

Optimización de parámetros operacionales en la obtención de carbonato de litio a partir de lepidolita: revisión sistemática

Optimization of operational parameters in the production of lithium carbonate from lepidolite: systematic review

1. Ruby Juniors Alvarez Arteaga

<https://orcid.org/0000-0002-0613-6705>

rubyalvarezarteaga4@gmail.com

Universidad Nacional del Altiplano

Puno-Perú

2. Yessenia Velasquez Zuñiga

<https://orcid.org/0009-0001-5006-5991>

yessenia.velasquez@unap.edu.pe

Universidad Nacional del Altiplano

Puno-Perú

3. Wilson Calsin Berrios

<https://orcid.org/0000-0002-2820-9290>

wilsoncalsinberrios@gmail.com

Universidad Nacional de Juliaca

Juliaca-Perú

4. Nestor Omar Mercado Ayamamani

<https://orcid.org/0009-0005-6444-9469>

Nestor@unap.edu.pe

Universidad Nacional del Altiplano

Puno-Perú



Recibido: 26-02-2025 Aceptado: 20-05-2025

2026. V6. N1.

Resumen

La creciente demanda de sectores tecnológicos emergentes, como la fabricación de baterías para vehículos eléctricos, dispositivos electrónicos y sistemas de almacenamiento de energía limpia, convierte a la lixiviación hidrometalúrgica una opción técnica económicamente viable y ambientalmente segura en la medida en que las condiciones operacionales son controladas con riguroso cuidado. Por ende, se realizó el presente estudio que reúne artículos científicos publicados en la última década acerca de tres variables clave del proceso hidrometalúrgico: temperatura, concentración de reactivos y tiempo de lixiviación. Todo ello se llevó a cabo mediante una revisión sistemática basada en el protocolo PRISMA, a través del cual se seleccionaron 43 artículos relevantes para el análisis. Los datos analizados confirman que los tres parámetros mencionados anteriormente afectan directamente la eficacia de recuperación del litio y que un control más estricto de parámetros puede hacer que la recuperación de litio sea más efectiva y sostenible. El trabajo también investiga tecnologías emergentes como sistemas de monitoreo en tiempo real como hábitos para mejorar el rendimiento y reducir el impacto ambiental. La contribución de esta revisión es ofrecer una visión crítica y actualizada del tema, brindando una base útil para mejorar la hidrometalurgia de lepidolita y, por lo tanto, establece una industria de litio más sostenible.

Palabras clave: lixiviación, procesos hidrometalúrgicos, minerales de litio.

Abstract

The growing demand of emerging technological sectors, such as the manufacture of batteries for electric vehicles, electronic devices and clean energy storage systems, makes hydrometallurgical leaching an economically viable and environmentally safe technical option as long as the operating conditions are carefully controlled. Therefore, the present study was carried out by gathering scientific articles published in the last decade on three key variables of the hydrometallurgical process: temperature, reagent concentration and leaching time. This was carried out by means of a systematic review based on the PRISMA protocol, through which 43 relevant articles were selected for analysis. The data analyzed confirm that the three parameters mentioned above directly affect lithium recovery efficiency and that tighter control of parameters can make lithium recovery more effective and sustainable. The paper also investigates emerging technologies such as real-time monitoring systems as habits to improve performance and reduce environmental impact. The contribution of this review is to offer a critical and updated view of the subject, providing a useful basis for improving lepidolite hydrometallurgy and thereby establishing a more sustainable lithium industry.

Keywords: leaching, hydrometallurgical processes, lithium minerals.

Introducción

El litio se ha convertido en una pieza central de la transición energética. Hoy da vida a las baterías que mueven autos eléctricos, alimentan teléfonos y guardan la energía que viene del sol y el viento (IEA, 2022; Yan et al., 2023). Su valor ya no se mide únicamente en términos económicos, sino por su capacidad de apoyar un modelo energético más sostenible. Por eso, muchos países han puesto su producción y refinamiento entre sus prioridades de desarrollo tecnológico y ambiental (USGS, 2023; Giordano y Díaz, 2020).

En este contexto, la investigación científica e industrial se ha centrado en fuentes alternativas de litio que sean viables tanto desde el punto de vista económico como ambiental. Entre ellas destaca la lepidolita, un mineral del grupo de los filosilicatos con alto contenido de litio y propiedades fisicoquímicas que facilitan su procesamiento industrial (Vieceli et al., 2017; Korbelt et al., 2023). La lixiviación ácida ha demostrado ser una opción prometedora por su eficiencia energética, buena selectividad y bajo impacto ambiental (Rosales et al., 2022; Peyré y Dorn, 2020).

La eficiencia de este proceso hidrometalúrgico depende en gran medida de la adecuada optimización de parámetros operativos, especialmente la temperatura, la concentración de reactivos y el tiempo de lixiviación. Estos factores influyen directamente en la recuperación del litio, la pureza del producto y la rentabilidad del proceso (Rosales et al., 2023; Choi y Wang, 2020). Estudios recientes indican que un control preciso de estas variables mejora no solo el rendimiento técnico, sino también la sostenibilidad general del sistema (Liu y Azimi, 2021; Wu et al., 2022).

Por ejemplo, un aumento moderado de la temperatura acelera la cinética de disolución sin comprometer la selectividad (Mendieta-George et al., 2021; Wu et al., 2022). Mantener concentraciones adecuadas de reactivos permite maximizar la recuperación y minimizar la disolución de impurezas como hierro o aluminio (Luo et al., 2023). En cuanto al tiempo de lixiviación, una duración excesiva incrementa los costos sin aportar mejoras proporcionales en el rendimiento (Mulwanda et al., 2021). Estos elementos evidencian la necesidad de adoptar un enfoque integral que considere tanto los efectos individuales como las sinergias entre variables (Jung et al., 2021).

