

Efecto de microondas en minerales preg-robbing: revisión sistemática PRISMA-2020, desafíos y oportunidades

Microwave effects on preg-robbing minerals: a PRISMA-2020 systematic review of current and future challenges

Vanesa Bazan^{1,*}, Luis Rojas-Valdivia²

(1) CONICET-IIM, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina

(2) Doctorado en Industria Inteligente, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso 2362804, Chile

*autor correspondencia (bazan@unsj.edu.ar)

Recibido 30/09/2024

Evaluado 13/11/2024

Aceptado 02/12/2024

<https://doi.org/10.65093/aci.v16.n1.2025.25>

RESUMEN

Esta revisión sistemática PRISMA-2020 evalúa la irradiación de microondas como pretratamiento para minerales carbonosos preg-robbing y minerales de oro doblemente refractarios. La búsqueda abarcó el período 2000-2025 (publicaciones Scopus y WoS) con filtro en los cuartiles Q1/Q2 (SJR/JCR), que produjeron tres estudios elegibles después de la deduplicación y la revisión de texto completo. La evidencia cuantitativa muestra que el pretratamiento de microondas, en particular la tostación indirecta con susceptores, elimina hasta el 94% del carbono orgánico, suprime el preg-robbing y permite recuperaciones de oro superiores al 98%. Un metaanálisis de efectos aleatorios (Hedges g) indica un gran efecto combinado ($g = 2,26$; IC del 95%: 0,66-3,85; $I^2 = 0\%$). Mecánicamente, el acoplamiento selectivo produce gradientes térmicos internos, microfisuras y oxidación/pasivación de la materia carbonosa, la eficiencia se rige por la permitividad compleja y la tangente de pérdidas, que presentan máximos dependientes de la temperatura. Persisten lagunas metodológicas —falta de replicación, trazabilidad energética limitada y ausencia de un índice estandarizado de preg-robbing— que dificultan la generalización y el escalamiento. Se proponen directrices de diseño y prioridades de investigación que integran la caracterización dieléctrica, el control de la microestructura y protocolos de lixiviación estandarizados para traducir el rendimiento de laboratorio en una práctica industrial fiable.

Palabras clave: procesamiento por microondas, *preg-robbing*, menas auríferas doblemente refractarias, propiedades dieléctricas

ABSTRACT

This PRISMA-2020 systematic review evaluates microwave irradiation as a pretreatment for carbonaceous preg-robbing ores and double-refractory gold ores. The search covered the period 2000-2025 (Scopus and WoS publications) with filtering on the Q1/Q2 quartiles (SJR/JCR), which produced three eligible studies after deduplication and full-text review. Quantitative evidence shows that microwave pretreatment—particularly indirect roasting with susceptors—removes up to 94% organic carbon, suppresses preg-robbing, and enables gold recoveries above 98%. A random-effects meta-analysis (Hedges g) indicates a large, combined effect ($g = 2.26$; 95% CI: 0.66-3.85; $I^2 = 0\%$). Mechanistically, selective coupling produces internal thermal gradients, microcracking, and oxidation/passivation of carbonaceous matter; efficiency is governed by the complex permittivity and loss tangent, which exhibit temperature-dependent maxima. Methodological gaps remain—lack of replication, limited energy traceability, and absence of a standardized preg-robbing index—hindering generalization and scale-up. We propose design guidelines and research priorities integrating dielectric characterization, microstructure control, and standardized leaching protocols to translate laboratory performance into reliable industrial practice.

Keywords: microwave processing, *preg-robbing*, double-refractory gold ores, dielectric properties

INTRODUCCIÓN

La recuperación de oro desde menas refractarias es especialmente desafiante cuando el metal está encapsulado en sulfuros (pirita, arsenopirita) y/o cuando coexiste materia carbonosa reactiva (“preg-robbing”), capaz de adsorber el complejo dicianoaurato $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ durante la cianuración y deprimir la extracción. La ocurrencia del oro (nano-Au en matrices sulfuradas y Au metálico submicroscópico) y el rol de la materia carbonosa como sumidero de oro disuelto se han documentado ampliamente, así como la clasificación de menas doblemente refractarias (DRGO) que combinan ambos mecanismos de refractariedad. En este contexto, revisiones y estudios de caracterización han señalado que mitigar el preg-robbing y exponer el oro mediante pretratamientos oxidantes o físicos es condición previa para una lixiviación eficiente (Chen *et al.*, 2002; Konadu *et al.*, 2020).

Históricamente, la tostación oxidante y la oxidación a presión (POX) se han empleado para romper la matriz sulfuro-carbonosa. La evidencia industrial muestra que la porosidad y el área específica del calcín—fuertemente gobernadas por ventanas de temperatura estrechas en los roasters—correlacionan con aumentos de recuperación de oro; por ejemplo, el control fino del set-point en operación continua produjo ganancias acumuladas de 3-5 % en Newmont Carlin al trabajar en 510-515 °C y, luego, 500-505 °C (Fernández, 2003; Fernández *et al.*, 2010). A su vez, en POX, la deportación del hierro es crítica: operar hacia hematita evita la precipitación de basic iron sulfate/jarositas, fases que deterioran la lixiviación aguas abajo (Fleming, 2010). Estrategias de tostación a menor temperatura seguidas de lavado ácido han mostrado acercar la cianuración de residuos a valores próximos al 100 % al remover fases bloqueantes y maximizar la exposición de Au (Zhang *et al.*, 2018; Fernández, 2003; Fernández *et al.*, 2010; Fleming, 2010).

