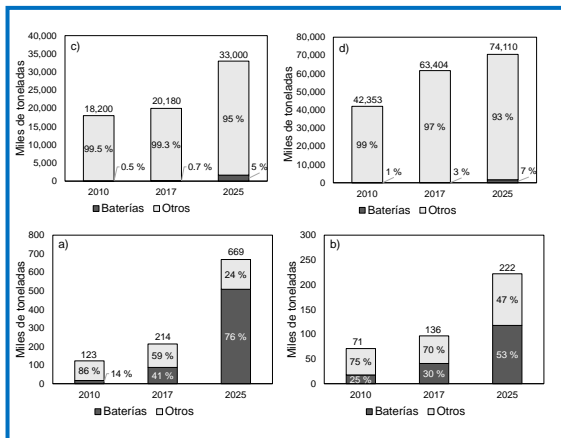


En esta investigación se proporciona una revisión actualizada sobre la demanda y los precios de metales críticos como el cobre, aluminio, litio y cobalto. Por otra parte, el objetivo principal consiste en evaluar un proceso hidrometalúrgico mediante pruebas de lixiviación en medio ácido y alcalino para la extracción de metales contenidos en las baterías Li-ion en desuso.

### Demanda y precio de los metales: cobre, aluminio, litio y cobalto

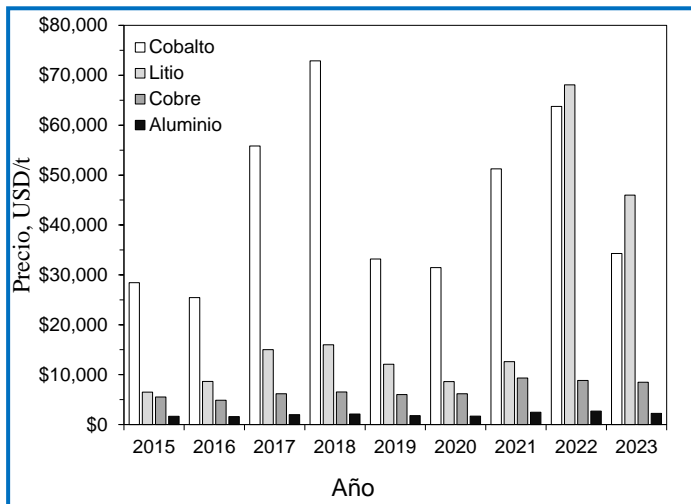
Según la literatura (Cruz-Rivera, 2007; Vargas-Hernández y Noruzi, 2010; Mainali y col., 2021b), el reciclaje de baterías de Li-ion representa una industria emergente con un potencial significativo para contribuir a la sostenibilidad ambiental y económica. Además, la adopción de fuentes de almacenamiento de energía y tecnologías limpias está impulsando la demanda de diversos metales (Kamran y col., 2023).

En los últimos años, la demanda de metales como Co, Li, Cu y Al para las baterías ha crecido significativamente (ver Figura 1). En 2010, el 14 % de la producción de litio (medido en carbonato de litio, LCE) se destinaba a la fabricación de baterías. Sin embargo, esta demanda aumentó a 41 % en 2017 y se espera que alcance el 76 % en 2025. De manera similar, la demanda de cobalto incrementó del 25 % en 2010 al 30 % en 2017 y se espera que alcance el 53 % en 2025. El cobre y el aluminio, si bien no experimentan un crecimiento tan abrupto, también muestran una tendencia al alza.



**Figura 1.** Producción y demanda proyectada al año 2025 de a) litio (LCE), b) cobalto, c) cobre y d) aluminio por tipo de uso (Azevedo y col., 2018; Wu, 2022; International Copper Association, 2024).

