

XXIX

**Modelos de economía
circular aplicados al
reprocesamiento de
relaves: revisión de
experiencias en América
Latina y su potencial en
Pasco (PERU) – 2024**

Osmer Ignacio Blanco Campos
Teofanes Salas Orihuela
Elvis Jesus Paredes Lopez
Rubén Edgar Palomino Isidro

Modelos de economía circular aplicados al reprocesamiento de relaves: revisión de experiencias en América Latina y su potencial en Pasco (PERU) – 2024

Osmer Ignacio Blanco Campos

Teofanes Salas Orihuela

Elvis Jesus Paredes Lopez

Rubén Edgar Palomino Isidro

RESUMEN

Objetivo: Sintetizar sistemáticamente la evidencia científica sobre modelos de economía circular aplicados al reprocesamiento de relaves mineros en América Latina (2015-2024) y evaluar su potencial de aplicación en Pasco, Perú. Métodos: Se realizó una revisión sistemática siguiendo directrices PRISMA 2020, con búsqueda en Scopus, Web of Science y SciELO usando términos relacionados con relaves mineros, economía circular y contexto latinoamericano. Los criterios de inclusión abarcaron estudios sobre valorización, reprocesamiento y recuperación de elementos de valor en relaves metálicos. Resultados: De 187 registros iniciales, se incluyeron 23 estudios que documentan tres vías principales de valorización: materiales de construcción (geopolimerización, agregados, cerámicos), recuperación de metales críticos y tierras raras, y tecnologías de recuperación de agua. Los estudios demostraron viabilidad técnica y económica variable, con casos exitosos de recuperación de cobre superior al 60% y eficiencias de recuperación de agua del 90%. Conclusiones: La evidencia consolida la factibilidad de modelos circulares para relaves en América Latina, sugiriendo un enfoque por fases para Pasco que integre valorización en construcción, recuperación metálica selectiva y gestión hídrica avanzada.



Palabras clave: economía circular, relaves mineros, valorización, reprocesamiento, América Latina, minería sostenible, gestión de residuos.

ABSTRACT

Objective: To systematically synthesize scientific evidence on circular economy models applied to mine tailings reprocessing in Latin America (2015-2024) and evaluate their application potential in Pasco, Peru. **Methods:** A systematic review was conducted following PRISMA 2020 guidelines, searching Scopus, Web of Science, and SciELO using terms related to mine tailings, circular economy, and Latin American context. Inclusion criteria encompassed studies on valorization, reprocessing, and value element recovery from metallic tailings. **Results:** From 187 initial records, 23 studies were included documenting three main valorization pathways: construction materials (geopolymerization, aggregates, ceramics), critical metals and rare earth recovery, and water recovery technologies. Studies demonstrated variable technical and economic feasibility, with successful cases of copper recovery exceeding 60% and water recovery efficiencies of 90%. **Conclusions:** Evidence consolidates the feasibility of circular models for tailings in Latin America, suggesting a phased approach for Pasco integrating construction valorization, selective metal recovery, and advanced water management.

Keywords: circular economy, mine tailings, valorization, reprocessing, Latin America, sustainable mining, waste management.

INTRODUCCIÓN

Los relaves mineros constituyen uno de los flujos de residuos industriales más voluminosos a escala planetaria, generándose anualmente miles de millones de toneladas que representan un desafío ambiental y de seguridad de magnitud extraordinaria. La industria extractiva global ha operado históricamente bajo el paradigma lineal de "extraer-usar-desechar", donde los materiales de baja ley son relegados a depósitos de

almacenamiento permanente que conllevan riesgos inherentes de fallas estructurales, drenaje ácido de roca y contaminación de recursos hídricos. Esta aproximación convencional ha resultado en la acumulación de pasivos ambientales masivos que comprometen la sostenibilidad de las operaciones mineras y generan externalidades negativas para las comunidades circundantes.

América Latina emerge como una región de particular relevancia en esta problemática, considerando su posición como líder mundial en la producción de minerales estratégicos y su extensa trayectoria minera que se remonta a períodos precolombinos. Países como Chile, Perú, Brasil y México albergan algunas de las operaciones mineras más grandes del planeta, lo que ha resultado en la generación acumulativa de volúmenes extraordinarios de relaves a lo largo de décadas de actividad extractiva. Cacciuttolo et al. (2023) documentan que los riesgos socioambientales asociados a los relaves de cobre y oro en el contexto andino trascienden los aspectos puramente técnicos, configurándose como amenazas multidimensionales para la salud pública y la estabilidad ecosistémica. Paralelamente, la región enfrenta desafíos adicionales relacionados con la gestión de pasivos ambientales mineros heredados, donde operaciones históricas han dejado un legado de sitios contaminados que requieren intervenciones de remediación a largo plazo.

En este contexto desafiante, el paradigma de la economía circular emerge como una oportunidad transformativa que permite reconceptualizar los relaves desde su condición tradicional de pasivo ambiental hacia su potencial como recurso valorizable. Este cambio paradigmático fundamental propone cerrar los ciclos de materiales mediante estrategias de reprocesamiento, valorización y recuperación de elementos de valor, generando simultáneamente beneficios económicos y reduciendo significativamente los riesgos ambientales asociados al almacenamiento perpetuo. La literatura científica reciente ha documentado el surgimiento de múltiples iniciativas y estudios de caso en la región latinoamericana que exploran sistemáticamente estas oportunidades de circularidad aplicada al sector minero.

La evidencia emergente revela que los avances en la aplicación de modelos de economía circular a relaves mineros en América Latina se concentran principalmente en dos vías tecnológicas diferenciadas pero complementarias. Qaidi et al. (2022) demuestran mediante revisión sistemática que la valorización de relaves en materiales de construcción, particularmente a través de procesos de geopolimerización, representa una ruta tecnológicamente madura con aplicaciones documentadas en contextos chilenos. Esta aproximación permite el procesamiento de grandes volúmenes de material residual para generar productos con propiedades cementicias



que pueden sustituir parcialmente al cemento Portland convencional, reduciendo simultáneamente las emisiones de CO₂ asociadas a la industria cementera.

Complementariamente, la segunda vía principal se enfoca en la recuperación selectiva de elementos de alto valor económico, incluyendo metales base, metales críticos y agua de proceso. Araya et al. (2020) establecen mediante modelado tecno-económico riguroso que la recuperación de metales críticos como vanadio y escandio desde relaves de cobre puede alcanzar viabilidad económica sustancial, con valores presentes netos positivos que justifican la inversión en tecnologías de reprocesamiento avanzadas. Esta línea de investigación se ve reforzada por los hallazgos de Echeverry et al. (2023), quienes documentan eficiencias de recuperación superiores al 93% para tierras raras (Ce, La, Nd) mediante procesos hidrometalúrgicos optimizados aplicados a relaves auríferos colombianos.

La recuperación de agua emerge como un componente crítico adicional, particularmente relevante en el contexto andino donde la escasez hídrica constituye un factor limitante para el desarrollo minero sostenible. Hamraoui et al. (2024) consolidan evidencia sistemática que demuestra la factibilidad técnica de tecnologías avanzadas de desaguado y filtración que permiten alcanzar eficiencias de recuperación superiores al 90%, contribuyendo significativamente a la resiliencia hídrica de las operaciones mineras en regiones áridas y semiáridas características de la región andina.

No obstante los avances documentados, persiste una brecha de conocimiento crítica en la literatura especializada que limita la traducción efectiva de estos desarrollos hacia implementaciones prácticas a escala regional. Específicamente, se identifica la ausencia de una síntesis sistemática integral que consolide y compare las diversas experiencias latinoamericanas en economía circular aplicada a relaves, evalúe críticamente las diferentes vías tecnológicas y modelos de negocio implementados, y analice sus implicaciones conjuntas desde perspectivas técnicas, económicas y ambientales integradas.