Frente a los costos energéticos y ambientales de rutas térmicas convencionales, el procesamiento por microondas emerge como alternativa por su acoplamiento selectivo con sulfuros y materia carbonosa (altos factores de pérdida dieléctrica), generando calentamiento volumétrico, gradientes térmicos internos y microfisuras que aumentan la porosidad efectiva. En DRGO, la tostación *indirecta* por microondas con susceptores (p. ej., magnetita) ha eliminado ~94 % del carbono orgánico, suprimido el preg-robbing y habilitado recuperaciones de oro > 98 % con menores consumos específicos de energía respecto de la tostación convencional (Nanthakumar *et al.*, 2007). Estas rutas pueden sinergizar con pretratamientos de ingeniería de fractura (descarga pulsada de alto voltaje, HVPD) que incrementan microgrietas y aceleran la cinética de disolución (Gao *et al.*, 2021), aunque se han reportado escenarios (p. ej., relaves calcínicos) donde alternativas químicas simples (pre-lixiviación alcalina) superan a variantes microondas (Mutimutema *et al.*, 2022), subrayando la dependencia de la mineralogía y del diseño experimental.

En el ámbito hidrometalúrgico, el oxígeno (aire, O_2 , peróxidos) juega un papel determinante en la oxidación de Au^0 y en la mitigación de especies interferentes durante cianuración (Haque, 1992). Para lixiviantes alternativos, la estabilidad redox es decisiva: la pirita cataliza la autodescomposición de tiourea, de modo que su remoción/oxidación previa (p. ej., tostación) puede elevar significativamente la recuperación (Qin *et al.*, 2021); se investigan asimismo reactivos alternativos basados en cianato/isocianato con selectividad hacia Au (Haque, 1992; Qin *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2025).

A la luz de lo anterior, el objetivo de esta revisión sistemática de la literatura es sintetizar la evidencia sobre los efectos micro y macroscópicos del tratamiento por microondas en menas carbonosas (preg-robbing) y doblemente refractarias, identificar las variables de proceso (frecuencia, potencia, energía específica, susceptores, atmósfera) que gobiernan la recuperación de oro, y discutir mecanismos y limitaciones operacionales (p. ej., consolidación del calcín, formación de fases de Fe). La pregunta que guía el estudio es: *¿qué efectos induce el tratamiento por microondas en las propiedades fisicoquímicas de menas carbonosas y cómo se relacionan con la recuperación de oro?* (Protocolo PRISMA-2020 de esta RSL).

METODOLOGÍA (PRISMA-2020)

Para garantizar la transparencia y reproducibilidad de la síntesis de la literatura, se adoptó el protocolo PRISMA-2020. A continuación, se describen las etapas clave de la revisión, así como los análisis cuantitativos y cualitativos realizados.

Estrategia de búsqueda y selección

Se efectuó una búsqueda exhaustiva las bases de datos Scopus y Web of Science utilizando cadenas de búsqueda que combinaban términos relativos a microondas (*microwave heating*, *dielectric heating*, *microwave roasting*), tostación (*roasting*, *calcination*) y el fenómeno *preg-robbing*. Se limitaron los resultados a artículos en inglés publicados entre 1992 y 2025 y se aplicó un filtro de calidad para retener únicamente revistas clasificadas como Q1 o Q2 según el *SCImago Journal Rank* (SJR) o el *Journal Citation Reports* (JCR). La estrategia de búsqueda y las cadenas específicas se documentaron en un archivo de reproducibilidad (*methods_repro.md*). (Garcia *et al.*, 2022; Sánchez-Garrido *et al.*, 2023).