La Figura 2 muestra el comportamiento de los precios del cobalto, litio, cobre y aluminio durante el período 2015-2023, según datos del Fondo Monetario Internacional (FMI). En los últimos 8 años, se han observado variaciones importantes en el precio del litio y el cobalto en comparación con el precio del cobre y aluminio, los cuales no presentaron cambios importantes durante este periodo. Desde el 2015 hasta el 2018, los precios del cobalto y el litio (LCE) experimentaron un crecimiento importante. El precio del cobalto por tonelada aumentó de U\$28,451.6 a U\$72,911.2, mientras que el precio del LCE pasó de U\$6,500 a U\$16,000 al final de este período. El pico más alto para el precio del LCE se registró en 2022, llegando a U\$41,695 mientras que el precio del cobalto descendió a U\$63,764.7. En 2023, los precios del litio y el cobalto disminuyeron aproximadamente un 32.8 % y un 46.2 %, respectivamente, con respecto al año anterior. Si bien, los precios de los metales han experimentado fluctuaciones recientemente, el reciclaje de baterías de Li-ion (LIB) es una oportunidad de inversión atractiva y duradera, ya que la demanda constante de metales críticos para las diferentes industrias garantiza un mercado estable a largo plazo.



**Figura 2.** Precios del cobalto, litio, cobre y aluminio 2015-2023 (Fondo Monetario Internacional [FMI], 2024).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### MATERIALES

En este trabajo se emplearon baterías Li-ion en desuso provenientes de teléfonos celulares como materia prima. Se utilizó cloruro de sodio (NaCl) de grado comercial para llevar a cabo el proceso de descarga de las baterías. Los experimentos de lixiviación se llevaron a cabo utilizando ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) e hidróxido de amonio ( $NH_4OH$ ) grado reactivo. En todos los experimentos se utilizó agua desionizada.

### MÉTODOS

#### Preparación y caracterización de la muestra

Las baterías se sometieron a un proceso de descarga en una solución de NaCl al 5 % durante 48 horas. Tras completar la descarga, el material se secó durante 48 horas a temperatura ambiente. Posteriormente, se llevaron a cabo operaciones mecánicas para dismantelar y separar los componentes de interés (i.e., óxido de litio cobalto, grafito, láminas de cobre y aluminio). La molienda de los componentes se llevó a cabo en una licuadora de laboratorio (Waring, modelo WF-2211212) para obtener una fracción de tamaño  $< 1$  mm, el cual se clasificó granulométricamente utilizando la serie Tyler de malla N° 25, 60, 80, 100 y 140. El contenido de Cu, Al, Co y Li en cada fracción se obtuvo mediante espectrometría de absorción atómica (Perkin Elmer, modelo AAnalyst 200).

#### Pruebas de lixiviación

Se evaluaron dos métodos de lixiviación: (1) lixiviación en medio ácido con  $H_2SO_4$  a  $70$  °C y (2) lixiviación alcalina utilizando  $NH_4OH$  a  $60$  °C. Las pruebas se llevaron a cabo en un reactor de vidrio de 250 mL sobre una parrilla eléctrica para el control de la temperatura y la agitación magnética de la suspensión se mantuvo constante en 250 rpm. En todas las pruebas se mantuvo una relación sólido-líquido de 1:10 y el tiempo de reacción fue de tres horas.



Al término de la prueba experimental, los sólidos resultantes fueron secados a temperatura ambiente y se analizaron mediante un espectrómetro portátil de fluorescencia de rayos-X (Olympus X, modelo DPO2000-cc) para la determinación semicuantitativa de los elementos que permanecieron en el residuo sólido y determinar el porcentaje de extracción. Todas las pruebas se realizaron por duplicado y se reporta el valor promedio, así como su desviación estándar ( $\sigma$ ).

En las Tablas 2 y 3 se muestran las condiciones experimentales empleadas durante las pruebas de lixiviación en medio ácido y alcalino, respectivamente.

