

Extraction of Cobalt in Lithium-Ion Batteries by Leaching with Lemon Peel (*Citrus x aurantifolia*)

Muñoz Naranjo Diego, M.Sc.¹, Andrade Jean-Carlo, M.Sc.², and Meza Freire Yolanda, Ing.¹

¹Agrarian University of Ecuador, Ecuador, dmunoz@uagraria.edu.ec, yolandameza11@gmail.com

² Agrarian University of Ecuador, Ecuador, jandrade@uagraria.edu.ec

Extracción de Cobalto en Baterías de Ion Litio Mediante Lixiviación con Cáscara de Limón (*Citrus x aurantifolia*)

Muñoz Naranjo Diego, M.Sc.¹, Andrade Jean-Carlo, M.Sc.², and Meza Freire Yolanda, Ing.¹

¹Universidad Agraria del Ecuador, Ecuador, dmunoz@uagraria.edu.ec, yolandameza11@gmail.com

²Universidad Agraria del Ecuador, Ecuador, jandrade@uagraria.edu.ec

Abstract– Given the growing demand for electronic products, the manufacture of lithium batteries (LIBs), follows the same trend. LIBs contain cobalt, a metal that is rare and expensive. The recent depletion of reserves of this element encouraged the development of hydrometallurgical processes that generate a less negative impact on the environment, such as the one proposed in this study. Four treatments were used with different doses of lemon peel and concentrations of hydrogen peroxide, establishing parameters such as extraction time (90 min.), temperature (± 90 °C), and solid/liquid ratio (10 g/L). According to the results, treatment 4 showed the maximum cobalt leaching efficiency reaching 51.91%, using 3 g of lemon peel and a concentration of 10% hydrogen peroxide. Demonstrating that the use of lemon peels to recover cathode cobalt from spent LIBs can be an ecological and sustainable strategy to minimize the environmental footprint of both types of waste.
Keywords: batteries, lithium, recovery, cobalt, lemon peel

Resumen– Ante la creciente demanda de productos electrónicos la fabricación de baterías de litio (LIBs), sigue la misma tendencia. Las LIBs contienen cobalto, un metal que es escaso y costoso. El reciente agotamiento de las reservas de este elemento, incentivaron el desarrollo de procesos hidrometalúrgicos que generen un menor impacto negativo al ambiente, como el que se plantea en este estudio. Se utilizaron 4 tratamientos con diferentes dosis de cáscara de limón y concentraciones de peróxido de hidrogeno, y estableciendo parámetros como tiempo de extracción (90 min.), temperatura (± 90 °C) y relación sólido/líquido (10 g/L). De acuerdo con los resultados, el tratamiento 4 demostró la eficiencia máxima de lixiviación de cobalto alcanzando el 51.91 %, empleando 3 g de cáscara de limón y una concentración de peróxido de hidrogeno del 10 %. Demostrando que, el uso de cáscaras de limón para recuperar cobalto del cátodo de LIBs gastadas, puede ser una estrategia ecológica y sostenible para minimizar la huella ambiental de ambos tipos de residuos.
Palabras clave: baterías, litio, recuperación, cobalto, cáscara, limón

INTRODUCCIÓN

A principios de la década de 1980, Akira Yoshino, desarrolló la batería de litio por la necesidad creciente de baterías recargables de mayor capacidad y menor peso, completándose el prototipo en 1986 [1].

Las LIBs se utilizan ampliamente para el almacenamiento de energía en muchas tecnologías, desde dispositivos portátiles hasta vehículos eléctricos. En comparación con otros tipos de baterías dentro su grupo como las de níquel-cadmio o níquel-hidruro, las baterías de iones de litio presentan un rendimiento eléctrico superior [2].

Las baterías de litio (LIBs) contienen Fe, C, Al, Cu, Li, Co y Ni como metales valiosos, LiPF₆ como material peligroso y contienen un 0.3 a 0.4% en peso de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos conocidos como RAEE [3].