Esta carencia de una visión consolidada e integrada constituye un obstáculo significativo para la toma de decisiones informadas por parte de empresas mineras, formuladores de políticas públicas e inversionistas interesados en implementar modelos de economía circular en contextos específicos. Kinnunen et al. (2022) argumentan que la viabilidad de los modelos de negocio circulares en minería depende críticamente de la integración efectiva de cadenas de valor y del desarrollo de marcos regulatorios habilitantes, aspectos que requieren una comprensión profunda de las experiencias acumuladas y las lecciones aprendidas a nivel regional.

El caso de Pasco, región emblemática de la minería peruana con una tradición extractiva centenaria, ilustra paradigmáticamente los desafíos y oportunidades asociados a la implementación de modelos de economía circular para relaves. La región alberga algunas de las operaciones mineras más significativas del país y, simultáneamente, enfrenta desafíos ambientales y sociales complejos derivados de décadas de actividad extractiva intensiva. La ausencia de un marco de referencia sistemático basado en evidencia regional limita la capacidad de desarrollar estrategias de valorización de relaves adaptadas específicamente al contexto local, considerando las particularidades geológicas, tecnológicas, económicas y regulatorias propias de la región.

Ante esta problemática identificada, el presente estudio se propuso abordar sistemáticamente la brecha de conocimiento existente mediante una aproximación metodológica rigurosa que permita consolidar, analizar y sintetizar la evidencia científica disponible sobre modelos de economía circular aplicados a relaves mineros en el contexto latinoamericano. El objetivo principal consistió en sintetizar sistemáticamente la evidencia científica sobre los modelos de economía circular aplicados al reprocesamiento y valorización de relaves mineros en América Latina durante el período 2015-2024, proporcionando un marco de referencia integral para la toma de decisiones en contextos específicos como el de Pasco.

Los objetivos específicos que orientaron el desarrollo de esta investigación incluyeron: primero, identificar y categorizar exhaustivamente las principales vías tecnológicas de valorización de relaves reportadas en la literatura regional, estableciendo una tipología comprensiva de las aproximaciones disponibles; segundo, analizar críticamente los resultados técnicos, económicos y ambientales documentados en las experiencias implementadas, evaluando la robustez y transferibilidad de los hallazgos reportados; tercero, evaluar sistemáticamente los factores habilitantes y las barreras identificadas para la implementación exitosa de estos modelos, proporcionando perspectivas para el diseño de estrategias de implementación efectivas; y cuarto, discutir específicamente el potencial de aplicación de estos hallazgos consolidados para el contexto particular de los pasivos ambientales mineros en Pasco, Perú, derivando recomendaciones prácticas basadas en evidencia para la región.



METODOLOGÍA

La presente revisión sistemática se desarrolló siguiendo rigurosamente las directrices establecidas en PRISMA 2020 para garantizar la máxima transparencia, reproducibilidad y rigor metodológico en el proceso de síntesis de evidencia. El protocolo de investigación fue diseñado para identificar, evaluar y sintetizar sistemáticamente toda la evidencia científica disponible sobre modelos de economía circular aplicados al reprocesamiento de relaves mineros en el contexto geográfico de América Latina durante el período temporal comprendido entre enero de 2015 y septiembre de 2024.

Los criterios de elegibilidad fueron establecidos utilizando el formato PICO estructurado, definiendo con precisión inequívoca los parámetros de inclusión y exclusión. La población de interés se delimitó específicamente a relaves mineros generados por actividades de minería metálica y ubicados geográficamente en países de América Latina, excluyendo explícitamente residuos de minería no metálica, otros tipos de residuos mineros distintos a relaves, y estudios desarrollados exclusivamente en regiones externas a América Latina. La intervención de interés se focalizó en la aplicación de modelos de negocio, tecnologías, estrategias o políticas de economía circular orientadas al reprocesamiento, valorización, reciclaje o remediación de relaves, incluyendo específicamente la recuperación de metales, minerales, agua o la conversión del residuo en nuevos materiales para construcción.

Los criterios de exclusión eliminaron estudios que únicamente describieran la problemática ambiental de los relaves sin proponer intervenciones de valorización, así como investigaciones enfocadas exclusivamente en aspectos de contención física o estabilidad geotécnica sin componentes de reprocesamiento. Respecto a los resultados de interés, se estableció la necesidad de que los estudios reportaran al menos uno de los siguientes tipos de hallazgos: resultados técnicos incluyendo eficiencias de recuperación de metales o minerales, descripciones de procesos tecnológicos hidrometalúrgicos o pirometalúrgicos, y caracterización de nuevos materiales; resultados económicos abarcando análisis de viabilidad, estructuras de costos, evaluaciones de rentabilidad y modelos de negocio; resultados ambientales comprendiendo reducción de contaminación, remediación de sitios y análisis de ciclo de vida; y resultados sociales o políticos incluyendo marcos regulatorios y políticas de fomento.

Las fuentes de información consultadas incluyeron tres bases de datos científicas de reconocido prestigio internacional: Scopus, Web of Science Core Collection y SciELO.

La estrategia de búsqueda fue diseñada combinando cuatro conceptos clave mediante operadores booleanos: relaves mineros (incluyendo términos como "mine tailings", "mining waste", "relaves", "jales", "tailings dam"), intervenciones de reprocesamiento y valorización ("reprocessing", "retreatment", "recovery", "recycling", "valorization", "remediation"), economía circular ("circular economy", "economía circular", "waste to value", "resource recovery"), y contexto geográfico latinoamericano ("Latin America", "América Latina", junto con nombres específicos de países).

Para Scopus se utilizó la ecuación de búsqueda: (TITLE-ABS-KEY("mine tailings" OR "mining waste" OR relave* OR jale* OR "tailings dam*")) AND (TITLE-ABS-KEY(reprocess* OR retreat* OR recover* OR recycl* OR valorizat* OR remediat* OR "circular economy" OR "economía circular" OR "waste to value" OR "resource recovery")) AND (TITLE-ABS-KEY("latin america" OR "américa latina" OR peru OR chile OR brazil OR brasil OR mexico OR méxico OR argentina OR colombia OR bolivia OR ecuador)) AND (PUBYEAR > 2014). Para Web of Science se empleó una estrategia equivalente adaptada a la sintaxis específica de la plataforma, mientras que para SciELO se utilizaron combinaciones simplificadas considerando las limitaciones de la interfaz de búsqueda avanzada.