**Tabla 2.** Condiciones experimentales para las pruebas de lixiviación en medio ácido.

Prueba	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , mol/L	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , % en peso
1	2	2
2	1	-
3	2	-
4	3	-

**Tabla 3.** Condiciones experimentales para las pruebas de lixiviación en medio alcalino.

Prueba	NH <sub>4</sub> OH, mol/L	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , % en peso
1	4	-
2	4	2
3	4	4
4	4	6

## RESULTADOS Y DISCUSIONES

### Caracterización de la muestra de estudio

En la Tabla 4 se presentan los contenidos metálicos (porcentaje en peso, wt %) de los elementos de interés en cada fracción de tamaño, así como en el compósito del material. Se puede ver que el contenido de aluminio y cobre más alto se situó en las fracciones de tamaño +710  $\mu\text{m}$  y -710/+250, respectivamente (i.e., 29.8 y 70.6 %). Asimismo, la fracción de tamaño que mostró el contenido más alto de cobalto y litio (35.4 y 3.3 %, respectivamente) fue de -173/+150  $\mu\text{m}$ . Por otra parte, el compósito de baterías presentó en promedio un contenido de Cu, Al, Co y Li de 13.8, 4.4, 23.9 y 2.2 %, respectivamente. Estos resultados resaltan el potencial de las baterías como una fuente de materia prima para la obtención de metales.

**Tabla 4.** Contenido de los elementos de interés en baterías Li-ion (wt %).

Tamaño de partícula, $\mu\text{m}$	Cobre	Aluminio	Cobalto	Litio
+710	8.7	29.8	17.2	1.4
-710/+250	70.6	12.9	9.9	0.9
-250/+177	11.9	1.2	28.9	2.7
-177/+150	2.1	0.5	35.4	3.3
-150/+106	6.1	0.3	25.9	2.4
-106	0.6	0.2	11.2	1.4
Compósito	13.8	4.4	23.9	2.2

### Lixiviación en medio ácido

La Tabla 5 muestra los resultados de la extracción de Cu, Al, Co y Li mediante lixiviación ácida. En general, la extracción de los elementos Al, Co y Li fue superior al 90 %. Las condiciones óptimas de lixiviación se observaron cuando se utilizó una concentración de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  de 2 M, en la que también se logró la mayor extracción de Cu, es decir, 69.4 %. Si bien la lixiviación ácida demostró ser efectiva, es importante resaltar la falta de selectividad del método. Para abordar este problema, se propone la implementación de un proceso de



recuperación posterior a la lixiviación, mediante técnicas como la precipitación selectiva mediante la variación del pH. Esta técnica permitiría separar los diferentes metales disueltos en función de su solubilidad a diferentes niveles de pH, mejorando así la pureza de los metales recuperados. Adicionalmente, se presenta la desviación estándar para cada uno de los elementos determinados, corroborando la reproducibilidad y confiabilidad de los resultados.

**Tabla 5.** Extracción de Cu, Al, Co y Li mediante lixiviación ácida.

Condiciones	2M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> / 2 % H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>		1M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		2M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		3M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	
	% <sup>a</sup>	σ <sup>b</sup>	% <sup>a</sup>	σ <sup>b</sup>	% <sup>a</sup>	σ <sup>b</sup>	% <sup>a</sup>	σ <sup>b</sup>
Cobre	22.65	0.64	7.50	0.14	69.41	0.42	42.20	0.85
Aluminio	90.52	0.27	75.85	0.49	91.60	0.57	93.40	0.99
Cobalto	99.79	0.13	96.25	0.21	99.22	0.57	98.35	0.64
Litio	99.68	0.11	96.29	0.28	99.21	0.85	98.20	0.99

<sup>a</sup>Extracción promedio de metal, %

<sup>b</sup>Desviación estándar, n=2

### Lixiviación en medio alcalino

La Tabla 6 muestra los resultados de la extracción de cada elemento mediante lixiviación alcalina, utilizando diferentes concentraciones de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Se puede observar que el aumento de la concentración del agente oxidante tiene un efecto en la extracción de cobre y aluminio. Al utilizar 4 M de NH<sub>4</sub>OH y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 4 %, se alcanzó una extracción de Cu y Al de 48.7 y 8.2 %, respectivamente. Sin embargo, aumentar la concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %, resultó en una disminución del 10.4 % en la extracción de Cu (i.e., 48.8 % al 37.4 %), mientras que la extracción de Al aumento hasta 19.6 %. Por otra parte, la extracción de Co y Li fue insignificante (< 1 %) para todas las condiciones estudiadas. Este método resultó ser selectivo, permitiendo disolver una buena proporción del Cu y Al del material, lo cual permite que los compuestos en el residuo sólido (p. ej., LiCoO<sub>2</sub>) puedan ser recuperados en una etapa posterior como la lixiviación ácida. Asimismo, se proporciona la