En el 2000, la producción mundial de LIBs alcanzó aproximadamente 500 millones de celdas. A raíz de este consumo, los desechos de LIBs se estiman anualmente en 200-500 toneladas métricas, con un contenido de metal de 5-15 % en peso de Co y 2-7 % en peso de Li [4].

El creciente empleo de LIBs incentiva la extracción de cobalto, uno de los metales de transición menos abundante, con un elevado costo económico y ligado a problemas políticos y éticos [5], enfrenta el agotamiento de sus reservas [6], que amenaza la satisfacción de la demanda futura.

Las LIBs gastadas que no son enviadas a un proceso de reciclaje adecuado, a menudo son desechadas en vertederos. La eliminación directa de grandes cantidades de LIBs gastadas provoca varios problemas ambientales, como la liberación de sustancias tóxicas y los peligros de incendio/explosión dentro de los vertederos debido que causar daños físicos o colocar las celdas en condiciones adversas desencadena fácilmente reacciones químicas no deseadas [7].

I.

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.375>

ISBN: 978-628-95207-0-5 ISSN: 2414-6390

Por eso es importante mirar a las LIBs usadas o desgastadas como un recurso secundario importante para la extracción de metales como Co y Li, debido a que el cobalto (Co) es un metal raro y precioso, y es un material relativamente caro en comparación con los otros componentes de las LIBs, y el litio (Li) también es de vital importancia en muchas aplicaciones industriales [7].

La hidrometalurgia, pirometalurgia y biometalurgia son los procedimientos generalmente utilizados para extraer los metales contenidos en el cátodo de las LIBs. Sin embargo, la hidrometalurgia, resulta ser una técnica eficiente con respecto al tiempo de operación, temperatura requerida y costo [2].

La lixiviación, es una operación de la hidrometalurgia para la extracción de metales usando ácidos orgánicos como el ácido cítrico, ácido DL-málico, ácido oxálico, ácido tartárico, ácido succínico, ácido fórmico, ácido láctico y ácido aspártico [8].

Es por este motivo que la alternativa de reciclaje del cobalto se ha considerado oportuna, procurando que la disponibilidad del metal se mantenga en el tiempo; además de la minimización de su disposición en vertederos [9].

Extraer el cobalto para su posterior recuperación es fundamental, por eso es necesario encontrar métodos amigables con el ambiente, de esta manera se cuida el ecosistema, se garantiza la salud humana y se gestiona la sostenibilidad de los recursos.

El propósito de esta investigación fue extraer cobalto en baterías de ion litio mediante lixiviación con cáscara de limón (*Citrus x aurantifolia*) para su posterior recuperación. La viabilidad de escalamiento es un factor importante que no ha sido considerado en esta investigación pero que, sin embargo, representa una potencial oportunidad en base a los resultados obtenidos, que demostraron ser favorables.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Se recolectaron 39 baterías de ion litio desgastadas, provenientes de equipos móviles de los hogares del sector Abel Gilbert, Guayaquil, Ecuador. De estas, se seleccionaron 24 baterías para el estudio, bajo el criterio de poseer un cátodo de LiCoO₂.

A. Descarga de las baterías de ion-litio

Se comprobó inicialmente la carga de las baterías con un multímetro, y por poseer carga remanente, se sumergieron en una solución de Na₂SO₄ al 10% peso/volumen por 24 h. Posteriormente, se removieron las baterías de la solución y se lavaron con agua destilada.

A continuación, se comprobó que la carga de las mismas fuera de 0 voltios, de otro modo, aquellas que conservaban carga se sumergieron nuevamente en dicha solución por 24 h más.

Verificada la carga nula de las baterías, se procedió a perforar la cubierta plástica empleando una jeringuilla, con lo cual, se aseguró la evaporación de cualquier remanente de la solución.

B. Obtención del cátodo

Las baterías descargadas se desmantelaron manualmente para acceder al interior de la misma y separar el cátodo de los demás componentes.

C. Disolución del colector de corriente

Debido a que el cátodo se encuentra adherido a una lámina de aluminio, se diluyó la misma en una solución de NaOH 2M por 2h, con una relación cátodo/solución correspondiente a 1:4. La reacción generada fue:



Finalizado el tiempo estipulado, se dejó sedimentar el material activo del cátodo por 2 h más y, entonces, se extrajo manualmente el sólido.