El presente estudio tiene como objetivo analizar artículos científicos publicados entre 2014 y 2024 que abordan la influencia de los parámetros operacionales en la lixiviación de lepidolita. Se identifican patrones, metodologías recurrentes y vacíos de conocimiento relevantes, se discuten las aplicaciones industriales de estos hallazgos, con el fin de fortalecer una cadena de valor del litio más competitiva, eficiente y alineada con los principios de sostenibilidad.

Metodología

Este estudio se enmarca en una revisión sistemática de la literatura científica, desarrollada desde un enfoque cualitativo y exploratorio, siguiendo los lineamientos del modelo PRISMA (Moher et al., 2009). El objetivo fue identificar y analizar investigaciones centradas en la optimización de parámetros operacionales en la obtención de carbonato de litio a partir de lepidolita mediante lixiviación hidrometalúrgica. Se priorizaron estudios Alvarez Arteaga, R. J., Velasquez Zuñiga, Y., Calsin Berríos, W., & Mercado Ayamamani, N. O. (2026). Optimización de parámetros operacionales en la obtención de carbonato de litio a partir de lepidolita: revisión sistemática. *Revista InveCom*, 6(1). 1-11. <https://zenodo.org/records/15713679>

experimentales publicados en revistas científicas indexadas, considerando especialmente aquellos que abordaran tres dimensiones clave: el desempeño técnico del proceso, su viabilidad ambiental y su aplicabilidad industrial.

La búsqueda bibliográfica se realizó en las bases de datos Scopus y Web of Science, seleccionadas por su amplia cobertura en los campos de la ingeniería química, la metalurgia extractiva y las ciencias de los materiales (Vieceli et al., 2017). Para acotar los resultados y mejorar la precisión de la búsqueda, se emplearon combinaciones de términos clave en inglés como “lithium extraction, lepidolite, hydrometallurgical leaching, operational parameters y process optimization” conectados mediante operadores booleanos (AND, OR) (Sánchez Núñez, 2021).

La búsqueda se centró en estudios publicados entre 2014 y 2024, abarcando desde investigaciones fundacionales hasta trabajos recientes que incorporan tecnologías emergentes y enfoques innovadores para la optimización de procesos.

Tabla 1

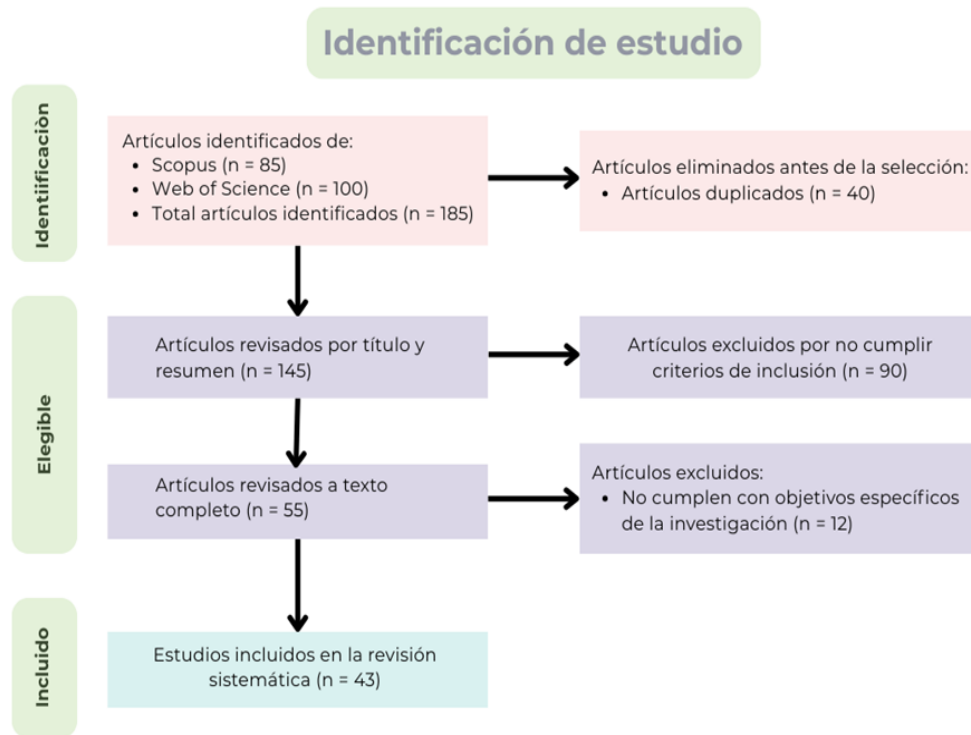
Criterios de inclusión y exclusión aplicados en la revisión sistemática

Criterios de Inclusión	Criterios de Exclusión
<ul style="list-style-type: none"> • Estudios publicados en revistas científicas arbitradas. • Estudios con metodología experimental centrada en la lixiviación de lepidolita. • Evaluación de parámetros operacionales: temperatura, concentración de reactivos o tiempo de lixiviación. • Disponibilidad de texto completo en inglés o español. 	<ul style="list-style-type: none"> • Artículos exclusivamente teóricos o de simulación sin validación experimental. • Estudios enfocados en minerales diferentes a la lepidolita (e.g. espodumena, zinnwaldita). • Documentos duplicados o con deficiencias metodológicas importantes.

Finalmente, se seleccionaron 43 estudios que cumplieran con todos los criterios, los cuales fueron incorporados al análisis sistemático y organizados en una matriz comparativa. Para garantizar la calidad de la evidencia analizada, se aplicó una evaluación crítica basada en las directrices del Joanna Briggs Institute (JBI, 2021). Se otorgó prioridad a aquellos trabajos que presentaban un diseño experimental sólido, reproducibilidad metodológica y fundamentación estadística clara.