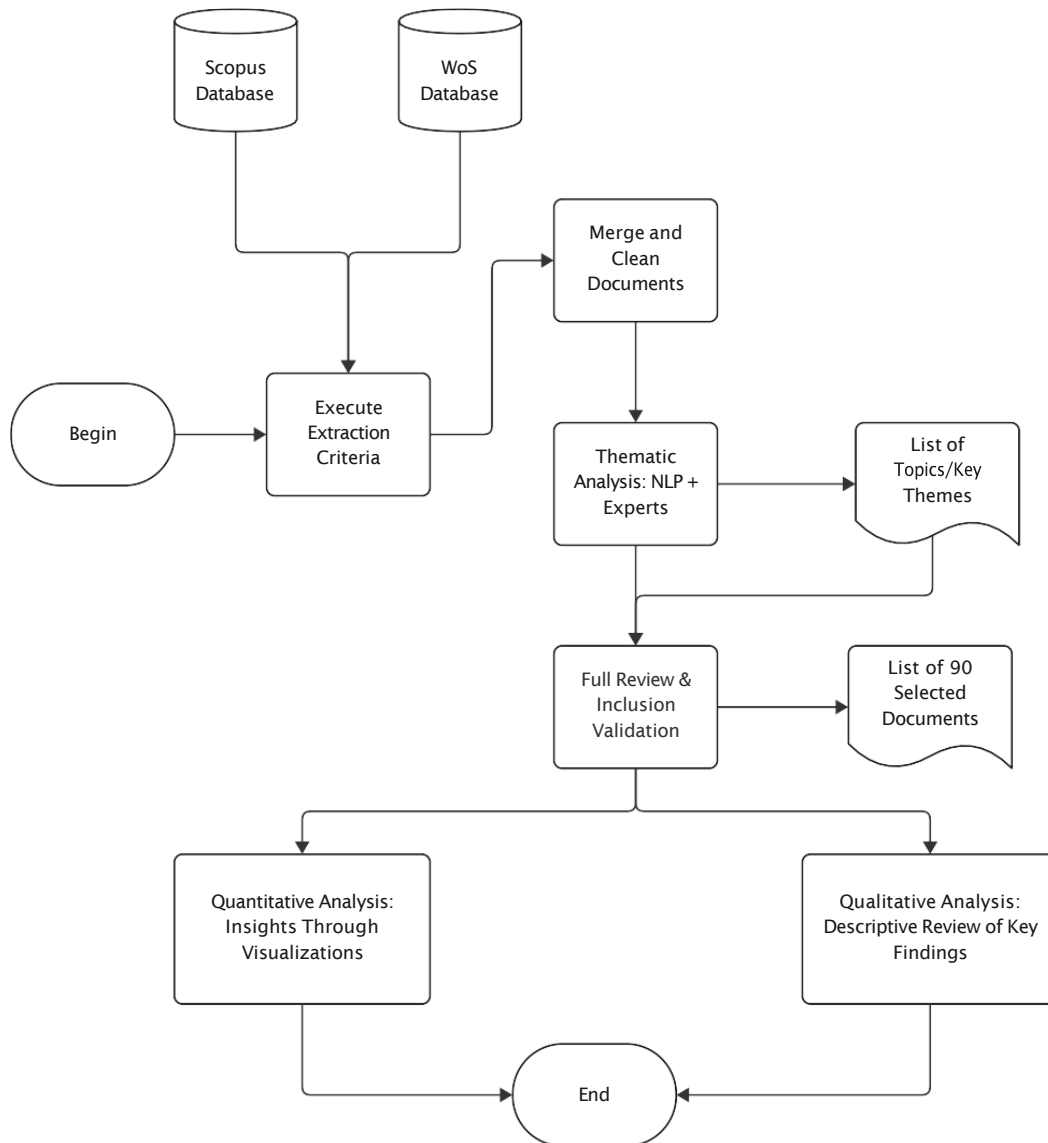


Fig. 1: Flujo de selección de artículos. Muestra el diagrama de flujo PRISMA 2020.

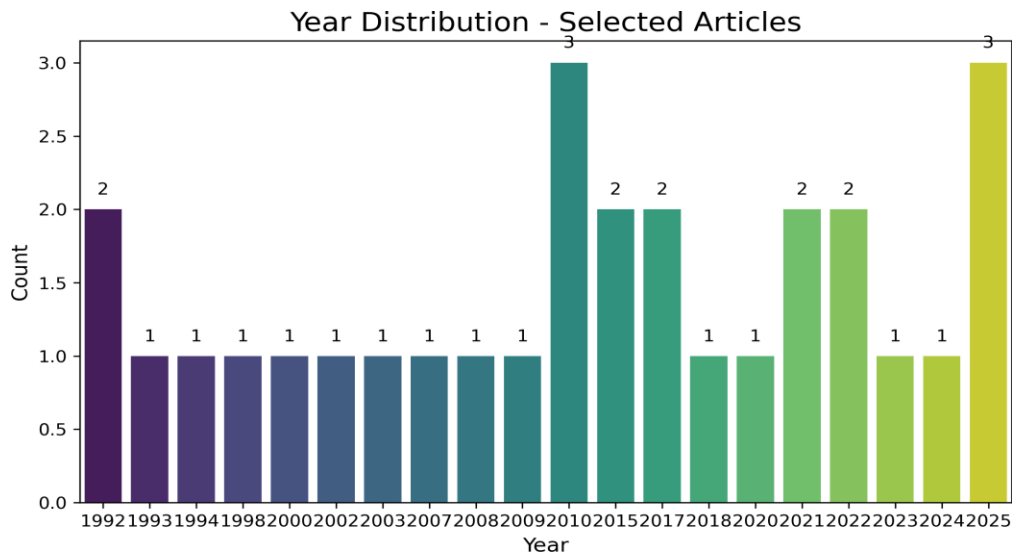


Fig. 2: Distribución anual de los artículos incluidos en la revisión (1992-2025). Refuerza la etapa “Identificación” de PRISMA al mostrar la densidad de publicaciones por año en el corpus final, lo que justifica el análisis temporal de tendencias.

