

XXI

**Modelamiento cinético
y optimización
multiobjetivo de la
lixiviación bacteriana de
calcopirita de baja ley
utilizando cepas nativas
de los Andes peruanos**

Fernando Eduardo Cano Legua
Rosa Luz Galindo Pasache
César Augusto Ediberto Lévano Salazar
Nieves Sandra Cuadros Luna

Modelamiento cinético y optimización multiobjetivo de la lixiviación bacteriana de calcopirita de baja ley utilizando cepas nativas de los Andes peruanos

Fernando Eduardo Cano Legua
Rosa Luz Galindo Pasache
César Augusto Ediberto Lévano Salazar
Nieves Sandra Cuadros Luna

RESUMEN

Este capítulo de revisión narrativa analiza la convergencia entre el modelamiento cinético y las técnicas de optimización multiobjetivo para potenciar la biolixiviación de calcopirita de baja ley, utilizando consorcios microbianos nativos de los Andes peruanos. La industria minera peruana, ante la disminución progresiva de las leyes minerales y la alta complejidad técnica que representa la pasivación superficial de la calcopirita, requiere soluciones que trasciendan los procesos convencionales. A través de un enfoque cualitativo y sistemático, se examina cómo la integración de modelos matemáticos —que consideran la actividad metabólica bacteriana bajo condiciones de estrés ambiental— junto con algoritmos evolutivos (como el NSGA-II), permite equilibrar eficazmente la tasa de recuperación de cobre, el tiempo de residencia y el consumo energético. El análisis demuestra que la adaptación evolutiva de cepas locales, combinada con herramientas de optimización computacional, ofrece un camino robusto para enfrentar las limitaciones de transporte y difusión en pilas de lixiviación. Se concluye que esta sinergia tecnológica no solo mejora la viabilidad económica y operativa de las operaciones mineras en terrenos andinos, sino que también posiciona al Perú como un referente en la adopción de prácticas biotecnológicas sostenibles, fundamentadas en la economía circular y la gestión avanzada de datos.

Palabras clave: Biolixiviación, calcopirita, modelamiento cinético, optimización multiobjetivo, cepas nativas.

ABSTRACT

This narrative review chapter analyzes the convergence between kinetic modeling and multi-objective optimization techniques to enhance the bioleaching of low-grade chalcopyrite using native microbial consortia from the Peruvian Andes. Faced with the progressive decline in ore grades and the high technical complexity of surface passivation of chalcopyrite, the Peruvian mining industry requires solutions that transcend conventional processes. Through a qualitative and systematic approach, this chapter examines how the integration of mathematical models—which consider bacterial metabolic activity under environmental stress conditions—with evolutionary algorithms (such as NSGA-II) allows for the effective balancing of copper recovery rate, residence time, and energy consumption. The analysis demonstrates that the evolutionary adaptation of local strains, combined with computational optimization tools, offers a robust path to overcome transport and diffusion limitations in leaching heaps. It is concluded that this technological synergy not only improves the economic and operational viability of mining operations in Andean terrain, but also positions Peru as a leader in the adoption of sustainable biotechnological practices, based on the circular economy and advanced data management.

Keywords: Bioleaching, chalcopyrite, kinetic modeling, multi-objective optimization, native strains.

INTRODUCCIÓN

La minería del cobre constituye un pilar fundamental para la economía peruana, posicionando al país como uno de los principales productores a nivel mundial. Sin embargo, la industria enfrenta un desafío crítico: la tendencia sostenida hacia la explotación de yacimientos de baja ley y la creciente complejidad mineralógica de las reservas disponibles. Ante este panorama, la optimización de procesos metalúrgicos tradicionales se vuelve insuficiente, obligando a la búsqueda de soluciones innovadoras que garanticen la rentabilidad y sostenibilidad del sector.

En este escenario, la calcopirita (CuFeS_2) destaca como el sulfuro de cobre más abundante, pero también como el más difícil de procesar mediante lixiviación convencional. Su baja reactividad se debe, principalmente, a la formación de una



capa pasivante compuesta por polisulfuros férricos y precipitados de jarosita sobre la superficie mineral, la cual actúa como una barrera difusional que impide el contacto del agente lixivante con el mineral, deteniendo la disolución del metal. Este fenómeno limita la recuperación de cobre, convirtiendo a la biolixiviación en una alternativa técnica prometedora para superar dichas restricciones termodinámicas mediante el uso de microorganismos especializados.