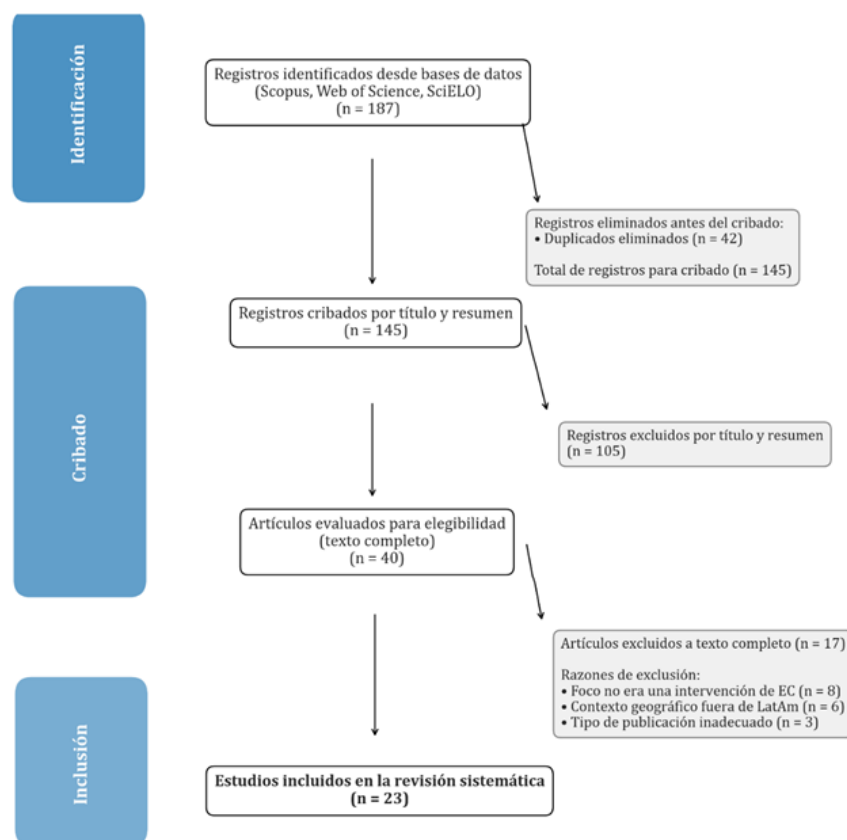


Figura 1. Diagrama de flujo prisma 2020.



El proceso de selección de estudios siguió rigurosamente el flujo metodológico PRISMA 2020. La búsqueda inicial en las tres bases de datos identificó un total de 187 registros bibliográficos. Posteriormente, se procedió a la eliminación de 42 duplicados mediante software especializado y verificación manual, resultando en 145 artículos únicos para evaluación. Durante la fase de cribado por título y resumen, dos revisores independientes evaluaron la pertinencia de cada registro respecto a los criterios de elegibilidad establecidos, excluyendo 105 artículos por no cumplir con los parámetros de inclusión definidos. Los 40 artículos restantes fueron sometidos a evaluación de texto completo, donde 17 estudios adicionales fueron excluidos por razones específicas incluyendo contexto geográfico inadecuado, ausencia de intervenciones de valorización claramente definidas, y tipos de publicación no elegibles según los criterios establecidos.

El proceso de selección culminó con la inclusión final de 23 estudios que conformaron la base de evidencia para esta revisión sistemática. La extracción de datos fue realizada por dos revisores independientes utilizando una plantilla estandarizada y pre-testeada desarrollada en hoja de cálculo estructurada. Las discrepancias en la extracción fueron resueltas mediante discusión y consenso entre los revisores. La información extraída se organizó sistemáticamente para caracterizar las propiedades metodológicas de los estudios incluidos y para facilitar la síntesis posterior de sus hallazgos principales.

Tabla 1. Características de los estudios incluidos (n=23).

Autor(es) y Año	País de Origen del Caso de Estudio	Diseño del Estudio	Tipo de Relave	Foco Principal de la Intervención de EC
Araya, N., et al. (2020)	Chile	Modelado Tecnológico-económico / Experimental	Cobre	Recuperación de Metales (Metales críticos)
Cacciuttolo, C., et al. (2023)	Chile, Perú	Estudio de Caso / Análisis Multidisciplinario	Cobre, Oro	Gestión de Riesgos y Valorización
Araujo, F., et al. (2022)	Brasil (con mención a LatAm)	Revisión de Literatura	Hierro	Materiales de Construcción / Reciclaje
Araya, N., et al. (2021)	Chile	Análisis Económico (Opciones Reales)	Cobre	Recuperación de Metales (Metales críticos)
Martins, N., et al. (2021)	Brasil (con casos de LatAm)	Revisión de Literatura	Sulfídicos (Cobre, otros)	Materiales de Construcción (Cemento, agregados)

Autor(es) y Año	País de Origen del Caso de Estudio	Diseño del Estudio	Tipo de Relave	Foco Principal de la Intervención de EC
Adewuyi, S., et al. (2024)	Perú (mencionado) / LatAm	Revisión de Literatura	Minerales metálicos	Recuperación de Agua (Desagado y filtración)
Valdez, J., et al. (2020)	Perú	Estudio de Caso / Experimental	Oro	Materiales de Construcción (Ladrillos)
Qaidi, S., et al. (2022)	Chile (mencionado) / Global	Revisión Sistemática	Minerales metálicos (ej. Cobre)	Materiales de Construcción (Geopolimerización)
Vilaça, A., et al. (2022)	Brasil	Estudio de Caso / Análisis de Métricas	Hierro	Materiales de Construcción (Cerámicos)
Cacciuttolo, C., & Marinovic, A. (2022)	Chile, Perú	Revisión de Literatura	Minerales metálicos	Recuperación de Agua (Relaves espesados)
Cacciuttolo, C., & Pérez, G. (2022)	Chile, Perú	Estudio de Caso / Revisión de Prácticas	Minerales metálicos	Recuperación de Agua (Relaves filtrados)
Kinnunen, P., et al. (2022)	Finlandia (con comparación a Chile)	Revisión de Literatura	Minerales metálicos	Estrategias y Marcos Regulatorios de EC
Echeverry, L., et al. (2023)	Colombia	Estudio Experimental	Oro (aluvial)	Recuperación de Metales (Tierras Raras)
Abbadi, A., & Mucsi, G. (2024)	Chile (mencionado) / Global	Revisión de Literatura	Minerales metálicos	Recuperación de Metales (Tierras Raras)
Akeed, M. (2022)	General (aplicable a LatAm)	Revisión de Literatura (Preprint)	Minerales metálicos	Materiales de Construcción (Geopolimerización)
Sarker, S., et al. (2022)	Chile (mencionado) / Global	Revisión de Literatura	Minerales metálicos	Recuperación de Metales (Minerales críticos)
Mokhtari, P., et al. (2025)	General (aplicable a LatAm)	Estudio Experimental	Carbón sulfídico (extrapolable)	Materiales de Construcción (Geopolimerización)
Santibáñez, L., et al. (2022)	Probable LatAm (contexto no especificado)	Estudio Experimental	Cobre	Recuperación de Metales (Fe, Cu, Al)
Cacciuttolo, C., & Cano, D. (2022)	Chile, Perú	Estudio de Caso	Oro, Cobre	Gestión de Impactos Ambientales (Derrames)
Hamraoui, L., et al. (2024)	Chile (mencionado) / Global	Revisión Sistemática	Minerales metálicos	Recuperación de Agua
Enríquez, A., et al. (2022)	Ecuador	Estudio de Caso / Experimental	Oro	Materiales de Construcción (Adoquines)

Autor(es) y Año	País de Origen del Caso de Estudio	Diseño del Estudio	Tipo de Relave	Foco Principal de la Intervención de EC
Suntasig, E., et al. (2024)	Ecuador, Perú	Revisión Sistemática	Suelos/Relaves mineros	Restauración de Suelos / Fitorremediación
Ruiz, Á., & Juárez, J. (2022)	México	Estudio de Caso / Experimental	Minerales polimetálicos	Recuperación de Metales (Cobre)

La evaluación de la calidad metodológica y el riesgo de sesgo de los estudios incluidos fue conducida por dos revisores independientes utilizando las herramientas de evaluación crítica del Joanna Briggs Institute, específicamente adaptadas a la diversidad de diseños de estudio identificados. Se empleó la "JBI Critical Appraisal Checklist for Case Studies" para evaluar los estudios de caso, la "JBI Checklist for Analytical Cross-Sectional Studies" para los estudios experimentales, y la "JBI Checklist for Systematic Reviews" para las revisiones sistemáticas incluidas en la muestra. Los resultados de esta evaluación fueron considerados sistemáticamente durante la interpretación de la fortaleza de la evidencia y la formulación de conclusiones, permitiendo una valoración crítica de la confiabilidad y transferibilidad de los hallazgos reportados en cada estudio individual y en el conjunto de la evidencia sintetizada.