D. Secado, calcinación y molienda

El cátodo se secó en un horno a 60 °C por 24 h para eliminar trazas de hidróxido de sodio. Luego, se calcinó a 700 °C por 24 h en una mufla para asegurar la evaporación de compuestos orgánicos como carbono y fluoruro de polivinilideno. Finalmente, se molió con un mortero para reducir el tamaño de las partículas, hasta que sean visualmente más finas.

E. Pretratamiento de la cáscara de limón

Las cáscaras de limón se secaron en la estufa a 60 °C durante 4 h, luego se molieron y tamizaron. Luego, se determinó la distribución del tamaño de partícula aplicando la ecuación (2) de Guevara y Vargas [10] que se detalla a continuación:

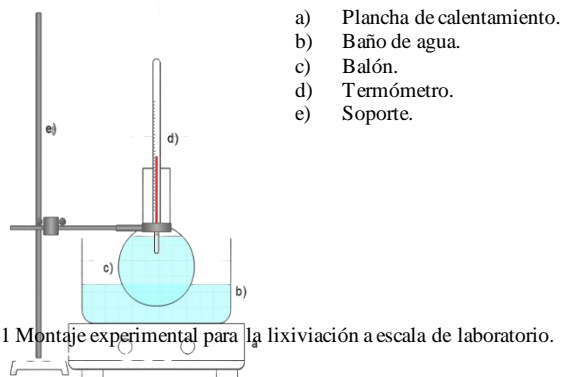
$$\frac{Ab_n + Ab_{n-1}}{2} \quad (2)$$

Donde: $Dp_i = 2$
 Dp_i : Diámetro de la partícula.
 Ab_n : Abertura malla.
 Ab_{n-1} : Abertura malla anterior.

El tamaño medio de partícula fue de 0.450 mm. Se utilizó una malla como cobertura y otra, se colocó por debajo del medio. Las aberturas de las mallas fueron de 0.50 mm y 0.35 mm siendo seleccionadas las mallas número 35, 40 y 45 según las normas ASTM E11.

F. Lixiviación

El modelo del montaje experimental se basó en el de Wang [11], el cual describe una plancha de calentamiento, baño de agua, balón, termómetro y soporte. La Fig. 1 muestra el modelo descrito.



- a) Plancha de calentamiento.
- b) Baño de agua.
- c) Balón.
- d) Termómetro.
- e) Soporte.

Fig. 1 Montaje experimental para la lixiviación a escala de laboratorio.

Para la presente investigación se planteó un diseño completamente al azar, el cual comprende de 4 tratamientos. En cada tratamiento se mantuvieron fijos los siguientes parámetros: tiempo de extracción (90 min.), temperatura ($\pm 90^\circ\text{C}$) y relación sólido/líquido (10 g/L).

Los tratamientos evaluados en la experimentación de esta investigación se detallan en la Tabla I.

TABLA I
TRATAMIENTOS EVALUADOS

Tratamiento	Cáscara de limón (g)	Concentración de peróxido de hidrógeno (%)
1	2	2.5
2	2.5	5
3	2.5	10
4	3	10

Para el proceso de lixiviación se pesó en una balanza analítica con exactitud la cantidad fija de 0.5 g de material activo, es decir cátodo pretratado y se preparó una solución de 50 mL de peróxido de hidrógeno según el porcentaje del tratamiento a evaluar.

Como se muestra en la Fig. 2, el cátodo calcinado se agregó a la solución de peróxido de hidrógeno junto con la cáscara de limón y de manera posterior la solución preparada alcanzó la temperatura de reacción establecida de $\pm 90^\circ\text{C}$ y el proceso de lixiviación duró 90 min.



Fig. 2 Cátodo de las LIBs sin calcinar (a) y cátodo de las LIBs después de la calcinación (b).

Cuando el proceso de lixiviación finalizó se extrajo la muestra restante de la lixiviación y se analizó por espectrometría de absorción atómica para la determinación de la concentración de cobalto.