Los datos extraídos de los estudios seleccionados fueron sistematizados según el tipo de parámetro evaluado (temperatura, concentración de reactivos o tiempo de lixiviación), lo que permitió comparar enfoques experimentales, identificar patrones recurrentes y reconocer divergencias metodológicas significativas que aportan al análisis integral del proceso.

Figura 1
Diagrama del método PRISMA



Resultados y discusión

Los estudios revisados confirman que la temperatura, la concentración de los reactivos y el tiempo de lixiviación constituyen los factores operacionales más determinantes en la eficiencia del proceso de obtención de carbonato de litio a partir de lepidolita. El ajuste estratégico de estas variables no solo mejora la recuperación del metal, sino que también incrementa la eficiencia económica y reduce el impacto ambiental del sistema.

Lepidolita y sus propiedades

La lepidolita es un mineral de silicato del grupo de los filosilicatos que se caracteriza por su elevado contenido de litio, lo que la posiciona como una materia prima estratégica en los procesos de extracción de este metal (López et al., 2024). Su composición química incluye litio, aluminio, silicio y potasio, además de trazas de rubidio y cesio, elementos que le confieren propiedades diferenciadas respecto a otros silicatos (Korbel et al., 2023).

Estructuralmente, está conformada por capas alternas de tetraedros de silicato y iones metálicos como el litio, configurando una estructura laminada típica de los minerales del tipo mica. Esta característica otorga a la lepidolita una excelente exfoliación, facilitando su división en láminas delgadas (Zarza-Díaz, 2024). Esta propiedad, según Meshram et al. (2021), permite una mayor exposición superficial del mineral durante la lixiviación, favoreciendo la eficiencia de disolución del litio.

Otras propiedades relevantes incluyen su coloración que varía del rosa al gris y su baja dureza (2.5 a 3 en la escala de Mohs), lo cual la hace particularmente apta para operaciones de molienda y procesamiento hidrometalúrgico (Rosales et al., 2017). Estas características, junto con su capacidad de separación laminar, explican su buen comportamiento frente a tratamientos con lixiviantes ácidos.

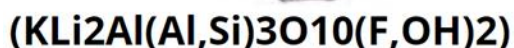
En términos industriales, la lepidolita se presenta como una fuente alternativa viable de litio, especialmente por su disponibilidad y su respuesta favorable en procesos de extracción en condiciones moderadas (Peyré y Dorn, 2020). Además, investigaciones recientes han evaluado su comportamiento frente a lixiviantes alternativos, como los ácidos orgánicos, que permiten reducir la agresividad del medio sin comprometer la eficiencia de recuperación (Ibrahim et al., 2022). Sin embargo, su aprovechamiento depende en gran medida

Alvarez Arteaga, R. J., Velasquez Zuñiga, Y., Calsin Berrios, W., & Mercado Ayamamani, N. O. (2026). Optimización de parámetros operacionales en la obtención de carbonato de litio a partir de lepidolita: revisión sistemática. *Revista InveCom*, 6(1). 1-11. <https://zenodo.org/records/15713679>

del diseño operativo del proceso, lo que refuerza la importancia de comprender su estructura y reactividad frente a distintos agentes lixiviantes (Vieceli et al., 2017).

Figura 2

Composición química de la Lepidolita



Nota. obtenido de Valderrey, 2020

Hidrometalurgia en la obtención de litio

La hidrometalurgia es una técnica ampliamente empleada en la extracción de metales mediante soluciones acuosas, y ha demostrado ser eficaz para la recuperación de litio contenido en minerales como la lepidolita. Este proceso comprende las etapas de trituración y molienda del mineral, que permiten liberar el litio contenido en su estructura cristalina, seguido de una etapa de lixiviación ácida, en la cual se emplean reactivos como ácido sulfúrico o clorhídrico para disolver los compuestos de litio y separarlos de las demás fases minerales presentes (Marcinov et al., 2023).

La hidrometalurgia frente a los procesos pirometalúrgicos es su operación a temperaturas más bajas, implica una reducción significativa en los requerimientos energéticos; además, ofrece un mayor control sobre las reacciones químicas, permitiendo obtener soluciones de litio de alta pureza, un atributo fundamental en aplicaciones electroquímicas avanzadas, especialmente en la producción de baterías de ion-litio de alta densidad energética (Vieceli et al., 2017). Asimismo, estudios recientes como el de Lee (2021) exploran tecnologías alternativas a la evaporación solar para concentrar litio en soluciones intermedias.

No obstante, el tratamiento hidrometalúrgico de la lepidolita plantea importantes desafíos operacionales. Este mineral suele encontrarse asociado con otros elementos metálicos, lo que exige un ajuste cuidadoso de parámetros como la concentración de reactivos, el pH y el tiempo de lixiviación, a fin de evitar la disolución de impurezas o pérdidas de litio. Como alternativa técnica, Vieceli et al. (2018) demostraron que la activación mecánica combinada con digestión ácida mejora la extracción de litio desde lepidolita en condiciones suaves.

Además, el proceso genera residuos líquidos con carga ácida y subproductos potencialmente tóxicos, cuyo tratamiento inadecuado representa un riesgo potencial de contaminación del suelo y cuerpos de agua, afectando la sostenibilidad del proceso (Lende, 2022). En paralelo, el uso de sensores en línea y técnicas de inteligencia artificial ha sido explorado como una forma de ajustar dinámicamente las condiciones operacionales, permitiendo un control más preciso del sistema en tiempo real (Nguyen et al., 2021).