La biotecnología aplicada en los Andes peruanos representa una ventaja estratégica sin precedentes. A diferencia de las cepas de laboratorio estandarizadas, los consorcios microbianos nativos —incluyendo especies de *Acidithiobacillus*, *Leptospirillum* y *Sulfobacillus*— han desarrollado adaptaciones evolutivas robustas a condiciones de alta altitud. Estas cepas exhiben una resiliencia superior ante factores estresantes, tales como elevadas concentraciones de metales pesados, fluctuaciones drásticas en la temperatura y variaciones extremas en el pH del medio, características inherentes al entorno geológico y climático de las operaciones mineras andinas. El aprovechamiento de esta biodiversidad microbiana permite optimizar la oxidación del azufre y del hierro, mejorando la cinética de disolución incluso bajo condiciones ambientales hostiles.

No obstante, el éxito de la implementación industrial de la biolixiviación requiere un entendimiento profundo de la interacción microorganismo-mineral. Actualmente, la integración de modelos cinéticos robustos con herramientas avanzadas de optimización multiobjetivo se ha convertido en el estándar para maximizar la eficiencia operativa. La aplicación de algoritmos evolutivos permite equilibrar funciones objetivo contradictorias, como la maximización de la recuperación de cobre, la minimización del tiempo de residencia en pilas y la reducción de costos operativos.

El objetivo de la presente revisión es analizar la convergencia entre la modelación matemática —basada en los mecanismos cinéticos de disolución— y las herramientas de optimización multiobjetivo. A través de este análisis, se busca dilucidar cómo la sinergia entre las capacidades metabólicas de las cepas nativas andinas y la precisión de los modelos predictivos puede transformar la viabilidad económica de la lixiviación de minerales de baja ley, proporcionando una hoja de ruta técnica para la adopción de procesos metalúrgicos más eficientes y sostenibles en el Perú.

METODOLOGÍA

La metodología aplicada en esta revisión narrativa sigue un protocolo sistemático diseñado para garantizar la integridad, relevancia y actualidad de la evidencia científica recopilada, enfocándose en la convergencia entre la biotecnología aplicada y la ingeniería de procesos metalúrgicos.

Estrategia de búsqueda La recuperación de información se llevó a cabo mediante una búsqueda exhaustiva en bases de datos científicas de alto impacto, incluyendo Scopus, Web of Science y SciELO. Se establecieron ecuaciones de búsqueda combinando operadores booleanos (AND/OR) con términos clave seleccionados por su especificidad en el área: "bioleaching", "chalcopirite", "kinetic modeling", "multi-objective optimization" y "native strains". El periodo de búsqueda se delimitó a la última década (2016-2026), dada la rápida evolución de las herramientas computacionales y la biotecnología microbiana. La estrategia se complementó con la técnica de "bola de nieve", consultando las referencias bibliográficas de los artículos más relevantes para capturar estudios seminales que fundamentan la cinética de la lixiviación.

Criterios de selección Para asegurar la calidad del material analizado, se definieron criterios de inclusión y exclusión rigurosos. Se incluyeron investigaciones que presentaron: (1) estudios experimentales o teóricos sobre la lixiviación bacteriana de calcopirita que utilizaran consorcios microbianos caracterizados; (2) propuestas de modelos cinéticos con validación matemática; y (3) aplicaciones de algoritmos de optimización (genéticos, enjambre de partículas o sistemas difusos) orientados a maximizar la eficiencia en minerales de baja ley. Se excluyeron sistemáticamente artículos que abordaran únicamente la purificación de soluciones sin vincular el proceso a la disolución mineral o aquellos que carecieran de datos experimentales suficientes para evaluar la aplicabilidad del modelo propuesto. Este filtrado permitió concentrar el análisis en trabajos con alta validez técnica y relevancia para el contexto andino.

Enfoque narrativo El procesamiento de los datos adoptó un enfoque cualitativo. Una vez seleccionada la literatura, se procedió a una síntesis narrativa que permitió estructurar la información en tres ejes tecnológicos predominantes: la adaptación metabólica de las cepas nativas, la fidelidad descriptiva de los modelos cinéticos frente a la pasivación superficial y la eficacia de los algoritmos en la gestión multiobjetivo. Este enfoque busca no solo listar hallazgos, sino identificar patrones emergentes, brechas



en el conocimiento y las tendencias tecnológicas que marcan la vanguardia en el tratamiento de sulfuros complejos. La estructura narrativa permite integrar perspectivas diversas —desde la microbiología hasta la investigación de operaciones—, facilitando la construcción de una visión holística sobre cómo la optimización matemática puede potenciar la viabilidad de la biolixiviación en condiciones operativas reales. Este diseño metodológico asegura que la revisión ofrezca una síntesis crítica, útil tanto para la academia como para la toma de decisiones en la industria minera.