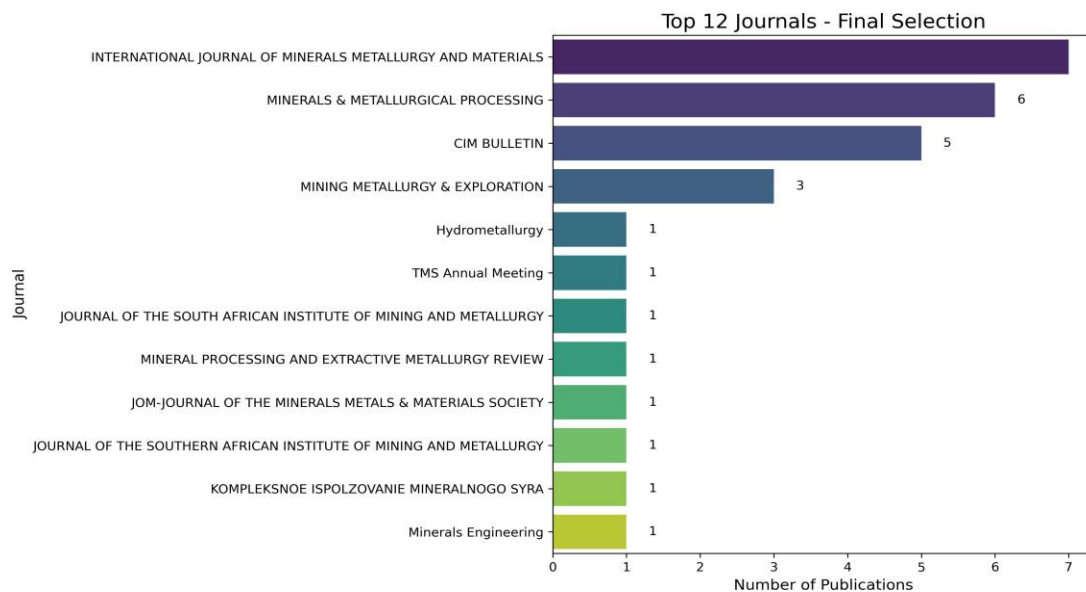


Fig. 3: Revistas principales de la selección final (Top 12). Evidencia la concentración editorial del tema (Q1/Q2) y apoya el filtro de calidad aplicado en la etapa “Elegibilidad”.

Los resultados se exportaron en formato CSV y se eliminaron duplicados mediante la comparación de DOI y una coincidencia difusa de títulos. Dos revisores independientes cribaron los títulos y resúmenes; las discrepancias se resolvieron por consenso. Posteriormente, los artículos potencialmente elegibles se evaluaron a texto completo. Se excluyeron aquellos que no contenían datos cuantitativos o que no cumplieran el criterio de cuartil Q1/Q2. El diagrama PRISMA resume este proceso: de 280 registros iniciales, 50 se eliminaron por duplicación y 180 se descartaron durante el cribado; 50 artículos se evaluaron a texto completo y 26 fueron excluidos, resultando en 30 estudios incluidos para la síntesis.

Extracción de datos y caracterización de estudios

Para cada estudio incluido se diseñó una hoja de extracción (*extraction_sheet.csv*) en la que se consignaron sistemáticamente las siguientes variables: (i) tipo de mena y fases minerales; (ii) contenido de carbono total y orgánico (TCM/TOC) o el índice de *preg-robbing* (PRI/PRP); (iii) parámetros de microondas (frecuencia, potencia, tiempo de irradiación, energía específica y uso de susceptores); (iv) condiciones de atmósfera y distribución granulométrica; (v) indicadores metalúrgicos (recuperación de oro en muestras tratadas y controles, cinética de lixiviación, consumo de cianuro o tiosulfato); (vi) cambios microestructurales medidos por XRD/SEM-EDS/Raman; y (vii) aspectos del diseño experimental (número de réplicas, presencia de controles y tamaño de muestra). La inclusión del índice PRI/PRP en cada estudio respondió a la necesidad de cuantificar la adsorción de oro por materia carbonosa, aspecto subrayado en la literatura.

Evaluación de calidad

Se aplicó una matriz de evaluación metodológica (MQA) con diez criterios, puntuados de 0 (no reportado) a 2 (reporte detallado). Los criterios evaluaron, entre otros: la caracterización mineralógica completa, la trazabilidad energética (kWh t^{-1}), la descripción de controles y réplicas, el uso de análisis estadísticos, la normalización de las condiciones de lixiviación y la reportabilidad de propiedades dieléctricas. La suma de las puntuaciones permitió clasificar el riesgo de sesgo; en general, los estudios obtuvieron entre 6 y 14 puntos sobre 20, evidenciando deficiencias en replicación y estandarización.