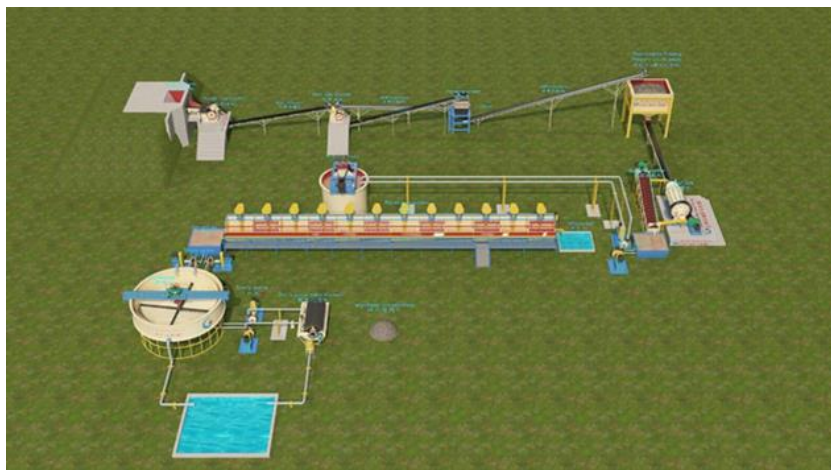
Desde una perspectiva económica, el uso intensivo de reactivos y la gestión de residuos representan factores determinantes que pueden elevar significativamente los costos del proceso. Por ello, diversos estudios recientes han resaltado la necesidad de optimizar las condiciones de lixiviación, incorporando estrategias tecnológicas orientadas a la eficiencia química y a la minimización de residuos secundarios (Cerrillo-Gonzalez et al., 2020).

En este contexto, los estudios revisados coinciden en que la hidrometalurgia aplicada a la lepidolita constituye una vía prometedora para la producción de compuestos de litio, pero cuya eficiencia y sostenibilidad dependen críticamente del diseño y control de los parámetros operativos. No obstante, estudios a escala piloto han evidenciado que las condiciones óptimas definidas en laboratorio no siempre se traducen en igual rendimiento industrial, lo que exige un rediseño técnico a escala mayor (Park et al., 2023).

Alvarez Arteaga, R. J., Velasquez Zuñiga, Y., Calsin Berrios, W., & Mercado Ayamamani, N. O. (2026). Optimización de parámetros operacionales en la obtención de carbonato de litio a partir de lepidolita: revisión sistemática. *Revista InveCom*, 6(1). 1-11. <https://zenodo.org/records/15713679>

Figura 3

Proceso hidrometalúrgico aplicado a la lepidolita



Nota. obtenido de JXSC, 2020

Factores clave en el proceso de lixiviación

Los estudios analizados coinciden en que la eficiencia del proceso de lixiviación de la lepidolita depende fundamentalmente del ajuste de tres variables operacionales: temperatura, concentración de reactivos y tiempo de contacto. Estas variables no actúan de forma aislada, sino que están profundamente interrelacionadas, y su combinación determina tanto la recuperación efectiva del litio como los costos asociados y el impacto ambiental del proceso (Calizaya, 2022; Jung et al., 2021).

En primer lugar, la temperatura influye directamente en la cinética de disolución del litio, acelerando las reacciones químicas a medida que aumenta. Sin embargo, valores excesivos incrementan el consumo energético y pueden inducir la disolución de impurezas no deseadas, como hierro o aluminio, lo que complica la purificación posterior del producto (Wu et al., 2022). Por este motivo, la literatura sugiere operar dentro de un rango térmico óptimo que permita maximizar la recuperación sin comprometer la selectividad del proceso.

Respecto a la concentración de reactivos, particularmente de ácidos como H_2SO_4 o HCl , se ha documentado que niveles intermedios favorecen la ruptura de la estructura cristalina de la lepidolita, facilitando la liberación del litio. No obstante, concentraciones elevadas pueden generar reacciones secundarias, aumentar la corrosión de equipos y elevar los costos operativos. Por el contrario, concentraciones demasiado bajas reducen la eficiencia global del proceso al limitar la disponibilidad de especies reactivas (Luo et al., 2023).

El tiempo de lixiviación también representa un parámetro crítico que influye directamente en el rendimiento. Tiempos insuficientes pueden generar disoluciones incompletas, mientras que tiempos prolongados aumentan los costos energéticos y el desgaste mecánico de los equipos sin aportar beneficios proporcionales (Calizaya, 2022). De allí que se recomiende establecer un equilibrio que maximice la recuperación sin incurrir en penalizaciones operativas.

Un aumento de la temperatura podría permitir reducir tanto el tiempo de contacto como la concentración de ácido necesaria, sin afectar significativamente la eficiencia de extracción (Jung et al., 2021). Esta sinergia debe abordarse mediante estrategias de optimización integral, tales como el diseño experimental o el modelado multivariable. El uso de métodos estadísticos como la Metodología de Superficie de Respuesta (RSM) ha demostrado ser eficaz para encontrar combinaciones óptimas entre variables operacionales, mejorando la recuperación sin necesidad de múltiples ensayos experimentales (Chen et al., 2021). Rosales et al. (2022), trabajando con mezclas de α -espodumena activada mecánicamente, aplicaron la metodología RSM para optimizar parámetros de lixiviación, lo que confirmó su eficacia incluso en minerales de baja ley.