Para la estimación de la eficiencia de lixiviación de cobalto se empleó (3) de Chen [12] que expresa:

$$L = \frac{C_0 \times V_0}{m \times w\%} * 100 \quad (3)$$

Donde:

L = Eficiencia de lixiviación de los metales.

C_0 = Concentración de iones metálicos en el licor de lixiviación en g/L.

V_0 = Volumen del licor de lixiviación en litros.

m = Masa empleada de cátodo en gramos.

w% = Fracción másica de los distintos metales en la muestra inicial.

III. RESULTADOS

El análisis de la distribución del tamaño de partícula de las cáscaras de limón dio como resultados los indicados en la Fig. 3.

Como se muestra en la Fig. 3, el diámetro de las cáscaras de limón varía entre 0.390 - 0.550 mm, representando un 73.71%, aquellas de 0.463 mm de diámetro. Maldonado [13] recomienda utilizar las cáscaras retenidas en un tamiz de 0.350 mm de abertura, quedando en esta categoría aquellas con un diámetro de 0.390 mm que representan un 20.33% del total.

Una vez analizada la muestra de cátodo pretratado, se obtuvo una concentración de cobalto de 0.175 % w.

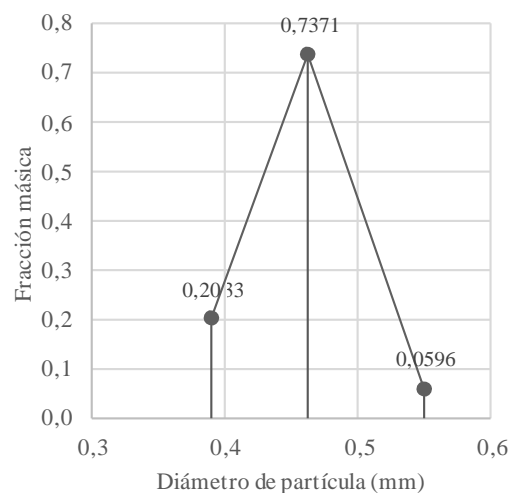


Fig. 3 Distribución del tamaño de partícula de las cáscaras de limón pretratada.

Las concentraciones de cobalto en el licor de lixiviado de cada tratamiento aplicado se detallan en la Tabla II.

Como se observa en la Tabla II, los tratamientos 3 y 4 obtuvieron las mayores concentraciones de cobalto en el licor de lixiviado analizado.

TABLA II
CONCENTRACIÓN DE COBALTO DEL LICOR DE LIXIVIADO

Tratamientos	Porcentaje (%) de eficiencia
1	11.1
2	25.27
3	50.09
4	51.91

Es necesario indicar que, durante la experimentación, el tratamiento 1 mostró una coloración café y menos cantidad de espuma, como respuesta de la reacción a diferencia de los otros tratamientos donde se observó el color amarillo.

Del mismo modo los tratamientos 2, 3, y 4 no presentaron diferencias significativas, por tanto, se concluye que resultan eficientes al mismo grado, para la extracción de cobalto; a excepción del tratamiento 1, el cual difiere estadísticamente de los tratamientos 3 y 4.

En la Fig. 4 se resume la eficiencia evaluada entre los tratamientos. De entre los análisis efectuados, se obtuvo que los tratamientos 1 y 2 no son significativamente diferentes.

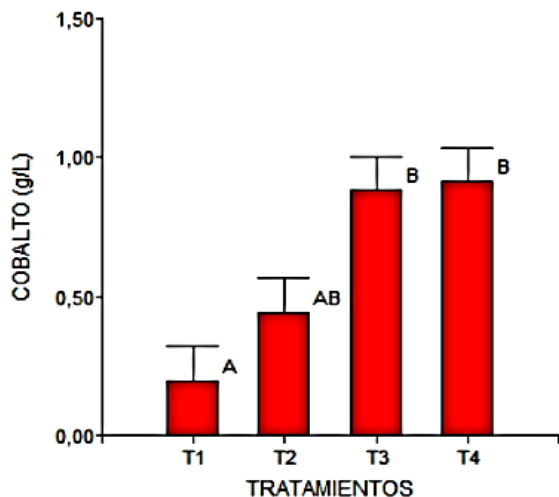


Fig. 4 Desempeño de los tratamientos por el test de Tukey

La Fig. 4 también indica que existe una correlación directa entre la concentración de peróxido de hidrógeno y la concentración del metal en el licor de lixiviado. Es decir que con una concentración de peróxido de hidrógeno al 10% se obtuvo una mayor concentración del metal en el licor de lixiviado.