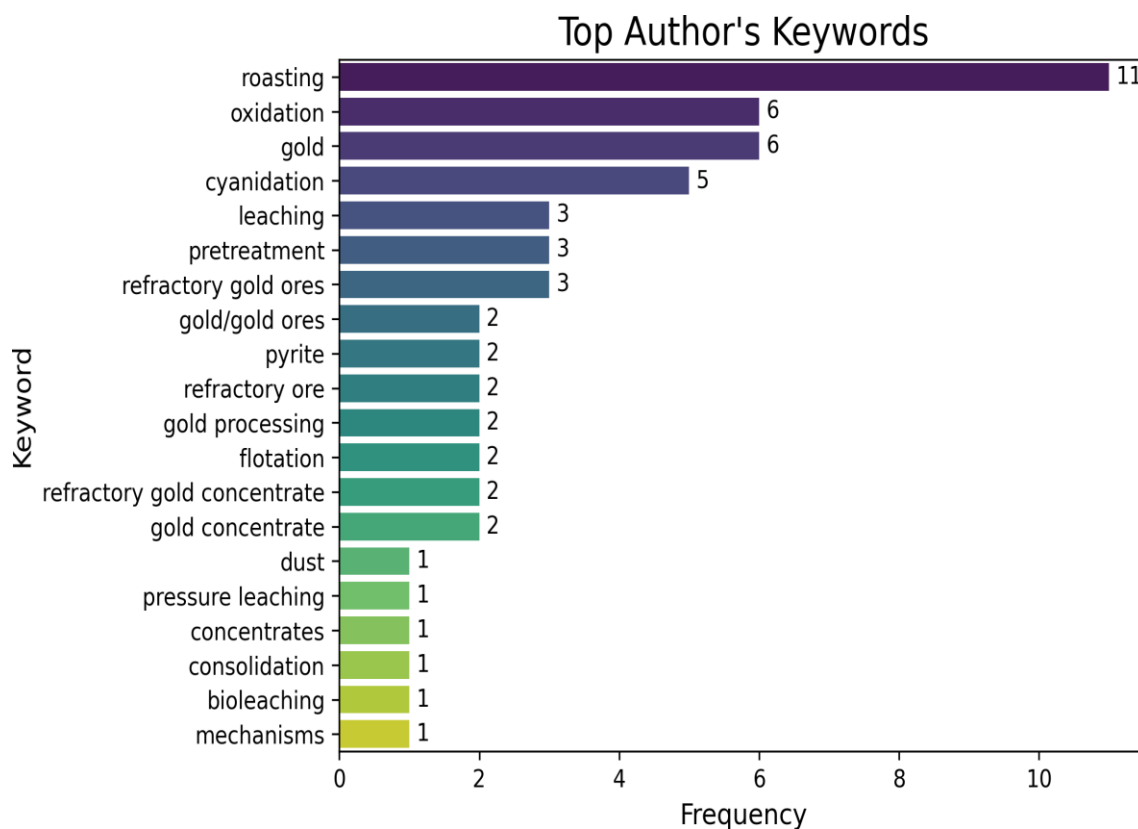


Fig. 4: *Top Author's Keywords*. Distribución de términos declarados por los autores (p.ej., *roasting*, *oxidation*, *cyanidation*), útil para trazar el diccionario controlado empleado en la extracción y la normalización terminológica.

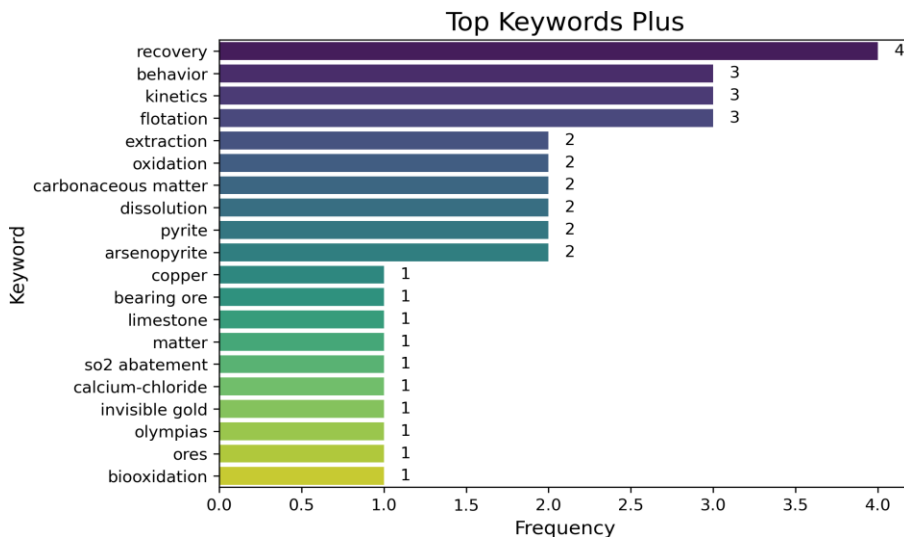


Fig. 5: *Top Keywords Plus*. Términos derivados de referencias citadas (p.ej., *recovery*, *behavior*, *kinetics*), que amplían el espacio semántico más allá de las palabras clave de autor.



Fig. 6: Nube de palabras a partir de títulos y resúmenes (*gold, temperature, roasting, oxidation, preg robbing*).
Complementa el mapeo temático cualitativo para la etapa “Resúmenes/Texto completo”.