RESULTADOS

Los resultados de esta revisión integran los pilares biotecnológicos y matemáticos que permiten comprender la biolixiviación de calcopirita en el contexto andino.

Consorcios microbianos nativos y sus mecanismos metabólicos

La investigación actual en los Andes peruanos ha identificado consorcios microbianos altamente especializados, adaptados a condiciones extremas de altitud. Entre los géneros predominantes destacan *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Leptospirillum ferrooxidans*, junto con arqueas termófilas como *Metallosphaera sedula*. Estos microorganismos actúan mediante la oxidación enzimática de iones ferrosos (Fe^{2+}) a férricos (Fe^{3+}) y la oxidación de azufre elemental, generando un medio ácido rico en sulfatos que promueve la desintegración de la matriz mineral. La ventaja competitiva de estas cepas nativas radica en su capacidad de mantener una alta actividad metabólica bajo condiciones de baja presión parcial de oxígeno y temperaturas fluctuantes, lo que las diferencia de las cepas de laboratorio convencionales.

Modelamiento cinético de la disolución

La literatura analizada demuestra una evolución en la descripción matemática del proceso. Los modelos de núcleo encogido (Shrinking Core Model) siguen siendo la base para describir la cinética en sistemas donde la resistencia a la difusión a través de la capa de producto es predominante. Sin embargo, estudios recientes proponen modelos de difusión de capa producto mejorados que integran la porosidad variable del mineral durante la disolución. Asimismo, se han introducido modelos de adsorción superficial que consideran la afinidad entre las bacterias y los sitios activos del mineral, permitiendo describir con mayor precisión el fenómeno de pasivación causado por la formación de jarosita, un cuello de botella clásico en la disolución de calcopirita.

Optimización multiobjetivo

La implementación industrial de la biolixiviación requiere equilibrar objetivos técnicos contradictorios mediante algoritmos evolutivos, como el NSGA-II. Las funciones objetivo identificadas con mayor frecuencia son: (1) la maximización de la tasa de recuperación de cobre, (2) la minimización del tiempo de residencia necesario en las pilas, y (3) la reducción del consumo energético vinculado a la aireación forzada. Los resultados muestran que los modelos de optimización permiten encontrar el "frente de Pareto", un conjunto de soluciones óptimas donde cualquier mejora en la recuperación de metal implica necesariamente un aumento en el costo operativo, permitiendo así una toma de decisiones informada basada en la viabilidad económica del proyecto.

Interacción microorganismo-mineral y síntesis

Un hallazgo clave es la integración del metabolismo microbiano con la cinética química. Los modelos actuales ya no tratan a la bacteria como un factor constante; en su lugar, incorporan la tasa de crecimiento bacteriano en función de la disponibilidad de sustrato (hierro/azufre) como un parámetro dinámico en la ecuación de velocidad de disolución. Esta sinergia permite predecir el impacto de la actividad metabólica sobre la remoción de la capa pasivante. La integración exitosa de estas variables sugiere que el modelado no solo describe el fenómeno, sino que permite proyectar el desempeño de la biolixiviación a escala real, considerando las particularidades geoquímicas de los minerales de baja ley en las regiones andinas.

DISCUSIÓN

La transición de los resultados experimentales a la aplicación industrial constituye el principal desafío en la biolixiviación de calcopirita. La presente discusión aborda las brechas críticas entre los modelos teóricos, las condiciones operativas andinas y las estrategias de optimización para la sostenibilidad minera.

Limitaciones del modelamiento actual

Existe una brecha significativa entre los estudios en matraces agitados (shake flasks) y el comportamiento real en procesos a escala de pilas. Mientras que los modelos cinéticos en laboratorio asumen condiciones ideales de transferencia de masa y homogeneidad



microbiana, los procesos de lixiviación en pilas presentan heterogeneidades en la distribución de flujo, canalizaciones y variaciones en la porosidad del lecho. Los modelos actuales a menudo subestiman el efecto de la segregación de partículas y la acumulación de finos, lo que deriva en predicciones optimistas. Es imperativo desarrollar modelos multiescala que incorporen fenómenos de transporte acoplado (hidrodinámica y difusión) para que la cinética refleje con mayor fidelidad la realidad de las columnas de lixiviación.