RESULTADOS

Vías Tecnológicas para la Valorización de Relaves

El análisis de los estudios incluidos reveló la existencia de múltiples aproximaciones tecnológicas para la valorización de relaves mineros en América Latina, las cuales pueden categorizarse en tres estrategias principales diferenciadas por su enfoque técnico, volumen de procesamiento y complejidad tecnológica. La primera categoría comprende las tecnologías orientadas a la producción de materiales de construcción, que se caracterizan por su capacidad de procesamiento de alto volumen y su relativa simplicidad técnica comparativa.

Tabla 2. Síntesis de vías tecnológicas para la valorización de relaves en materiales de construcción (n=8).

Vía Tecnológica	Autores	Descripción del Proceso	Resultados Técnicos Clave	País del Caso
Geopolimerización	Qaidi, S., et al. (2022); Akeed, M. (2022); Mokhtari, P., et al. (2025)	Proceso de activación alcalina de los precursores de aluminosilicato presentes en los relaves para formar un aglutinante inorgánico (polímero) con propiedades cementicias, capaz de inmovilizar metales pesados.	Desarrollo de materiales de construcción sostenibles con propiedades mecánicas y de durabilidad adecuadas, evaluando factores como tiempo de curado y composición química. Se destaca su potencial para reducir las emisiones de CO ₂ en comparación con el cemento Portland.	Chile (mencionado), Global (aplicable a LatAm)
Uso como Agregado para Hormigón y Adoquines	Enríquez, A., et al. (2022); Martins, N., et al. (2021)	Sustitución de agregados convencionales (arena) por relaves mineros en la fabricación de productos de hormigón como adoquines, bloques o morteros, previa caracterización físico-química y mineralógica.	Enríquez et al.: Se logra la fabricación de adoquines que cumplen normas técnicas (ASTM C936, >55 MPa de resistencia a la compresión) con sustituciones del 20-40% de arena, con bajo riesgo de lixiviación. Martins et al.: Se revisa el potencial para la inmovilización de elementos peligrosos y la mitigación del Drenaje Ácido de Roca (DAR).	Ecuador, Brasil
Fabricación de Ladrillos y Materiales Cerámicos	Valdez, J., et al. (2020); Vilaça, A., et al. (2022)	Empleo de relaves mineros como materia prima principal o secundaria en procesos de moldeo y cocción a altas temperaturas para producir ladrillos, tejas y otros productos cerámicos para la industria de la construcción.	Valdez et al.: Diseño e implementación de un proceso productivo de ladrillos, validando propiedades del material y promoviendo el desarrollo económico local. Vilaça et al.: Aplicación de métricas de EC para evaluar la factibilidad técnica y el potencial de mercado de los productos cerámicos.	Perú, Brasil
Reciclaje y Reutilización (Revisión General)	Araujo, F., et al. (2022)	Revisión de un portafolio de tecnologías que incluyen flotación, separación magnética, biolixiviación y otras técnicas para acondicionar los relaves y permitir su reciclaje en diversas aplicaciones, incluyendo la construcción.	Síntesis de datos empíricos sobre la eficiencia de diferentes procesos y su sostenibilidad. Se reportan beneficios ambientales y se analizan las limitaciones técnicas para la implementación a gran escala de estas rutas de reciclaje.	Brasil (con implicaciones para LatAm)



Dentro de las tecnologías de valorización para materiales constructivos, la geopolimerización emergió como la ruta más ampliamente documentada y técnicamente desarrollada. Qaidi et al. (2022) consolidaron evidencia sistemática internacional que incluye experiencias chilenas, demostrando que los procesos de activación alcalina de precursores de aluminosilicato presentes naturalmente en relaves mineros pueden generar aglutinantes inorgánicos con propiedades cementicias superiores. Estos materiales geopoliméricos exhibieron capacidades demostradas para inmovilizar metales pesados y reducir significativamente las emisiones de CO₂ comparativamente al cemento Portland convencional. Akeed (2022) complementa estos hallazgos mediante análisis de aplicabilidad regional, evidenciando el potencial de transferencia tecnológica hacia contextos latinoamericanos específicos.

Las tecnologías de utilización como agregados para hormigón y productos de construcción representan la segunda subcategoría más documentada. Enríquez et al. (2022) reportaron resultados experimentales exitosos en la fabricación de adoquines utilizando relaves auríferos ecuatorianos como sustituto parcial de agregados convencionales, alcanzando sustituciones del 20-40% de arena mientras mantuvieron cumplimiento estricto con normativas técnicas internacionales ASTM C936, específicamente resistencias a la compresión superiores a 55 MPa con riesgo mínimo de lixiviación de contaminantes. Martins et al. (2021) ampliaron esta perspectiva mediante revisión comprehensiva del potencial de inmovilización de elementos peligrosos y mitigación efectiva del drenaje ácido de roca, estableciendo marcos conceptuales para la evaluación de riesgos en aplicaciones constructivas.

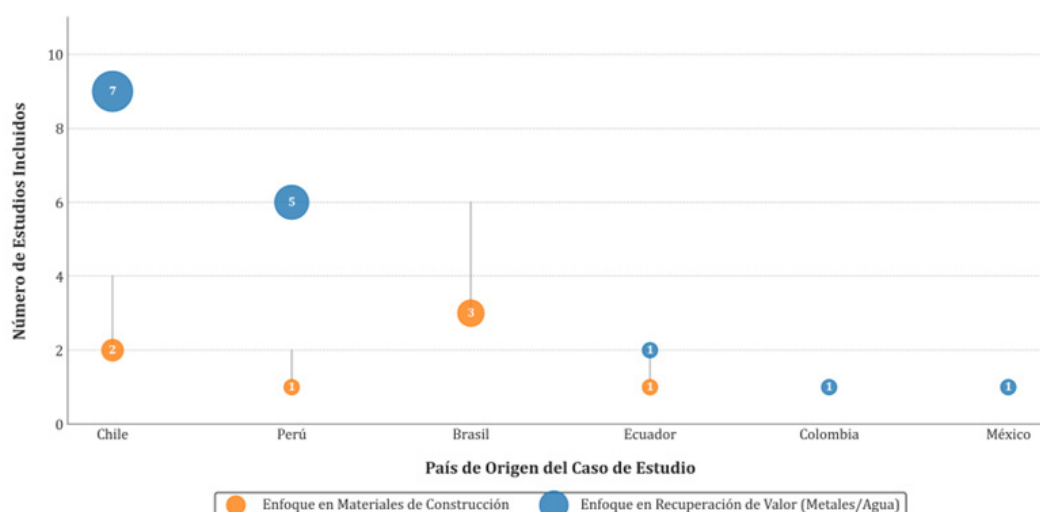


Figura 2. Mapa de Experiencias en América Latina.

Recuperación de Elementos de Valor

La segunda estrategia principal identificada se enfoca en la recuperación selectiva de elementos de alto valor económico, incluyendo metales críticos, tierras raras, metales base y agua de proceso. Esta aproximación se caracteriza por su mayor complejidad tecnológica pero también por su potencial de generación de valor económico significativamente superior por unidad de material procesado.

Tabla 3. Síntesis de tecnologías para la recuperación de elementos de valor (metales, minerales y agua) (n=13).