La eficiencia de lixiviación de cada tratamiento se obtuvo mediante la aplicación de (3) de Chen [12], cuyos resultados se detallan en la Tabla III.

TABLA III
EFICIENCIA DE LIXIVIACIÓN DE COBALTO DE CADA TRATAMIENTO

Tratamientos	Promedio de concentración (g/L)
1	0.195
2	0.444
3	0.880
4	0.912

A partir de los resultados logrados se puede observar un incremento de la eficiencia de lixiviación al emplear diferentes tratamientos, logrando una eficiencia máxima de 51.91 % para cobalto en el tratamiento 4 seguido del tratamiento 3 con una eficiencia de 50.09 %.

Debido a que en los tratamientos 3 y 4 se utilizó una concentración de peróxido de hidrógeno del 10 % y una cantidad de 2.5 g y 3 g de cáscara de limón respectivamente, las cantidades mayores empleadas en los 4 tratamientos, este comportamiento indica que conforme aumente la concentración de peróxido de hidrógeno y se establezca la cantidad de cáscara de limón a emplear, la reacción se va acercando a su punto de equilibrio.

IV. DISCUSIÓN

Maldonado [13], en su estudio, empleó 2 g de casaca de naranja como agente lixivante y peróxido de hidrógeno al 2.5%, 5% y 10% como agente reductor obteniendo una eficiencia de lixiviación de cobalto del 48%, 46% y 33% respectivamente, indicando una correlación negativa entre la concentración del peróxido de hidrógeno y la eficiencia de lixiviación del metal. Incluso, se determinó la concentración óptima de peróxido de hidrógeno en 2.5 %, lo cual difiere de los resultados obtenidos en el presente estudio.

La discrepancia de eficiencias puede deberse al tiempo de extracción y al tipo de agente lixivante utilizado. Por ejemplo, en los estudios de Li *et al.*, [14] y Yu *et al.*, [15], se alcanzó una eficiencia del 99% y para el de Guevara y Vargas [10] la eficiencia fue del 76.70%, siendo empleado el ácido cítrico en los mismos, el cual se conoce que potencia la concentración de H^+ , favoreciendo la lixiviación de $LiCoO_2$.

Considerando el trabajo de Li *et al.*, [14] se seleccionó para pre-tratamiento solo las LIBs cuya composición del cátodo fuera de $LiCoO_2$, debido a que se pueden lograr eficiencias de lixiviación en cobalto de hasta el 90% utilizando ácido cítrico, y en este caso en particular, reemplazado por las cáscaras de limón pre-tratadas.

En estudios similares se ha determinado que la distribución del tamaño de partícula de las cáscaras de limón pre-tratadas

tiene un rol esencial en el proceso de lixiviación, cuando se hallan en un diámetro de entre 0.550mm y 0.390mm [18]. Esto se asemeja a los resultados de investigaciones, en donde el diámetro del tamiz inferior que se utilizó fue de 0.350mm [19].

Por esta razón, para la presente investigación, se utilizaron las cáscaras de limón pre-tratadas retenidas en el tamiz de 0.355 mm de diámetro, concluyendo de esa manera que, mientras menor sea el diámetro de la partícula, mayor será la superficie de contacto en la reacción, logrando que la interfase cause una mayor precipitación del metal.

Es importante mencionar que la eficiencia de lixiviación fue obtenida a partir de los valores de concentración de cobalto en el licor de lixiviado, es decir, que mientras mayor sea la concentración del metal en el licor de lixiviado, mayor será la eficiencia de lixiviación y viceversa.