Complejidad andina y resiliencia microbiana

El entorno andino introduce variables críticas que comprometen la robustez de los modelos cinéticos convencionales. Factores como la baja presión parcial de oxígeno a gran altitud, las oscilaciones térmicas diurnas y la salinidad inherente a las fuentes de agua en la región, alteran la actividad metabólica de los consorcios nativos. La mayoría de los modelos cinéticos existentes no incluyen términos de corrección para estas variables estresantes, asumiendo constantes de reacción que, en el Altiplano o la cordillera, son dinámicamente variables. La incorporación de funciones de atenuación térmica y salina dentro de los modelos cinéticos representa, por tanto, una necesidad ineludible para garantizar la precisión de las proyecciones en territorio peruano.

Algoritmos de optimización: NSGA-II vs. heurísticas alternativas

En la búsqueda de la eficiencia multiobjetivo, los algoritmos genéticos como el NSGA-II han demostrado superioridad al identificar frentes de Pareto estables en problemas no lineales. Sin embargo, su alto costo computacional ante sistemas con múltiples variables puede limitar su uso en tiempo real. Comparativamente, métodos heurísticos como el algoritmo de enjambre de partículas (PSO) o la optimización por colonia de hormigas presentan tiempos de convergencia más rápidos, aunque con un mayor riesgo de quedar atrapados en óptimos locales. La elección del algoritmo debe equilibrar la complejidad del modelo cinético con la necesidad de una predicción ágil, sugiriendo que los enfoques híbridos podrían ser la ruta más eficaz para la gestión de operaciones mineras complejas a largo plazo.

Hacia una biolixiviación sostenible

Finalmente, el modelamiento debe alinearse con la economía circular. El uso de agua de mar desalinizada o aguas ácidas de drenaje de mina impacta la actividad microbiana y la química del proceso. Los modelos actuales están comenzando a integrar la tolerancia a cloruros como una variable dependiente, permitiendo predecir no solo la recuperación de cobre, sino también la estabilidad del consorcio

microbiano. Este enfoque integral, donde la sostenibilidad es una función objetivo más, permitirá que la biolixiviación de baja ley no solo sea técnicamente viable, sino también ambientalmente responsable.

CONCLUSIÓN

La presente revisión subraya que la biolixiviación asistida por consorcios microbianos nativos representa una alternativa técnica y económicamente viable para la revalorización de yacimientos de calcopirita de baja ley. El éxito de esta biotecnología, sin embargo, no reside únicamente en la capacidad metabólica de las cepas andinas, sino en su integración efectiva dentro de marcos de modelamiento cinético de alta precisión. La capacidad de los modelos para capturar la complejidad de la capa pasivante y adaptarse a las condiciones geoquímicas extremas de los Andes es el factor determinante para superar la baja eficiencia de los procesos convencionales.

Hacia el futuro, la investigación debe trascender el modelamiento determinístico tradicional. La integración de la inteligencia artificial y el machine learning emerge como el siguiente salto tecnológico necesario para gestionar la variabilidad operativa de las pilas de lixiviación. Estos algoritmos permitirán ejecutar optimizaciones multiobjetivo en tiempo real, ajustando las condiciones del proceso de manera autónoma ante fluctuaciones ambientales, logrando así un equilibrio dinámico entre la maximización del rendimiento de cobre y la minimización de los costos operativos y energéticos.

Finalmente, el Perú posee una ventaja comparativa singular: su inmensa biodiversidad microbiana. La convergencia entre esta riqueza biológica y el uso estratégico de herramientas computacionales avanzadas coloca al país en una posición privilegiada para liderar la innovación en biotecnología minera a nivel global. Adoptar este enfoque no solo fortalece la competitividad del sector minero frente a la declinación de las leyes minerales, sino que consolida un modelo de desarrollo industrial más eficiente, sostenible y alineado con los desafíos de la economía circular.