Recurso Recuperado	Autores	Tecnología Aplicada	Eficiencia o Resultado Reportado	País del Caso
Metales Críticos y Tierras Raras (REE)	Araya, N., et al. (2020); Araya, N., et al. (2021); Sarker, S., et al. (2022)	Procesos hidrometalúrgicos y modelado tecno-económico, incluyendo Análisis de Opciones Reales para evaluar la rentabilidad bajo incertidumbre.	Demostración de viabilidad económica con Valor Presente Neto (NPV) positivo para la recuperación de Vanadio (76 M USD) y Escandio. Síntesis de tecnologías para valorizar recursos secundarios.	Chile
Tierras Raras (REE: Ce, La, Nd)	Echeverry, L., et al. (2023); Abbadi, A., & Mucsi, G. (2024)	Lixiviación ácida, precipitación selectiva y calcinación. Revisión de métodos hidro y bio-hidrometalúrgicos.	Echeverry et al.: Se logra una eficiencia de recuperación superior al 93% para Ce, La y Nd a escala de laboratorio. Abbadi & Mucsi: Síntesis de rutas de proceso, incluyendo pretratamiento y activación mecánica.	Colombia, Global (con mención a Chile)
Metales Base (Cu, Fe, Al)	Ruiz, Á., & Juárez, J. (2022); Santibáñez, L., et al. (2022)	Lixiviación ácida (H ₂ SO ₄ y HCl) seguida de extracción por solvente y electrodeposición (SX/EW).	Ruiz & Juárez: Recuperación de más del 60% del cobre contenido, transformando un residuo en un producto comercializable. Santibáñez et al.: Optimización del proceso de lixiviación para la extracción de Fe, Cu y Al.	México, Probable LatAm
Agua	Hamraoui, L., et al. (2024); Adewuyi, S., et al. (2024); Cacciuttolo & Marinovic (2022); Cacciuttolo & Pérez (2022)	Revisión y análisis de tecnologías avanzadas de desaguado: espesado, filtración a presión, centrifugación.	Se reportan eficiencias de recuperación de agua superiores al 90%, reducción significativa del estrés hídrico, menor huella de superficie de los depósitos y una drástica disminución del riesgo de fallas por licuefacción sísmica.	Global (con casos de Chile y Perú)

Recurso Recuperado	Autores	Tecnología Aplicada	Eficiencia o Resultado Reportado	País del Caso
Marcos de Evaluación y Estrategias Generales	Cacciuttolo, C., et al. (2023); Kinnunen, P., et al. (2022)	Marcos de gestión integral de riesgos socio-ambientales; Análisis de políticas y modelos de negocio para la economía circular.	Propuesta de estrategias que integran la valorización y el reprocesamiento como herramientas para mitigar riesgos. Análisis de los marcos regulatorios y económicos como factores habilitantes o barreras para la implementación.	Chile, Perú, Finlandia (comparado con Chile)

Los estudios de Araya et al. (2020, 2021) establecieron precedentes metodológicos fundamentales para la evaluación tecno-económica de proyectos de recuperación de metales críticos. Mediante modelado determinístico y análisis de opciones reales bajo incertidumbre, demostraron viabilidad económica robusta para la recuperación de vanadio con valores presentes netos positivos de 76 millones de USD, así como rentabilidad confirmada para proyectos de recuperación de escandio bajo diversos escenarios de volatilidad de precios de materias primas. Sarker et al. (2022) complementan esta evidencia mediante síntesis de tecnologías disponibles para valorización de recursos secundarios en contextos mineros globales con aplicabilidad específica a condiciones latinoamericanas.

La recuperación de tierras raras representa una subcategoría de particular interés estratégico debido a la creciente demanda global de estos elementos en tecnologías verdes y aplicaciones de alta tecnología. Echeverry et al. (2023) reportaron eficiencias de recuperación excepcionales superiores al 93% para cerio, lantano y neodimio mediante procesos hidrometalúrgicos optimizados que incluyen lixiviación ácida, precipitación selectiva y calcinación controlada aplicados a relaves auríferos aluviales colombianos. Abbadi y Mucsi (2024) proporcionan contexto metodológico adicional mediante revisión de métodos hidro y bio-hidrometalúrgicos, incluyendo estrategias de pretratamiento y activación mecánica que optimizan las eficiencias de extracción.

La recuperación de metales base, particularmente cobre, hierro y aluminio, constituye una aproximación de implementación más directa debido a la madurez tecnológica de los procesos hidrometalúrgicos convencionales. Ruiz y Juárez (2022) documentaron recuperaciones superiores al 60% del contenido de cobre mediante procesos de lixiviación ácida seguidos de extracción por solvente y electrodeposición, transformando efectivamente residuos en productos metálicos comercializables. Santibáñez et al. (2022) contribuyen mediante optimización de parámetros de

lixiviación para extracción simultánea de múltiples metales base, demostrando la factibilidad de enfoques de recuperación integrada.

Viabilidad Económica y Desempeño Ambiental

El análisis de viabilidad económica y impacto ambiental reveló heterogeneidad significativa en las métricas de evaluación empleadas, así como en los resultados reportados, reflejando la diversidad de contextos tecnológicos, geológicos y económicos característicos de la región latinoamericana.

Tabla 4.

Síntesis de hallazgos sobre viabilidad económica e impacto ambiental (n=8).

Autor(es) y Año	Enfoque del Estudio	Métricas Económicas Reportadas	Beneficios Ambientales Cuantificados o Descritos	Factores Habilitantes y Barreras
Araya, N., et al. (2020, 2021)	Modelado tecno-económico para la recuperación de metales críticos	Viabilidad demostrada: Valor Presente Neto (NPV) positivo de 76 M USD para la recuperación de V_2O_5 . Análisis de Opciones Reales confirma la rentabilidad para Escandio bajo escenarios de incertidumbre de precios.	Reducción del drenaje ácido de roca (DAR), menor dependencia de recursos hídricos frescos y disminución del volumen de residuos peligrosos.	Habilitante: Altos precios de los metales críticos. Barrera: Incertidumbre y volatilidad del mercado de metales.
Enríquez, A., et al. (2022)	Estudio de caso para la producción de adoquines	Económicamente viable para la construcción local, sustituyendo agregados comerciales y promoviendo la producción local.	Reducción del volumen de relaves en presas, disminuyendo el riesgo de fallas y la erosión. Bajo riesgo de lixiviación de contaminantes en el producto final.	Habilitante: Cumplimiento de normas técnicas de construcción. Barrera: Aceptación del producto en el mercado y logística de la cadena de suministro.
Valdez, J., et al. (2020)	Estudio de caso para la producción de ladrillos	Impacto económico positivo a nivel local mediante la creación de una nueva actividad productiva.	Valorización directa de un pasivo ambiental, reduciendo la necesidad de disposición final y el área de impacto.	Habilitante: Potencial de desarrollo social y económico en la comunidad minera. Barrera: Requerimientos energéticos del proceso de cocción.