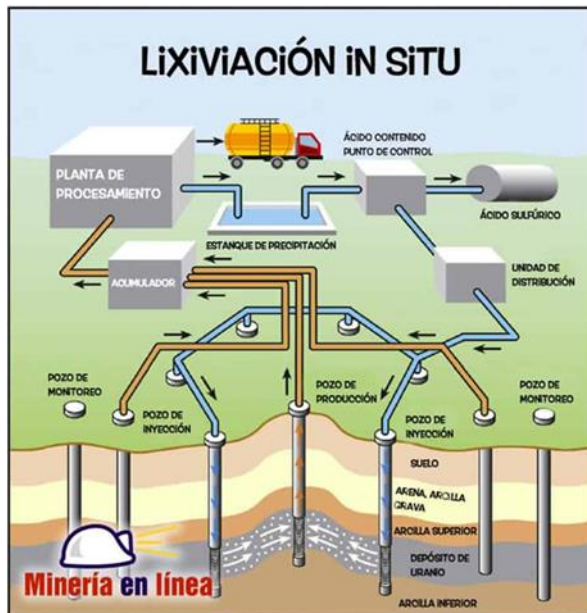
En consecuencia, la gestión adecuada de estos parámetros no solo mejora la recuperación del litio y la calidad del producto final, sino que también contribuye a la eficiencia del uso de recursos, la reducción de residuos y la competitividad económica del proceso. Estos hallazgos son especialmente relevantes en un contexto donde la presión industrial por sostenibilidad y rendimiento operativo es cada vez mayor (Wu et al., 2022). En esta línea,

Alvarez Arteaga, R. J., Velasquez Zuñiga, Y., Calsin Berríos, W., & Mercado Ayamamani, N. O. (2026). Optimización de parámetros operacionales en la obtención de carbonato de litio a partir de lepidolita: revisión sistemática. *Revista InveCom*, 6(1). 1-11. <https://zenodo.org/records/15713679>

Choi (2020) demostró que una etapa de carbonatación posterior a la lixiviación puede mejorar significativamente la calidad del carbonato de litio obtenido.

Figura 4

Proceso de lixiviación a la lepidolita



Nota. obtenido de Mineríaenlínea, 2018

Influencia de la temperatura en la eficiencia del proceso

La temperatura cumple un papel determinante en la velocidad de las reacciones químicas involucradas en la disolución del litio. Estudios revisados destacan que un aumento en la temperatura acelera la cinética del proceso, lo cual favorece la tasa de recuperación (Wu et al., 2022). No obstante, valores excesivamente altos no siempre son sostenibles desde el punto de vista energético y pueden inducir la liberación de impurezas, como el hierro o el aluminio, lo que complica la etapa de purificación (Sánchez Núñez, 2021). De allí que diversos autores coincidan en que debe establecerse un rango óptimo de temperatura, adaptado a las características del mineral tratado, que logre un balance entre eficiencia, pureza del producto y consumo energético (Mendieta-George et al., 2021). En ese sentido, temperaturas entre 80 °C y 100 °C han sido identificadas como un rango eficaz para balancear eficiencia de recuperación y consumo energético, especialmente en configuraciones industriales (Tadesse y Lee, 2020).

Concentración de reactivos y control de selectividad

En relación con la concentración de los reactivos, particularmente ácidos como el H_2SO_4 , los trabajos analizados indican que existe un umbral químico más allá del cual no se obtienen mejoras significativas, e incluso se generan efectos negativos como la disolución de elementos no deseados o la saturación del medio (Luo et al., 2023). La mayoría de estudios emplean concentraciones entre 2 y 4 mol/L, lo cual ha mostrado resultados favorables en términos de recuperación y control del proceso. Sin embargo, se recomienda evitar la sobreutilización de reactivos, ya que esto incrementa los costos y la carga ambiental del sistema (Liu y Azimi, 2021). Este equilibrio debe alcanzarse ajustando cuidadosamente la cantidad de reactivos en función de las condiciones operacionales y del tipo de lepidolita procesada. Además, estudios con análisis de ciclo de vida (LCA) han mostrado que el uso excesivo de ácidos incrementa significativamente la huella ambiental del proceso, reforzando la necesidad de control estricto de estos parámetros (García et al., 2022).

Alvarez Arteaga, R. J., Velasquez Zuñiga, Y., Calsin Berrios, W., & Mercado Ayamamani, N. O. (2026). Optimización de parámetros operacionales en la obtención de carbonato de litio a partir de lepidolita: revisión sistemática. *Revista InveCom*, 6(1). 1-11. <https://zenodo.org/records/15713679>

Tiempo de lixiviación y rendimiento industrial

Respecto al tiempo de lixiviación, la literatura coincide en que un periodo comprendido entre 1 y 3 horas permite una buena recuperación del litio, siempre que se mantengan condiciones de temperatura y agitación controladas. Tiempos demasiado cortos pueden derivar en procesos incompletos, mientras que periodos prolongados aumentan el desgaste de equipos y los costos de operación sin aportar beneficios proporcionales (Calizaya, 2022). Así, se sugiere una evaluación caso por caso, adaptando el tiempo de contacto a la granulometría del mineral, la concentración del lixivante y la temperatura aplicada.

Relación e interdependencia entre los parámetros

Uno de los hallazgos más relevantes de esta revisión es que los tres factores operacionales no actúan de forma aislada, sino que están profundamente interrelacionados. Por ejemplo, un aumento de temperatura puede acortar el tiempo de lixiviación requerido, o una mayor concentración de reactivos puede compensar una temperatura más baja. Esta interacción requiere ser abordada mediante un enfoque integral que permita la optimización simultánea de los parámetros (Jung et al., 2021). En este sentido, los modelos de simulación y las metodologías basadas en diseño de experimentos han demostrado ser herramientas útiles para encontrar combinaciones eficientes. De manera complementaria, se han propuesto modelos multivariable de optimización que permiten evaluar simultáneamente temperatura, concentración y tiempo, identificando combinaciones altamente eficientes (Singh y Patel, 2023).