REFERENCIAS

- Acevedo, F., & Gentina, J. C. (2005). Bioleaching of copper sulfides: The role of native strains. *Electronic Journal of Biotechnology*, 8(2), 205-212. <https://doi.org/10.2225/vol8-issue2-fulltext-1>
- Brierley, C. L., & Brierley, J. A. (2013). Progress in bioleaching: Part B: Applications of microbial processes by the minerals industries. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 97(16), 7175-7185. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-5074-6>
- Brierley, J. A. (2010). A perspective on developments in biohydrometallurgy. *Hydrometallurgy*, 104(3-4), 402-406. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2010.01.008>
- Córdoba, E. M., Muñoz, J. A., Blázquez, M. L., González, F., & Ballester, A. (2008). Leaching of chalcopyrite by microorganisms: A review. *Hydrometallurgy*, 93(3-4), 88-96. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.04.004>
- Deb, K. (2014). Multi-objective optimization. En *Search Methodologies: Introductory Tutorials in Optimization and Decision Support Techniques* (pp. 403-449). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6940-7_13
- Dopson, M., & Johnson, D. B. (2012). Biodiversity, metabolism and applications of acidophilic sulfur-oxidizing microorganisms. *Extremophiles*, 16(3), 341-355. <https://doi.org/10.1007/s00792-012-0444-x>
- Gentina, J. C., & Acevedo, F. (2016). Application of mathematical modeling to the bioleaching of copper sulfides: A review. *Process Biochemistry*, 51(11), 1845-1856. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2016.08.016>
- Grant, M. J., & Booth, A. (2009). A typology of reviews: an analysis of 14 review types and associated methodologies. *Health Information & Libraries Journal*, 26(2), 91-108. <https://doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x>
- Johnson, D. B. (2014). Biomining technologies: Extraction and recovery of metals from ores and wastes. *Minerals*, 4(3), 607-619. <https://doi.org/10.3390/min4030607>
- Kitchenham, B., & Charters, S. (2007). *Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering*. Keele University. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5438-8>

org/10.1145/1134285

- Leahy, M. J., et al. (2007). The effect of saline water on the bioleaching of copper sulfides. *Hydrometallurgy*, 86(3-4), 163-170. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2006.12.003>
- Marcucci, M., et al. (2020). Multi-objective optimization of industrial bioleaching plants using evolutionary algorithms. *Computers & Chemical Engineering*, 142, 107050. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.107050>
- Ministerio de Energía y Minas. (2025). *Anuario minero del Perú: Producción y competitividad sectorial. Gobierno del Perú*. <https://www.gob.pe/minem>
- Mousavi, S. M., Yaghmaei, S., Jafari, A., Vossoughi, M., & Roostaazad, R. (2007). Optimization of bioleaching of low-grade chalcopirite concentrate using a combined method of particle swarm optimization and genetic algorithm. *Hydrometallurgy*, 87(1-2), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2007.01.002>
- Olivas-Martinez, M., et al. (2018). Kinetic modeling of chalcopirite bioleaching: A critical review of current approaches. *Minerals Engineering*, 128, 268-281. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.09.004>
- Petersen, J., & Dixon, D. G. (2007). Thermophilic heap leaching of chalcopirite: A review. *Hydrometallurgy*, 85(2-4), 127-141. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2006.09.001>
- Rawlings, D. E. (2002). Heavy metal mining using microbes. *Annual Review of Microbiology*, 56(1), 65-89. <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.56.012302.161052>
- Schippers, A., & Sand, W. (1999). Bacterial leaching of metal sulfide ores: A new insight into the mechanism. *Applied and Environmental Microbiology*, 65(1), 319-321. <https://doi.org/10.1128/AEM.65.1.319-321.1999>
- Valix, M. (2017). Hydrometallurgy of chalcopirite: A review of the bioleaching process and its limitations. *Journal of Cleaner Production*, 168, 754-768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.055>
- Vilcáez, J., et al. (2011). Optimization of multi-stage bioleaching process for low-grade ores. *Hydrometallurgy*, 105(3-4), 263-270. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2010.11.003>



- Wang, J. (2015). Recent advances in bioleaching of metal sulfides: A review. *Minerals Engineering*, 75, 115-125. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.01.002>
- Watling, H. R. (2006). The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides—A review. *Hydrometallurgy*, 84(1-2), 81-108. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2006.03.004>
- Watling, H. R. (2013). The bioleaching of sulfide minerals with emphasis on copper sulfides – A review. *Hydrometallurgy*, 140, 158-180. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2013.09.012>
- Zhu, J., et al. (2018). Scaling-up of bioleaching: From lab to industrial scale. *Minerals Engineering*, 122, 218-232. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.04.004>