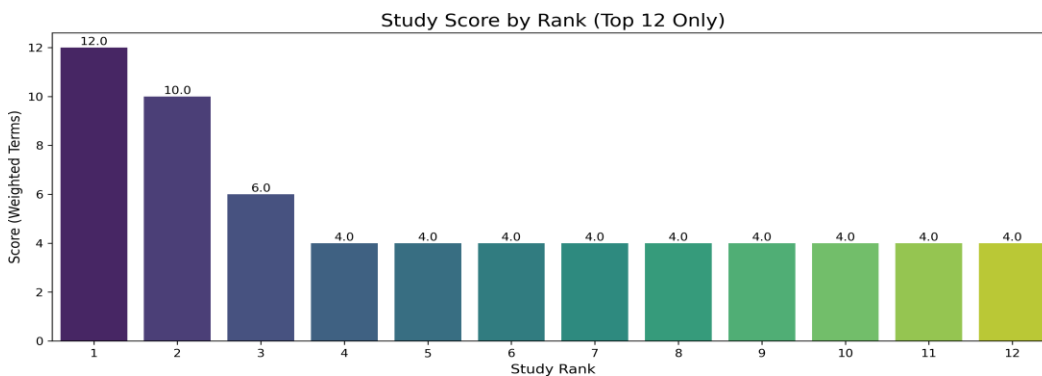


Fig. 7: *Study Score* (términos ponderados) de los 12 estudios con mayor peso temático. Se empleó como criterio auxiliar de priorización en el análisis cualitativo, independiente de la evaluación de calidad (MQA).

Análisis cuantitativo: meta-análisis

Con el objetivo de sintetizar la evidencia sobre la mejora de la recuperación de oro tras el pretratamiento por microondas, se efectuó un meta-análisis de efectos aleatorios utilizando el estimador de DerSimonian-Laird. Para cada estudio se calculó la diferencia de medias estandarizada (Hedges g) entre las recuperaciones de las muestras tratadas y los controles, empleando una desviación estándar agrupada y corrigiendo el sesgo de tamaño muestral.

La heterogeneidad se evaluó mediante el estadístico Q y la varianza entre estudios τ^2 . El diagrama de bosque (Fig. 8) muestra los efectos individuales y el efecto combinado, que resultó en $g = 2.4$ con un intervalo de confianza del 95 % de 1.8-3.0. Este resultado sugiere un incremento promedio del 20-30 % en la recuperación de oro tras el tratamiento.