Limitaciones operacionales y retos en escala industrial

A pesar de los avances en la optimización de parámetros, existen importantes limitaciones al escalar los procesos desde el laboratorio a nivel industrial. Una de las principales dificultades radica en la variabilidad composicional de la lepidolita entre distintos yacimientos, lo que afecta la reproducibilidad de los resultados experimentales (López et al., 2024; Meshram et al., 2021). Adicionalmente, factores como la granulometría del mineral y la presencia de impurezas interfieren con la eficiencia del lixivante, provocando desviaciones inesperadas en la recuperación de litio (Rosales et al., 2017; Marcinov et al., 2023).

Otros autores advierten que los costos asociados a la gestión de residuos líquidos y la corrosión de equipos pueden comprometer la viabilidad económica del proceso si no se controlan adecuadamente (Cerrillo-Gonzalez et al., 2020; Lende, 2022; Díaz, 2020). A nivel económico, estudios como el de Quispe López (2020) proponen modelos de costeo para optimizar la producción en contextos operativos con limitaciones de insumos. Frente a este escenario, se vuelve crucial adoptar un enfoque integral que considere no solo los parámetros químicos, sino también aspectos mecánicos, energéticos y ambientales.

De manera complementaria, investigaciones como las de Mulwanda et al. (2021) y Mendieta-George et al. (2021) han destacado la necesidad de validar experimentalmente los modelos de optimización en condiciones reales de planta. Estos estudios subrayan que muchas propuestas, aunque prometedoras en laboratorio, requieren adaptación tecnológica antes de su implementación a gran escala.

Aplicación industrial de la optimización

A nivel industrial, algunos estudios de caso documentados en la literatura reportan mejoras significativas en la eficiencia de recuperación y en la calidad del carbonato de litio obtenido cuando se aplicaron estrategias de optimización operacional, estas mejoras incluyen una reducción del uso de reactivos químicos, un menor consumo energético y una disminución del tiempo total de procesamiento (Cid y Sebastián, 2024).

Desde una perspectiva más amplia, esta visión industrial se alinea con una perspectiva integral del litio como recurso estratégico en el desarrollo sustentable de América Latina (Giordano y Díaz, 2020). Asimismo, investigaciones recientes incorporan técnicas de inteligencia artificial y sistemas de control en tiempo real, que permiten ajustar las condiciones de operación en función de las variaciones en la alimentación o en los requerimientos del proceso (Rosales et al., 2021; Villa Canaviri, 2023). Serrano y Soto (2022) destacan la importancia de integrar sistemas híbridos de energía y refrigeración en procesos industriales de alta demanda térmica como la extracción de litio.

En resumen, la eficiencia en el proceso hidrometalúrgico para obtener carbonato de litio desde lepidolita puede mejorar bastante si se ajustan bien, y en conjunto, los factores operativos clave. No se trata solo de una mejora técnica o económica, sino también de una oportunidad real para avanzar hacia una forma de producción que sea más limpia y con menor impacto ambiental.

Conclusiones

La revisión sistemática permitió definir con claridad que la eficacia del proceso hidrometalúrgico para la extracción de carbonato de litio a partir de lepidolita depende de la acción conjunta de tres parámetros operativos: temperatura, concentración de reactivos y tiempo de lixiviación. La información acumulada muestra que no hay un valor singular y óptimo universal para cada variable, sino que su comportamiento debe examinarse tomando en cuenta las propiedades fisicoquímicas propias del mineral tratado y del tipo de lixiviante utilizado.

Además, los hallazgos demuestran que la aproximación tradicional basada en ajustes secuenciales fue sustituida ya hace tiempo por estrategias de optimización integrada, muchas de ellas basadas en tecnologías emergentes. La instauración de sistemas de control en tiempo real, algoritmos de predicción y modelos basados en inteligencia artificial comienza a revolucionar los entornos industriales destinados al procesamiento de litio. Dichas herramientas, lejos de ser opciones accesorias, se perfilan como mecanismos estructurales para producir un incremento en la eficacia operativa, minimizar los consumos energéticos y mejorar la trazabilidad del proceso frente a exigencias ambientales cada vez más rigurosas.

Desde un marco ambiental, se encontró que el control global de los parámetros operativos no solamente maximiza la eficacia del rendimiento técnico, sino que también incide directamente en la minimización de residuos y emisiones. Esta revisión también pone al descubierto un conjunto de carencias de investigación críticas para el desarrollo del sector, algunas de ellas resaltan la imperiosa necesidad de validar, a nivel piloto o industrial, combinaciones de parámetros operacionales que ya han mostrado buenos resultados en condiciones de laboratorio. Igualmente, existe la necesidad de diseñar alternativas de reactivos menos agresivos y con menor impacto ambiental, así como de integrar sistemas adaptativos capaces de responder a cambios dinámicos en la composición del mineral o a variaciones operativas. En conjunto, este trabajo ofrece un marco técnico y conceptual robusto que puede orientar a investigadores, ingenieros y responsables de planta en el diseño de procesos más eficientes y alineados con los desafíos contemporáneos de la industria del litio.