En esta investigación, los mayores promedios de concentraciones de cobalto en el licor de lixiviado analizado se dieron en los tratamientos 3 y 4, por lo cual estos tratamientos presentan las mayores eficiencias de lixiviación, siendo de 50.09% y 51.91% respectivamente en las condiciones de temperatura ($\pm 90^\circ\text{C}$), cátodo (0.5g), relación sólido/líquido (10 g/L), tiempo de extracción (90 min.), volumen de H_2O_2 (50 mL), concentración de H_2O_2 (10%) y cáscara de limón 2.5 g (T3) y 3g (T4).

La discrepancia entre las eficiencias de lixiviación obtenidas en el trabajo de Maldonado [19] y en la presente investigación se puede deber al tiempo de extracción de 3 horas empleado por Maldonado [19], debido a que mientras mayor sea el tiempo de extracción y menor sea la relación sólido/líquido, la posibilidad de adsorción de los metales es mayor. Por ende, la viabilidad de escalamiento debe considerar un tiempo mínimo de 3 horas para obtener porcentajes de eficiencia de extracción más elevados. Una posibilidad también cabe en considerar que, tiempos más prolongados de este proceso, no necesariamente resultarán en porcentajes más eficientes. Por lo que se sugiere profundizar estudios para establecer el periodo de extracción idóneo.

Finalmente, comparando las eficiencias de lixiviación obtenidas con las reportadas con autores que emplearon el mismo agente reductor y ácido cítrico como agente lixivante se observa que tanto Li *et al.*, [14] y Yu *et al.*, [15] lograron una eficiencia mayor e igual al 99%, mientras que Guevara y Vargas [8], lograron una eficiencia del 76.70% para cobalto. Estos valores demuestran que utilizar ácido cítrico como agente lixivante potencia de mejor manera la concentración del H^+ , por lo que es más favorable para la lixiviación del cátodo (LiCoO_2) de LIBs.

V. CONCLUSIONES

Se concluye que la distribución del tamaño de partícula de las cáscaras de limón pre-tratadas se encontró entre un diámetro de 0.550 mm y 0.390 mm, demostrando que mientras menor sea el diámetro de la partícula, mayor será la superficie de contacto en la reacción.

Se reconoce que las dosificaciones empleadas en el tratamiento 1 no presentan eficiencia con respecto a la lixiviación de cobalto de las LIBs gastadas y a pesar de que el peróxido de hidrógeno se descompone más rápido a una mayor concentración y a altas temperaturas ($>90^\circ\text{C}$), los tratamientos 3 y 4 presentaron eficiencias más altas.

A pesar de que el peróxido de hidrógeno se descompone más rápido a una concentración mayor y a altas temperaturas ($>90^\circ\text{C}$), los tratamientos 3 y 4 presentaron una eficiencia de lixiviación de entre el 50% y 52%, empleando 2.5 g y 3 g de cáscara de limón respectivamente y 10% de peróxido de hidrógeno.

Los valores de eficiencia de lixiviación menores al 60% son originados por el uso de NaOH en la disolución del colector de corriente debido a que este compuesto no elimina completamente la cantidad de aluminio del cátodo en el proceso de pre-tratamiento y esto puede llegar a afectar negativamente a la lixiviación debido a que actúa como una impureza.

Aun así en la presente investigación se determinó que la cáscara de limón puede actuar como un agente lixivante para la extracción de cobalto en LIBs gastadas.

RECONOCIMIENTOS

Agradecimiento a la Universidad Agraria del Ecuador (UAE) por permitir el desarrollo y experimentación de esta investigación, formando líderes del agro en pro del Ecuador.

Un especial agradecimiento a Ponce Cabrera Jamie, estudiante de la Carrera de Ingeniería Ambiental de la UAE, quien formó parte indispensable de la realización de este artículo y sin quien el mismo, no hubiera sido posible.