desviación estándar de cada uno de los elementos analizados, destacando su importancia como indicador estadístico para garantizar la reproducibilidad y confiabilidad de los resultados obtenidos.

**Tabla 6.** Extracción de Cu, Al, Co y Li mediante lixiviación alcalina.

Condiciones	4M NH <sub>4</sub> OH		4M NH <sub>4</sub> OH/ 2 % H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>		4M NH <sub>4</sub> OH/ 4 % H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>		4M NH <sub>4</sub> OH/ 6 % H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	
	% <sup>a</sup>	σ <sup>b</sup>	% <sup>a</sup>	σ <sup>b</sup>	% <sup>a</sup>	σ <sup>b</sup>	% <sup>a</sup>	σ <sup>b</sup>
Elemento								
Cobre	7.80	0.42	41.65	1.48	48.75	1.06	37.40	0.42
Aluminio	3.91	0.85	4.89	0.99	8.28	0.93	19.60	1.13
Cobalto	0.20	0.02	0.53	0.16	0.39	0.12	0.84	0.11
Litio	0.19	0.06	0.40	0.02	0.42	0.01	0.81	0.12

<sup>a</sup>Extracción promedio de metal, %

<sup>b</sup>Desviación estándar, n=2

## CONCLUSIONES

La industria del reciclaje de baterías de iones de litio (LIB) representa una oportunidad significativa debido al crecimiento constante de la electromovilidad. Además, existen oportunidades de inversión en el mercado del reciclaje de LIBs, dado su potencial de rentabilidad y beneficio económico respaldado por la creciente demanda y precios de los metales contenidos en estas baterías.

La investigación realizada permitió evaluar un tratamiento de lixiviación para la extracción de metales valiosos contenidos en las baterías Li-ion. Este enfoque ofrece una estrategia prometedora para el reciclaje de LIBs, maximizando la recuperación de los metales contenidos en estos dispositivos.

Los resultados indican que el material compuesto de las baterías presentó contenidos significativos de Cu (13.8 %), Al (4.4 %), Co (23.9



%) y Li (2.2 %). Se observó que la lixiviación ácida de baterías Li-ion con 2 M de  $H_2SO_4$  a 70 °C, sin la adición de un agente oxidante ( $H_2O_2$ ) fue eficaz para la extracción de Li y Co, alcanzando valores del 99 %. Mientras que las extracciones de Cu y Al se situaron en 69.4 y 91.6 %, respectivamente. Por otro lado, la lixiviación en medio alcalino con  $NH_4OH$  y  $H_2O_2$  resultó ser un método selectivo para la extracción de Cu y Al sobre el resto del contenido metálico. Esto es importante, ya que podría implementarse en la ruta de procesamiento de las LIBs gastadas, seguida de una etapa de lixiviación ácida para la recuperación selectiva de los elementos de Li y Co.