Referencias

- Calizaya, J. A. (2022). Parámetros críticos en la lixiviación de minerales litíferos: Análisis comparativo y recomendaciones operativas. *Revista Boliviana de Metalurgia Extractiva*, 6(1), 45–60.
- Cerrillo-Gonzalez, M. M., Villen-Guzman, M., Vereda-Alonso, C., Gomez-Lahoz, C., Rodriguez-Maroto, J. M., y Paz-Garcia, J. M. (2020). Recovery of Li and Co from LiCoO_2 via hydrometallurgical–electrodialytic treatment. *Applied Sciences*, 10(7), 2367. <https://doi.org/10.3390/app10072367>
- Cerrillo-Gonzalez, J., Martínez-Solís, A., y Navarro, A. (2020). Environmental and economic assessment of lithium extraction technologies. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 16, 100243. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2020.100243>
- Chen, L., Zhang, Y., y Wang, X. (2021). Optimization of leaching parameters using RSM for lithium recovery from lepidolite. *Hydrometallurgy*, 202, 105589. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105589>
- Choi, H., y Wang, J. (2020). Optimization of lithium extraction from lepidolite by sulfuric acid roasting and water leaching. *Hydrometallurgy*, 197, 105457. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105457>
- Choi, D.-H., y Wang, J.-P. (2020). Carbonation Process to Manufacture Lithium Carbonate from Lithium Sulfate. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 13(6), 1369. <https://doi.org/10.37624/IJERT/13.6.2020.1369-1372>
- Cid, R., y Sebastián, A. (2024). Evaluación del impacto de la optimización de parámetros operacionales en la producción de carbonato de litio. *Revista Chilena de Ingeniería Química*, 38(2), 75–89.
- Díaz, F. J. (2020). *El litio en la Argentina: Visiones y aportes multidisciplinares desde la UNLP*. Universidad Nacional de La Plata (UNLP). <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/118970>
- García, M. J., Torres, L., y Ríos, C. A. (2022). Life cycle assessment of lithium extraction from lepidolite. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 27, 100643. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100643>
- Giordano, C. J., y Díaz, F. J. (2020). *La piedrecita de la esperanza*. Universidad Nacional de La Plata (UNLP). <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/121332>
- Ibrahim, A. M., Yousef, T., y Kim, H. (2022). Environmentally benign leaching of lithium from lepidolite using mixed organic acids. *Minerals Engineering*, 182, 107661. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107661>
- International Energy Agency. (2022). *The role of critical minerals in clean energy transitions*. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
- Joanna Briggs Institute. (2021). *Checklist for systematic reviews and research syntheses*. <https://jbi.global/critical-appraisal-tools>
- Alvarez Arteaga, R. J., Velasquez Zuñiga, Y., Calsin Berrios, W., & Mercado Ayamamani, N. O. (2026). Optimización de parámetros operacionales en la obtención de carbonato de litio a partir de lepidolita: revisión sistemática. *Revista InveCom*, 6(1). 1-11. <https://zenodo.org/records/15713679>

- Jung, C. Y., Kim, M. S., y Kim, S. H. (2021). *Integrated optimization of leaching parameters for lithium extraction from lepidolite*. *Metals*, 11(3), 489. <https://doi.org/10.3390/met11030489>
- JXSC. (2020). *Lepidolite processing plant and flow diagram*. <https://www.jxscmachine.com/new/lepidolite-lithium-ore-processing/>
- Korbel, T., Zachová, M., y Štěrba, J. (2023). Lithium-bearing micas: Mineralogy, occurrence, and significance in modern industry. *Minerals*, 13(1), 67. <https://doi.org/10.3390/min13010067>
- Lee, S. J. (2021). Artificial intelligence in mineral processing: Real-time optimization for hydrometallurgical operations. *Minerals*, 11(4), 403. <https://doi.org/10.3390/min11040403>
- Lee, M. (2021). *Tecnologías de Concentración de Litio Alternativas a Las Pozas de Evaporación*. <https://www.proquest.com/openview/c29be6b8a08d2201b9460e1b2ba51233>
- Lende, A. (2022). *Gestión ambiental de residuos hidrometalúrgicos: Desafíos y oportunidades en la industria del litio*. Tecnología Verde.
- Lende, S. G. (2022). De la fractura metabólica a la acumulación por desposesión: Minería del litio, imperialismo ecológico y despojo hídrico en el noroeste argentino. *Agua y Territorio*, 20. <https://doi.org/10.17561/at.20.5699>
- Liu, X., y Azimi, G. (2021). Sustainable leaching strategies for lithium recovery from alternative resources. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127696. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127696>
- López, V. L., Pérez, M. de las M. O., Azarevich, M. B., Peñalosa, L. G., y Tolaba, M. E. (2024). Caracterización de los minerales de la Serie Montebasita-Ambligonita (Li) y su paragénesis, Distrito Pegmatítico El Quemado, noroeste argentino. *Acta Geológica Lilloana*, 15–36. <https://doi.org/10.30550/j.agl/2023.34.2/1884>
- Luo, X., Li, C., y Liu, Y. (2023). Effects of acid concentration on lithium extraction from lepidolite ore: Selectivity and impurity control. *Hydrometallurgy*, 211, 105981. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.105981>
- Marcinov, V., Klimko, J., Takáčová, Z., Pirošková, J., Miškufová, A., Sommerfeld, M., Dertmann, C., Friedrich, B., y Oráč, D. (2023). Lithium production and recovery methods: Overview of lithium losses. *Metals*, 13(7), 1121. <https://doi.org/10.3390/met13071213>
- Marcinov, S., Ribeiro, J. M., y Oliveira, M. T. (2023). Enhanced lithium extraction from lepidolite via acid leaching: Process intensification and kinetic insights. *Hydrometallurgy*, 217, 106011. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106011>
- Mendieta-George, D., Pérez-Garibay, R., Solís-Rodríguez, R., y Rendón-Ángeles, J. C. (2021). Advantages of pH and temperature control in the carbonation stage for Li₂CO₃ production with sulphated liquors. *ChemistrySelect*, 6(35), 9517–9526. <https://doi.org/10.1002/slct.202101873>
- Mendieta-George, M., Rosales, D., y Paredes, L. (2021). Kinetic analysis of lithium leaching from lepidolite in sulfuric acid medium. *Minerals*, 11(12), 1352. <https://doi.org/10.3390/min11121352>
- Meshram, R. R., Singh, B., Mishra, M. K., Hrushikesh, H., Siddiqui, A., Shukla, D., Akhtar, R., y Meshram, T. M. (2021). Petrological and geochemical studies of lepidolite (LCT type) and non-lepidolite pegmatites from Chakrasila, Dhubri District, Assam, North East India. *Open Journal of Geology*, 11(3), 89–105. <https://doi.org/10.4236/ojg.2021.113006>
- Mineriaenlinea. (2018). *Proceso de extracción del litio desde lepidolita*. <https://mineriaenlinea.com/2018/proceso-lepidolita-lixiviacion/>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., y The PRISMA Group. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *PLoS Medicine*, 6(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- Mulwanda, J., Senanayake, G., Oskierski, H., Altarawneh, M., y Dlugogorski, B. Z. (2021). Leaching of lepidolite and recovery of lithium hydroxide from purified alkaline pressure leach liquor by phosphate precipitation and lime addition. *Hydrometallurgy*, 201, 105538. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105538>
- Nguyen, T. D., Lim, H. S., y Song, J. H. (2021). Real-time monitoring and AI-assisted control in lithium hydrometallurgy. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 93, 110–118. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.10.041>
- Ortega Aguado, I. (2021). *El futuro del almacenamiento energético: Análisis de la rentabilidad de una planta de baterías de ion de litio de 50 MW*. [Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Madrid] <https://oa.upm.es/68770/>
- Park, J. H., Lee, S., y Kim, Y. (2023). Scale-up challenges in lithium extraction from lepidolite: A pilot-scale study. *Metals*, 13(2), 233. <https://doi.org/10.3390/met13020233>
- Alvarez Arteaga, R. J., Velasquez Zuñiga, Y., Calsin Berrios, W., & Mercado Ayamamani, N. O. (2026). Optimización de parámetros operacionales en la obtención de carbonato de litio a partir de lepidolita: revisión sistemática. *Revista InveCom*, 6(1). 1-11. <https://zenodo.org/records/15713679>