REFERENCIAS

- [1] A. Yoshino, "The birth of the lithium-ion battery," *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 51, no. 24, pp. 5798-5800, Febrero 2012.
- [2] H. Pinegar, y Y. Smith, "Recycling of end-of-life lithium ion batteries, part I: commercial processes," *Journal of Sustainable Metallurgy*, vol. 5, no. 3, pp. 402-416, Julio 2019.
- [3] V. Innocenzi, I. De Michelis, y F. Vegliò, "Desing and construction of an industrial mobile plant for WEEE treatment: Investigation on the treatment of fluorescent powders and economic evaluation compared to other e-wastes," *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, vol. 80, pp. 769-88, Septiembre 2017.
- [4] R. Golmohammadzadeh, F. Fajari, y F. Rashchi, "Recovery of lithium and cobalt from spent lithium ion batteries (LIBs) using organic acids as leaching reagents: A review," *Resources, Conservation & Recycling*, vol. 136, pp. 418-435, Septiembre 2018.
- [5] M. Li, y J. Lu, "Cobalt in lithium-ion batteries," *Science*, vol. 367, no. 6481, pp. 979-80, Febrero 2020.
- [6] M. Yu, Z. Zhang, F. Xue, B. Yang, G. Guo, y J. Qiu, "A more simple and efficient process for recovery of cobalt and lithium," *Separation and Purification Technology*, vol. 215, pp. 398-402, Mayo 2019.
- [7] J. Xu, et al, "A review of processes and technologies for the recycling of lithium-ion secondary batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 177, no. 2, pp. 512-527, Marzo 2008.
- [8] B. Musariri, G. Akdogan, C. Dorfling, y S. Bradshaw, "Evaluating organic acids as alternative leaching reagents for metal recovery from Lithium Ion Batteries," *Minerals Engineering*, vol. 137, pp. 108-117, Junio 2019.
- [9] J. Guan, et al, "Mechanochemical Process Enhanced Cobalt and lithium recycling from Wasted Lithium-ion batteries," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 5, no. 1, pp. 1026-1032, Noviembre 2016.

- [10]A. Guevara, y S. Vargas, “Evaluación del proceso de recuperación de litio y cobalto presentes en baterías gastadas de ion-litio de vehículos eléctricos e híbridos por medio de un proceso de lixiviación ácida,” unpublished.
- [11]R. Wang, Y. Lin, y S. Wu, “A novel recovery process of metal values from the cathode active materials of the lithium-ion secondary batteries,” *Hydrometallurgy*, vol. 99, no. 3-4, pp. 194–201, Noviembre 2009.
- [12] X. Chen, C. Luo, J. Zhang, J. Kong, y T. Zhou, “Sustainable recovery of metals from spent lithium-ion batteries: a green process,” *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 3, no. 12, pp. 3104–3113, Noviembre 2015.
- [13] N. Maldonado, “Recuperación “verde” de metales de baterías de ion-litio utilizando cáscara de naranja,” unpublished.
- [14]L. Li, et al, “Recovery of metals from spent lithium-ion batteries with organic acids as leaching reagents and environmental assessment,” *Journal of Power Sources*, vol. 233, pp. 180-189, Julio 2013
- [15]M. Yu, et al, “A more simple and efficient process for recovery of cobalt and lithium from spent lithium-ion batteries with citric acid,” *Separation and Purification Technology*, vol. 215, pp. 398-402, Mayo 2019.
- [16]A. Guevara, y S. Vargas, “Evaluación del proceso de recuperación de litio y cobalto presentes en baterías gastadas de ion-li de vehículos eléctricos e híbridos por medio de un proceso de lixiviación ácida,” unpublished.
- [17]L. Li, et al, “Process for recycling mixed-cathode materials from spent lithium-ion batteries and kinetics of leaching,” *Waste Management*, vol. 71, pp. 362-371, Enero 2018.
- [18]F. Meng, Q. Liu, R. Kim, J. Wang, G. Liu, y A. Ghahreman, “Selective recovery of valuable metals from industrial waste lithium-ion batteries using citric acid under reductive conditions: Leaching optimization and kinetic analysis,” *Hydrometallurgy*, vol. 191, pp. 105-160, Enero 2020.
- [19]N. Maldonado Velásquez, “Recuperación “verde” de metales de baterías de ionlitio utilizando cáscara de naranja,” unpublished.