Autor(es) y Año	Enfoque del Estudio	Métricas Económicas Reportadas	Beneficios Ambientales Cuantificados o Descritos	Factores Habilitantes y Barreras
Hamraoui, L., et al. (2024)	Revisión sistemática sobre la recuperación de agua	Mejora de la eficiencia operativa en minas a gran escala (ej. Codelco), reduciendo costos asociados al uso de agua fresca.	Recuperación de >90% del agua de proceso, reducción drástica del estrés hídrico en regiones áridas y mejora de la estabilidad física y química de los depósitos.	Habilitante: Necesidad de resiliencia hídrica. Barrera: Altos costos de inversión inicial (CAPEX) para tecnologías de filtrado.
Cacciuttolo, C., et al. (2023)	Análisis multidisciplinario de riesgos socio-ambientales	La viabilidad económica se vincula a la adopción de tecnologías BAT/BAP/BEP (Mejores Técnicas Disponibles) que reducen los riesgos y los costos de cierre a largo plazo.	Mitigación de riesgos de toxicidad por metales pesados y DAR. Reducción de pasivos ambientales a largo plazo.	Habilitante: Regulaciones ambientales más estrictas. Barrera: Necesidad de una fuerte licencia social para operar y reprocesar.
Martins, N., et al. (2021)	Revisión sobre el uso de relaves sulfídicos en construcción	Beneficios económicos indirectos: ahorro energético por menores temperaturas de producción de cementos alternativos.	Mitigación efectiva del DAR al encapsular sulfuros en una matriz cementicia; inmovilización de elementos peligrosos.	Habilitante: Disponibilidad de grandes volúmenes de materia prima. Barrera: Falta de estandarización y regulación para nuevos materiales de construcción.
Kinnunen, P., et al. (2022)	Revisión de estrategias y políticas de Economía Circular	El análisis se centra en la viabilidad de los modelos de negocio, argumentando que la rentabilidad depende de la integración de cadenas de valor y de incentivos.	Los beneficios ambientales son el principal motor para el desarrollo de políticas de EC.	Habilitante: Marcos regulatorios claros y políticas de fomento (ej. incentivos fiscales). Barrera: Falta de mercados para los productos secundarios.
Ruiz, Á., & Juárez, J. (2022)	Estudio de caso para la recuperación de cobre	Agrega valor económico directo al residuo al generar un producto metálico comercializable.	Minimiza la contaminación ambiental asociada al almacenamiento a largo plazo de los relaves.	Habilitante: Contenido metálico residual suficientemente alto en los relaves. Barrera: Eficiencia y costos del proceso de lixiviación a escala industrial.

Los estudios de viabilidad económica más robustos metodológicamente fueron desarrollados por Araya et al. (2020, 2021), quienes emplearon modelado tecno-económico avanzado y análisis de opciones reales para evaluar proyectos de recuperación de metales críticos bajo condiciones de incertidumbre. Sus resultados demostraron valores presentes netos positivos sustanciales de 76 millones de USD para recuperación de pentóxido de vanadio, confirmando rentabilidad para proyectos de recuperación de escandio mediante análisis de sensibilidad que considera volatilidad de precios y costos operacionales. Los factores habilitantes identificados incluyeron precios sostenidamente altos de metales críticos, mientras que las barreras principales se relacionaron con incertidumbre de mercados y volatilidad de commodities.

Hamraoui et al. (2024) proporcionaron evidencia sistemática sobre la viabilidad económica de tecnologías de recuperación de agua, reportando mejoras sustanciales en eficiencia operativa para operaciones mineras a gran escala, ejemplificadas por implementaciones en Codelco que redujeron significativamente costos asociados al uso de agua fresca. Las tecnologías evaluadas alcanzaron eficiencias de recuperación superiores al 90%, contribuyendo drásticamente a la reducción del estrés hídrico en regiones áridas andinas y mejorando la estabilidad física y química de los depósitos de relaves mediante reducción de contenido de humedad.

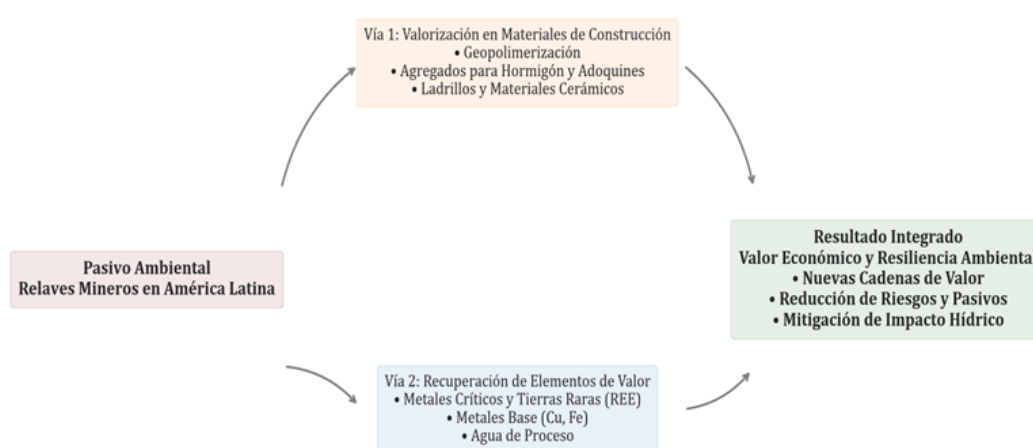


Figura 3. Marco Conceptual de Modelos de EC para Relaves.

Las evaluaciones de impacto ambiental identificaron beneficios consistentes a través de múltiples categorías de intervención. Cacciuttolo et al. (2023) desarrollaron marcos de evaluación multidisciplinaria que vinculan la viabilidad económica con la adopción de mejores técnicas disponibles, demostrando que las inversiones



en tecnologías de valorización generan retornos económicos positivos mediante reducción de costos de cierre a largo plazo y mitigación de riesgos de responsabilidad ambiental. Los beneficios ambientales cuantificados incluyen mitigación efectiva de riesgos de toxicidad por metales pesados, reducción de generación de drenaje ácido de roca, y disminución sustancial de pasivos ambientales acumulativos.

DISCUSIÓN

La evidencia consolidada a través de esta revisión sistemática demuestra de manera inequívoca que la aplicación de modelos de economía circular al reprocesamiento de relaves mineros en América Latina constituye una vía técnica y económicamente prometedora, respaldada por un cuerpo de investigación robusto aunque caracterizado por concentración geográfica e intensidad investigativa desigual entre países de la región. La predominancia de estudios desarrollados en Chile y Brasil refleja claramente la madurez relativa de sus marcos institucionales de investigación, la disponibilidad de infraestructura científico-tecnológica avanzada, y el desarrollo de políticas públicas progresivas que incentivan la innovación en minería sostenible. Esta concentración geográfica de la actividad investigativa no representa necesariamente una limitación para la transferibilidad de hallazgos, sino que establece centros de excelencia regional que pueden servir como plataformas para la difusión de conocimientos y tecnologías hacia otros contextos nacionales latinoamericanos.

El análisis comparativo entre las diferentes vías tecnológicas identificadas revela una distinción fundamental entre estrategias de alto volumen y baja complejidad técnica, ejemplificadas por las aplicaciones en materiales de construcción, versus aproximaciones de bajo volumen y alta complejidad tecnológica representadas por la recuperación de metales críticos y tierras raras. Las tecnologías de valorización para materiales constructivos, documentadas exhaustivamente por Enríquez et al. (2022) en Ecuador y Valdez et al. (2020) en Perú, demuestran un nivel de madurez tecnológica que permite implementación relativamente inmediata con modelos de negocio directos y mercados locales bien establecidos. Estos casos exitosos evidencian que el cumplimiento de normativas técnicas internacionales es alcanzable mediante optimización de procesos y control de calidad apropiado, mientras que los riesgos de lixiviación de contaminantes pueden ser efectivamente mitigados mediante diseño adecuado de matrices cementicias.

En contraste marcado, los desarrollos en recuperación de tierras raras representados por Echeverry et al. (2023) en Colombia constituyen una frontera tecnológica emergente con potencial de generación de valor económico exponencialmente superior, pero que requiere inversiones sustanciales en infraestructura especializada y desarrollo de capacidades técnicas avanzadas. La eficiencia de recuperación superior al 93% reportada para cerio, lantano y neodimio establece un precedente técnico excepcional, pero la traducción hacia implementaciones comerciales requiere marcos de evaluación económica sofisticados como los propuestos por Araya et al. (2021). El análisis de opciones reales bajo incertidumbre desarrollado por estos investigadores chilenos proporciona metodologías defensivas para la gestión de riesgos en proyectos de alta intensidad tecnológica, considerando la volatilidad inherente de mercados de metales críticos y las incertidumbres asociadas a escalamiento industrial.