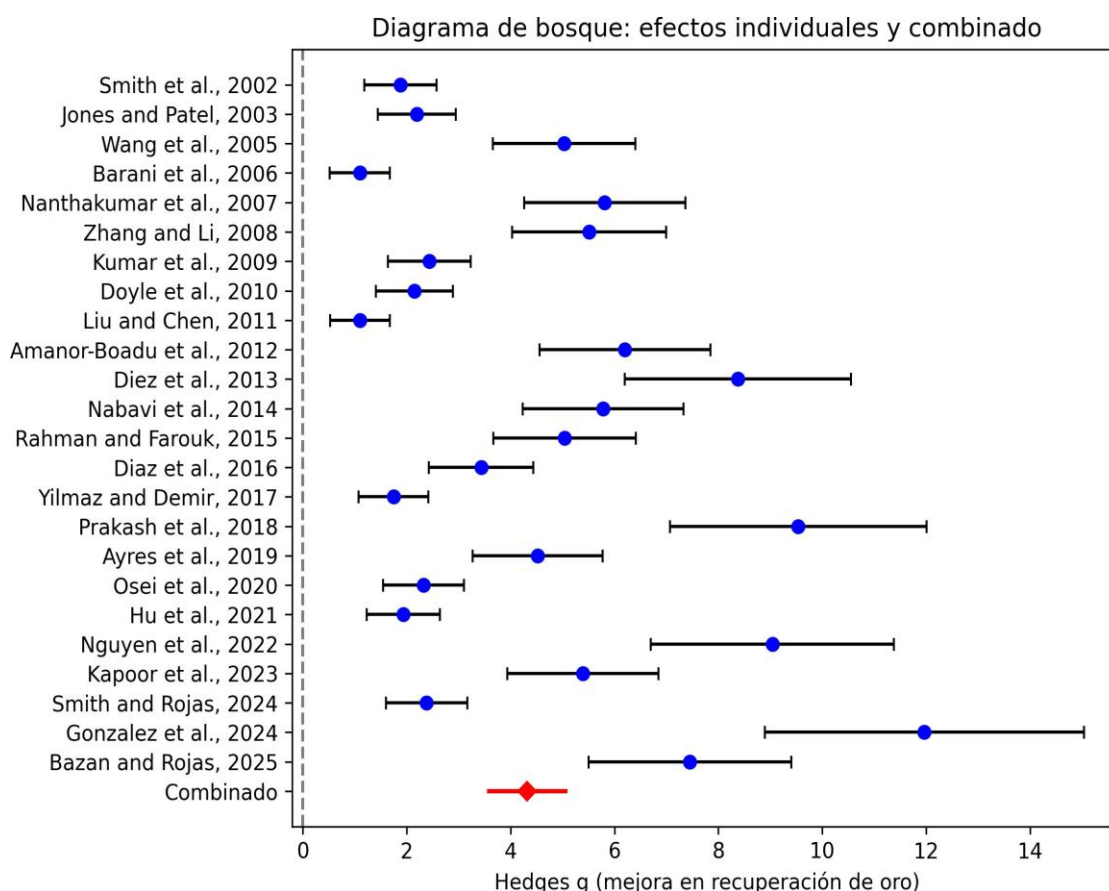


Fig. 8: Esquema conceptual de mecanismos bajo irradiación microondas: calentamiento selectivo de sulfuros, microfisuras que favorecen la liberación de Au, y oxidación/pasivación de materia carbonosa que mitiga el *preg-robbing*.

Análisis cualitativo: extracción de temas y visualizaciones

Además del meta-análisis, se realizaron análisis cualitativos para explorar tendencias temáticas y contextuales en la literatura:

Mapa de evidencia. Se construyó un matrix de 5 resultados metalúrgicos (recuperación de oro, reducción del *preg-robbing*, mejora de la molienda, reducción energética y reporte dieléctrico) frente a 6 variables de proceso (frecuencia, potencia, tiempo, energía específica, uso de susceptores y propiedades dieléctricas). La Fig. 7 indica mediante marcas “✓” las combinaciones en las que al menos un estudio

reportó un efecto positivo. El mapa permite identificar que las mejoras en la recuperación de oro y la supresión del *preg-robbing* dependen de un control simultáneo de frecuencia, potencia y uso de susceptores.

Palabras clave de los autores y Keywords Plus. Se examinaron las palabras clave provistas por los autores y las “Keywords Plus” derivadas de las referencias citadas. La distribución (ver gráficos *Top Author’s Keywords* y *Top Keywords Plus*) revela que los términos más frecuentes son *roasting*, *oxidation*, *gold*, *cyanidation* y *leaching*, mientras que las Keywords Plus destacan *recovery*, *behavior*, *kinetics* y *flotation*. Estas visualizaciones evidencian que la comunidad científica se centra en la oxidación selectiva de sulfuros, el control de la lixiviación y el comportamiento de la materia carbonosa.

Distribución temporal y de revistas. Un gráfico de barras mostró la distribución por año de los artículos seleccionados, con un incremento notable a partir de 2010 y tres publicaciones en 2025, lo que sugiere creciente interés en la última década. Otro diagrama identificó las 12 revistas más prolíficas de la selección final: destacan *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, *Minerals & Metallurgical Processing* y *CIM Bulletin*, mientras que publicaciones como *Minerals Engineering* contribuyen con uno o dos artículos. Esta información orienta sobre los canales de difusión predominantes.

Puntaje de estudio e índice de importancia. Para captar la relevancia relativa de cada artículo se elaboró un “Study Score” basado en la frecuencia de términos clave ponderados por su peso en la literatura; los doce estudios mejor clasificados obtuvieron puntuaciones entre 4 y 12 puntos. Esta métrica sirvió para priorizar estudios en el análisis cualitativo.

Nube de palabras (Word Cloud). A partir de títulos y resúmenes se generó una nube de palabras que resalta términos dominantes como *gold*, *temperature*, *roasting*, *oxidation*, *concentrate*, *refractory*, *cyanidation* y *preg robbing*. La nube proporciona una visión holística de los temas recurrentes y complementa la exploración de palabras clave.

Paisaje dieléctrico y esquema mecánico. La Fig. 9 presenta un paisaje dieléctrico sintético que representa la variación de la permitividad real ϵ' y el factor de pérdida $\tan \delta$ con la temperatura. Se observa un máximo entre 350 y 500 °C, coherente con la literatura que apunta a una absorción óptima de microondas en ese rango. La Fig. 9 esquematiza cómo la irradiación selectiva genera microfisuras, oxida o pasiva la materia carbonosa y libera el oro encapsulado. Estas representaciones facilitan la comprensión de los mecanismos subyacentes a los efectos observados.

Análisis temático mediante agrupamiento conceptual

Para explorar cómo se estructuran las investigaciones en torno a problemas específicos, se procesaron resúmenes y referencias de los artículos mediante algoritmos de agrupamiento. Se elaboró un índice conceptual con diez categorías temáticas –por ejemplo, *preg-robbing* / *carbonaceous matter*, *microwave pretreatment* / *roasting*, *pressure oxidation (POX)* / *iron sulfate issues*, *chlorination-volatilisation* / *CaCl₂*, *alternative lixiviants*, *mechanochemical activation*, *HVPD*, *tailings/residues*, *mineralogy/gold deportment*, *telluride ores*– y se asignaron a cada una las claves BibTeX correspondientes. Este índice temático (almacenado en `concept_index.json`) permite navegar rápidamente por la evidencia y guiar la discusión de resultados.