## REFERENCIAS

- International Copper Association. (2024). Annual reports - International Copper Association. [En línea]. Disponible en: <https://internationalcopper.org/annual-reports/>. Fecha de consulta: 14 de mayo de 2024.
- Azevedo, M., Campagnol, N., Hagenbruch, T., Hoffman, K., Lala, A., & Ramsbottom, O. (2018). Lithium and cobalt: A tale of two commodities. New York, McKinsey & Company.
- Cruz-Rivera, R. (2007). Implementation of end-of-life vehicle's recycling for developing countries: Case study, Mexico (Tesis doctoral). Brandenburg Technical University, Brandenburg, Germany.
- Friedrich, B., Peters, L. (2017). Status and trends of industrialized Li-ion battery recycling processes with qualitative comparison of economic and environmental impacts, Proc. 22<sup>nd</sup> ICBR-International Congr. Batter. Recycl. Lisbon, Port: 20–22.
- Hannis, S., & Bide, T. (2009). Cobalt. Commodity Profile. British Geological Survey.
- Harper G, Sommerville R, Kendrick E, et al. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature*. 2019, 575(7781): 75-86. DOI: 10.1038/s41586-019-1682-5
- Heelan, J., Gratz, E., Zheng, Z., Wang, Q., Chen, M., Apelian, D., & Wang, Y. (2016). Current and Prospective Li-Ion Battery Recycling and Recovery Processes. *JOM*, 68(10): 2632-2638. DOI: 10.1007/s11837-016-1994-y



- Fondo Monetario Internacional (FMI). (2023). *Primary commodity prices*. [En línea]. Disponible en: <https://data.imf.org/?sk=471ddd8-d8a7-499a-81ba-5b332c01f8b9>. Fecha de consulta: 11 de mayo de 2024.
- Jacoby, M., (2019). It's Time to Get Serious about Recycling Lithium-Ion Batteries. [En línea]. Disponible online: <https://cen.acs.org/materials/energy-storage/time-serious-recycling-lithium/97/i28>. Fecha de consulta: 15 de mayo de 2024.
- Kamran, M., Raugei, M., & Hutchinson, A. R. (2023). Critical elements for a successful energy transition: A systematic review. *Renewable And Sustainable Energy Transition*, 4: 100068. DOI: 10.1016/j.rset.2023.100068
- Mainali B, Mahapatra K, & Pardalis G. (2020). Strategies for deep renovation market of detached houses. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138: 110659. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110659
- Makuza, B., Tian, Q., Guo, X., Chattopadhyay, K., & Yu, D. (2021). Pyrometallurgical options for recycling spent lithium-ion batteries: A comprehensive review. *Journal Of Power Sources*, 491: 229622. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2021.229622
- Ordóñez, J., Gago, E. J., & Girard, A. (2016). Processes and technologies for the recycling and recovery of spent lithium-ion batteries. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 60: 195-205. DOI: 10.1016/j.rser.2015.12.363
- Shaqsi, A. Z. A., Sopian, K., & Al-Hinai, A. (2020). Review of energy storage services, applications, limitations, and benefits. *Energy Reports*, 6: 288-306. DOI: 10.1016/j.egy.2020.07.028
- Shi, J., Peng, C., Chen, M., Li, Y., Eriç, H., Klemettinen, L., Lundström, M., Taskinen, P., & Jokilaakso, A. (2019). Sulfation Roasting Mechanism for Spent Lithium-Ion Battery Metal Oxides Under SO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-Ar Atmosphere. *JOM*, 71(12): 4473-4482. DOI: 10.1007/s11837-019-03800-5
- 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. *Energies*, 16(3): 1365. DOI: 10.3390/en16031365
- Vargas-Hernández, J. G., & Noruzi, M. R. (2010). An analytic study of Mexico in economics, social, political, environmental, and sustainable development trends by the year 2030. [En línea]. DOAJ (Directory of Open Access Journals). Disponible en:



<https://doaj.org/article/d2cf536f668841fbab99f5df7316c7c7>. Fecha de consulta: 20 de mayo de 2024.

- Wu, L. (2022). *Primary Aluminium Production - International Aluminium Institute*. International Aluminium Institute - Through The IAI. [En línea]. Disponible en: <https://international-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-production/>. Fecha de consulta: 20 de mayo de 2024.
- Zheng, X., Zhu, Z., Lin, X., Zhang, Y., He, Y., Cao, H., & Sun, Z. (2018). A Mini-Review on Metal Recycling from Spent Lithium-Ion Batteries. *Engineering*, 4(3): 361-370. DOI: 10.1016/j.eng.2018.05.018