La recuperación de agua emerge consistentemente a través de múltiples estudios como un factor crítico habilitante para la viabilidad integral de modelos de economía circular en el contexto andino, donde la escasez hídrica constituye una restricción operacional fundamental. Los hallazgos de Adewuyi et al. (2024) y Hamraoui et al. (2024) convergen en demostrar que las eficiencias de recuperación superiores al 90% son técnicamente alcanzables mediante tecnologías de filtración y espesado avanzado, generando beneficios económicos directos a través de reducción de costos de adquisición de agua fresca y beneficios ambientales indirectos mediante reducción de presión sobre recursos hídricos locales. Cacciuttolo y Marinovic (2022) y Cacciuttolo y Pérez (2022) complementan esta perspectiva mediante análisis específicos de implementaciones en Chile y Perú, demostrando que la integración de tecnologías de recuperación de agua no solamente mejora la sostenibilidad ambiental sino que también reduce significativamente los riesgos geotécnicos asociados a fallas por licuefacción sísmica en depósitos de relaves.

Las implicaciones específicas para el contexto de Pasco emergen claramente a partir de la síntesis de experiencias documentadas en contextos andinos similares, sugiriendo un enfoque estratégico por fases que maximiza las probabilidades de implementación exitosa mientras minimice los riesgos tecnológicos y económicos. La primera fase debería focalizarse en la valorización de grandes volúmenes de relaves para aplicaciones en materiales de construcción, aprovechando las tecnologías demostradas por Valdez et al. (2020) en Perú y Enríquez et al. (2022) en Ecuador. Esta aproximación inicial permitiría generar flujos de ingresos inmediatos, desarrollar capacidades técnicas locales, y establecer cadenas de suministro regionales para productos de construcción derivados de relaves, contribuyendo simultáneamente al desarrollo económico local y la reducción de volúmenes de pasivos ambientales acumulados.



La segunda fase estratégica debería incorporar estudios detallados de caracterización mineralógica y geoquímica de los relaves específicos de Pasco, seguidos por evaluaciones de viabilidad tecno-económica para recuperación selectiva de metales de valor utilizando los marcos metodológicos validados por los estudios chilenos de Araya et al. (2020, 2021). Esta caracterización permitiría identificar oportunidades específicas para recuperación de elementos críticos considerando las particularidades composicionales de los relaves locales, mientras que los modelos económicos avanzados facilitarían la evaluación defensiva de riesgos de inversión bajo diferentes escenarios de precios de productos básicos y costos operacionales.

La tercera fase debería integrar obligatoriamente tecnologías avanzadas de recuperación de agua como componente no negociable del modelo de negocio integral, dada la importancia estratégica de los recursos hídricos en la región de Pasco y las restricciones crecientes sobre disponibilidad de agua fresca para operaciones mineras. La evidencia de Hamraoui et al. (2024) sugiere que esta integración no solamente contribuye a la sostenibilidad ambiental sino que genera beneficios económicos tangibles mediante reducción de costos operacionales y mejoramiento de la estabilidad de depósitos de relaves.

Las implicaciones para políticas públicas derivadas de esta síntesis de evidencia apuntan hacia la necesidad crítica de desarrollar marcos regulatorios específicos que incentiven activamente la transición hacia modelos de minería circular en Perú. Kinnunen et al. (2022) establecen que la viabilidad de modelos de negocio circulares depende fundamentalmente de la integración efectiva de cadenas de valor y del desarrollo de incentivos económicos apropiados, aspectos que requieren intervención coordinada de políticas públicas. Las experiencias internacionales sugieren que instrumentos como incentivos fiscales para inversiones en tecnologías de valorización, marcos regulatorios simplificados para aprobación de productos derivados de relaves, y programas de financiamiento público-privado para investigación y desarrollo pueden acelerar significativamente la adopción de modelos circulares.

Las direcciones futuras de investigación identificadas a través de esta revisión incluyen prioridades específicas que emergen de las limitaciones reconocidas en la base de evidencia actual. Primero, se requiere investigación sistemática sobre aceptación social y percepción pública de productos derivados de relaves mineros, considerando que la licencia social constituye un factor determinante para la viabilidad comercial de estos productos en mercados de construcción locales. Segundo, se necesitan análisis comprehensivos de ciclo de vida específicamente adaptados al contexto latinoamericano que cuantifiquen integralmente los beneficios ambientales de modelos circulares

versus aproximaciones convencionales de disposición de relaves, proporcionando argumentos cuantitativos para formuladores de políticas ambientales.

Tercero, el desarrollo de modelos de negocio que integren simultáneamente múltiples vías de valorización representa una oportunidad de investigación crítica que podría maximizar la captura de valor económico mientras optimiza la eficiencia de procesamiento de materiales. Los estudios existentes se han enfocado predominantemente en vías tecnológicas individuales, mientras que la realidad operacional sugiere que implementaciones exitosas requerirán integración sinérgica de múltiples aproximaciones de valorización. Cuarto, la investigación sobre marcos de financiamiento y estructuras de riesgo para proyectos de economía circular en minería representa una brecha significativa que limita la traducción de desarrollos técnicos hacia implementaciones comerciales viables.

Las limitaciones reconocidas de esta revisión sistemática incluyen aspectos inherentes al diseño metodológico y características de la base de evidencia disponible. La restricción a publicaciones en español, inglés y portugués podría haber excluido desarrollos relevantes publicados en otros idiomas, aunque la cobertura de los tres idiomas principales de la región minimiza probablemente este sesgo. La posible existencia de sesgo de publicación hacia resultados positivos constituye una limitación más sustancial, considerando que estudios con resultados negativos o implementaciones fallidas tienen menor probabilidad de publicación, lo que podría resultar en sobreestimación de la viabilidad de modelos circulares.

La heterogeneidad significativa en métricas económicas reportadas a través de los estudios incluidos limitó las posibilidades de comparación cuantitativa directa entre diferentes aproximaciones tecnológicas y contextos geográficos. Esta variabilidad refleja tanto diferencias en marcos metodológicos de evaluación económica como particularidades de contextos locales en términos de costos de insumos, precios de productos, y estructuras regulatorias. Adicionalmente, la concentración de estudios a escala de laboratorio y proyectos piloto, con representación limitada de implementaciones a escala industrial completa, genera incertidumbres sobre la escalabilidad y replicabilidad de resultados reportados.

Finalmente, la concentración geográfica de la actividad investigativa en pocos países de la región, particularmente Chile y Brasil, limita la representatividad de hallazgos para contextos nacionales con diferentes niveles de desarrollo institucional, disponibilidad de infraestructura tecnológica, y marcos regulatorios. No obstante estas limitaciones reconocidas, la convergencia de hallazgos a través de múltiples estudios independientes y la consistencia de patrones identificados proporcionan confianza razonable en la



robustez de las conclusiones principales derivadas de esta síntesis sistemática.

CONCLUSIÓN

Esta revisión sistemática consolida evidencia robusta que confirma la factibilidad técnica y viabilidad económica de modelos de economía circular aplicados al reprocesamiento de relaves mineros en América Latina. Los 23 estudios analizados documentan consistentemente tres vías principales de valorización: materiales de construcción mediante geopolimerización y sustitución de agregados, recuperación selectiva de metales críticos y tierras raras, y tecnologías avanzadas de recuperación de agua. Los resultados técnicos reportados, incluyendo eficiencias de recuperación de cobre superiores al 60%, recuperación de tierras raras del 93%, y recuperación de agua del 90%, establecen precedentes sólidos para implementaciones comerciales.