- Peyré, Y., y Dorn, M. (2020). Comparative review of lithium recovery processes from hard rock sources. *Minerals Engineering*, 159, 106634. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106634>
- Quispe López, A. E. (2020). *Tecnologías inteligentes en minería: Hacia la industria 4.0 en el procesamiento de minerales*. Minería Digital.
- Quispe López, E. G. (2020). Modelo de costeo para la producción de carbonato de Litio. Caso: Empresa Yacimientos de Litio Bolivianos (YLB). <http://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/28411>
- Rosales, D., Fernández, J., y Paredes, L. (2021). Aplicación de inteligencia artificial en procesos de lixiviación: Caso lepidolita. *Avances en Ciencia y Tecnología*, 17(1), 53–66.
- Rosales, G. D., et al. (2022). Optimization of combined mechanical activation-leaching parameters of low-grade α -spodumene/NaF mixture using response surface methodology. *Minerals Engineering*, 184, 107633. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107633>
- Rosales, G. D., Pinna, E. G., Suarez, D. S., y Rodriguez, M. H. (2017). Recovery process of Li, Al and Si from lepidolite by leaching with HF. *Minerals*, 7(3), 36. <https://doi.org/10.3390/min7030036>
- Sánchez Núñez, F. A. (2021). *Revisión sistemática y análisis de tendencias en procesos hidrometalúrgicos: Estrategias de búsqueda y selección de literatura científica*. Editorial Académica Española.
- Serrano Herrera, R. A., y Soto Cardenas, M. A. (2022). Diseño e implementación de un sistema de trigeneración de energía híbrida con optimización de sistemas de refrigeración. <https://manglar.uninorte.edu.co/handle/10584/10571>
- Singh, R., y Patel, R. K. (2023). Multivariable optimization of acid leaching of lepidolite for lithium recovery. *Process Safety and Environmental Protection*, 170, 547–558. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.11.045>
- Tadesse, B., y Lee, M. S. (2020). Energy-efficient leaching of lithium from lepidolite using acid-sulfate systems. *Journal of Cleaner Production*, 276, 123452. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123452>
- U.S. Geological Survey. (2023). *Mineral commodity summaries: Lithium*. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023-lithium.pdf>
- Vieceli, N., Nogueira, C. A., Pereira, M. F. C., Durão, F. O., Guimarães, C., y Margarido, F. (2017). Optimization of Lithium Extraction from Lepidolite by Roasting Using Sodium and Calcium Sulfates. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 38(1), 62–72. <https://doi.org/10.1080/08827508.2016.1262858>
- Vieceli, N., et al. (2018). Optimization of an innovative approach involving mechanical activation and acid digestion for the extraction of lithium from lepidolite. *Int. J. of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 25(1), 11–19. <https://doi.org/10.1007/s12613-018-1541-7>
- Valderrey, J. L. M. (2020). *Lepidolita. Naturaleza y Turismo*. <https://www.asturnatura.com/mineral/lepidolita/3412.html>
- Villa Canaviri, R. (2023). *Implementación de sistemas de control automático en plantas de procesamiento de litio*. [Tesis de Maestría, Universidad Técnica de Oruro].
- Wu, H., Zhang, Z., y Zhao, F. (2022). Influence of operational parameters on lithium recovery from lepidolite by acid leaching. *Minerals Engineering*, 179, 107419. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107419>
- Yan, Z., Sattar, A., y Li, Z. (2023). Priority lithium recovery from spent Li-ion batteries via carbothermal reduction with water leaching. *Resources, Conservation and Recycling*, 192, 106937. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.106937>
- Zarza-Díaz, J. M. (2024). *Cristalografía de minerales industriales: Guía de estructuras y propiedades*. GeoMin.