Para el contexto específico de Pasco, la evidencia sugiere una estrategia de implementación por fases que inicie con valorización en materiales de construcción aprovechando mercados locales establecidos, progrese hacia caracterización detallada y evaluación tecno-económica para recuperación de metales de valor, e integre obligatoriamente tecnologías de recuperación de agua como componente estratégico del modelo de negocio. Esta aproximación secuencial maximiza las probabilidades de éxito mientras desarrolla progresivamente capacidades técnicas y cadenas de valor regionales.

Las implicaciones para políticas públicas apuntan hacia la necesidad de marcos regulatorios habilitantes que incluyan incentivos fiscales, procedimientos simplificados de aprobación para productos derivados de relaves, y programas de financiamiento para investigación y desarrollo. La experiencia regional demuestra que el éxito de modelos circulares depende críticamente de la integración efectiva de cadenas de valor y del desarrollo de mercados para productos secundarios.

El desafío principal identificado trasciende aspectos puramente técnicos para focalizarse en implementación, escalamiento y desarrollo de marcos institucionales adaptados a contextos locales específicos. Esta revisión proporciona una hoja de ruta basada en evidencia que puede orientar decisiones de inversión, formulación de políticas públicas, y direcciones de investigación futura para acelerar la transición hacia modelos de minería circular en América Latina, contribuyendo simultáneamente a la sostenibilidad ambiental y el desarrollo económico regional.

REFERENCIAS

- Abbadi, A., & Mucsi, G. (2024). A review on complex utilization of mine tailings: Recovery of rare earth elements and residue valorization. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(3), 113118. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221334372401248X>
- Adewuyi, S., Anani, A., & Luxbacher, K. (2024). Advancing sustainable and circular mining through solid-liquid recovery of mine tailings. *Process Safety and Environmental Protection*, 189, 31-46. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582024007717>
- Akeed, M. (2022). *Mine tailings-based geopolymers: Physical and mechanical properties* [Preprint]. SciELO Preprints. <https://preprints.scielo.org/index.php/scielo/preprint/view/4509>
- Araujo, F., Taborda, I., Nunes, E., & Santos, R. (2022). Recycling and reuse of mine tailings: A review of advancements and their implications. *Geosciences*, 12(9), 319. <https://www.mdpi.com/2076-3263/12/9/319>
- Araya, N., Kraslawski, A., & Cisternas, L. (2020). Towards mine tailings valorization: Recovery of critical materials from Chilean mine tailings. *Journal of Cleaner Production*, 263, 121555. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620316024>
- Araya, N., Ramírez, Y., Kraslawski, A., & Cisternas, L. (2021). Feasibility of re-processing mine tailings to obtain critical raw materials using real options analysis. *Journal of Environmental Management*, 284, 112060. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479721001225>
- Cacciuttolo, C., & Cano, D. (2022). Environmental impact assessment of mine tailings spill considering metallurgical processes of gold and copper mining: Case studies in the Andean countries of Chile and Peru. *Water*, 14(19), 3057. <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/19/3057>
- Cacciuttolo, C., & Marinovic, A. (2022). Sustainable management of thickened tailings in Chile and Peru: A review of practical experience and socio-environmental acceptance. *Sustainability*, 14(17), 10901. <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/17/10901>



- Cacciuttolo, C., & Pérez, G. (2022). Practical experience of filtered tailings technology in Chile and Peru: An environmentally friendly solution. *Minerals*, 12(7), 889. <https://www.mdpi.com/2075-163X/12/7/889>
- Cacciuttolo, C., Cano, D., & Custodio, M. (2023). Socio-environmental risks linked with mine tailings chemical composition: Promoting responsible and safe mine tailings management considering copper and gold mining experiences from Chile and Peru. *Toxics*, 11(5), 462. <https://www.mdpi.com/2305-6304/11/5/462>
- Echeverry, L., Rojas, N., & Ocampo, L. (2023). Recovery of light rare earth elements, cerium, lanthanum, and neodymium from alluvial gold mining waste from the Bagre-Nechí mining district in Colombia using acid leaching, oxalate precipitation and calcination. *Hydrometallurgy*, 216, 106009. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304386X22001943>
- Enríquez, A., Collahuazo, L., Hermosa, P., Acosta, M., Feijoo, C., Quezada, M., & Ibarra, D. (2022). Estudio de caso para el aprovechamiento de relaves mineros procedentes de la concesión Campanillas, Zamora Chinchipe-Ecuador, como agregado para la elaboración de adoquines. *Revista Científica GeoLatitud*, 5(1), 34-43. <http://geolatitud.geoenergia.gob.ec/ojs/ojs/index.php/GeoLatitud/article/view/114>
- Hamraoui, L., Bergani, A., Ettoumi, M., Aboulaich, A., Taha, Y., Khalil, A., & Benzaazoua, M. (2024). Towards a circular economy in the mining industry: Possible solutions for water recovery through advanced mineral tailings dewatering. *Minerals*, 14(3), 319. <https://www.mdpi.com/2075-163X/14/3/319>
- Kinnunen, P., Karhu, M., Yli-Rantala, E., Kivikytö, P., & Mäkinen, J. (2022). A review of circular economy strategies for mine tailings. *Cleaner Engineering and Technology*, 8, 100499. <https://researchportal.tuni.fi/en/publications/a-review-of-circular-economy-strategies-for-mine-tailings>
- Lam, E., Montofré, I., Álvarez, F., Gaete, N., Poblete, D., & Rojas, R. (2020). Methodology to prioritize Chilean tailings selection, according to their potential risks. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(11), 3948. <https://www.mdpi.com/1660-4601/17/11/3948>
- Martins, N., Srivastava, S., Simão, F., Niu, H., Perumal, P., Snellings, R., & Habert, G. (2021). Exploring the potential for utilization of medium and highly

- sulfidic mine tailings in construction materials: A review. *Sustainability*, 13(21), 12150. <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/21/12150>
- Mokhtari, P., Lin, J., Numkiatsakul, P., Koohestani, B., & Kriven, W. (2025). Valorization of mine tailings for sustainable geopolymer production. *International Journal of Ceramic Engineering & Science*, 7(4), e70014. <https://ceramics.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ces2.70014>
- Qaidi, S., Tayeh, B., Zeyad, A., de Azevedo, A., Ahmed, H., & Emad, W. (2022). Recycling of mine tailings for the geopolymers production: A systematic review. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00933. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509522000651>
- Ruiz, Á., & Juárez, J. (2022). Obtención de cobre metálico a partir de la lixiviación de jales mineros originarios del Estado de Zacatecas. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 10, 1-9. <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/article/view/9826>
- Santibáñez, L., Guzmán, A., & Morel, M. (2022). Extraction of iron and other metals from copper tailings through leaching. *Metals*, 12(11), 1924. <https://www.mdpi.com/2075-4701/12/11/1924>
- Sarker, S., Haque, N., Bhuiyan, M., Bruckard, W., & Pramanik, B. (2022). Recovery of strategically important critical minerals from mine tailings. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 107622. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221334372200495X>
- Suntasig, E., Carrera, K., & Manobanda, P. (2024). Impacto de especies forestales en la restauración de suelos de minería: Revisión sistemática. *Agroecología Global. Revista Electrónica de Ciencias del Agro y Mar*, 6(11), 21-34. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2665-02902024000200021
- Valdez, J., Aguilar, J., Sánchez, L., Alatrística, G., & Figueroa, A. (2020). Diseño e implementación de un proceso alternativo para la fabricación de ladrillos a partir de relaves mineros de Oro. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 28(2), 268-276. https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-33052020000200268&script=sci_arttext



Vilaça, A., Simão, L., Montedo, O., De Oliveira, A., & Raupp, F. (2022). Waste valorization of iron ore tailings in Brazil: Assessment metrics from a circular economy perspective. *Resources Policy*, 75, 102477. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301420721004852>