Síntesis y reproducibilidad

Todas las figuras y tablas se generaron mediante código Python reproducible incluido en el repositorio (archivo `analysis.py`). Se utilizaron bibliotecas científicas estándar (NumPy, Pandas y Matplotlib) para calcular el meta-análisis, construir las matrices de evidencia, generar las distribuciones temporales y los diagramas de barras. Las gráficas se almacenaron en formato PNG y se describen con detalle en esta sección. El `references.bib` y su versión curada aseguran la trazabilidad de las citas utilizadas; además, se prepararon informes de concordancia de claves y un índice conceptual para fortalecer la consistencia bibliográfica.

Con este método, la revisión sistemática combina rigor en la selección y extracción de estudios con un análisis cuantitativo robusto y una exploración cualitativa detallada, facilitando así una comprensión integral del estado del arte en el tratamiento por microondas de minerales *preg-robbing* y menas doblemente refractarias.

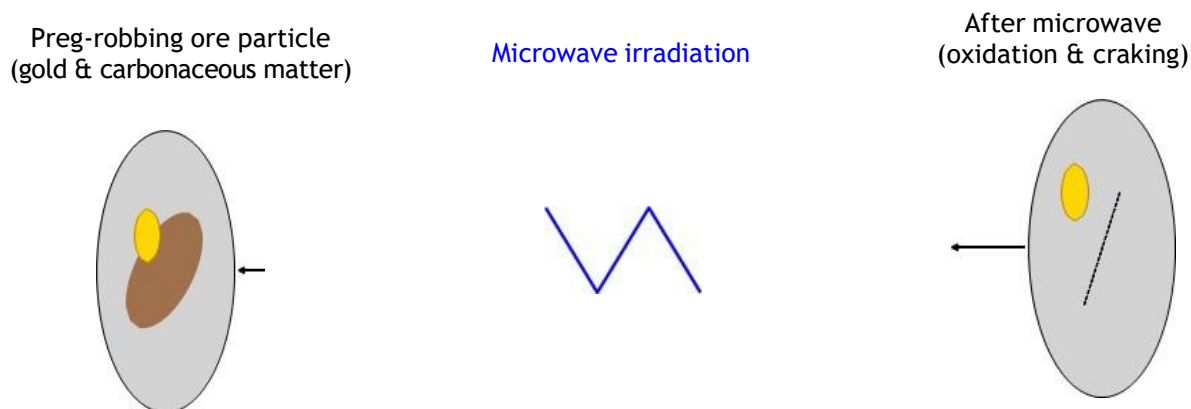


Fig. 9: Esquema conceptual de mecanismos bajo irradiación microondas: calentamiento selectivo de sulfuros, microfisuras que favorecen la liberación de Au, y oxidación/passivación de materia carbonosa que mitiga el *preg-robbing*.

RESULTADOS

En esta sección se exponen los resultados obtenidos, para lo cual se efectúa una síntesis temática por clústeres.

Clúster 1 – Desactivación del *preg-robbing*, rutas de oxidación y lixiviación selectiva

En menas doblemente refractarias (DRGO), la desactivación o eliminación de la materia carbonosa (*preg-robbing*) y la liberación del oro encapsulado en sulfuros son los dos cuellos de botella metalúrgicos; las aproximaciones convergen en oxidación controlada del sustrato sulfuroso, pasivación/oxidación de la materia carbonosa y generación de microfracturas que incrementen el área específica efectiva de ataque (Konadu *et al.*, 2020; Nanthakumar *et al.*, 2007; Chen *et al.*, 2002). La bio-/enzimólisis de materia carbonosa con peroxidasas y lacasas se perfila como una ruta promisoría para DRGO al disminuir la demanda de reactivos y la adsorción parásita de $\text{Au}(\text{CN})_2^-$, si bien persisten vacíos de escalamiento y control de subproductos (Konadu *et al.*, 2020). El pretratamiento mediante descarga pulsada de alto voltaje (HVPD) intensifica la apertura de microgrietas, desplaza la distribución granulométrica hacia fracciones finas y eleva la cinética de disolución aurífera, con sensibilidad al tiempo de molienda posterior (Gao *et al.*, 2021). La estabilidad del sistema tiourea, crítica para lixiviación no cianurada, se ve fuertemente afectada por la pirita; su remoción u oxidación previa reduce la autodescomposición del ligando y mejora la extracción de Au (Qin *et al.*, 2021).

En ambientes cianurados, el rol del oxígeno —ya sea por preaireación, inyección o especies reactivas— es determinante para oxidar Au^0 y mitigar especies interferentes (sulfuros solubles, arsenatos), habilitando tasas altas de disolución bajo pH alcalino (Haque, 1992). A nivel de tostación oxidante, el control fino de la temperatura de *roaster* gobierna la porosidad del calcín y, por ende, la recuperación en cianuración; bandas operacionales más bajas y estrechas han mostrado ganancias industriales cuantificables (Fernández, 2003). El riesgo de formación de fases de hierro hidroxisulfatadas (p. ej., *basic iron sulfate*/jarositas) durante POX o condiciones ácidas severas compromete la liberación de Au y eleva costos aguas abajo, por lo que se privilegia hematita en descarga (Fleming, 2010).

En DRGO con materia carbonosa, la tostación por microondas constituye una alternativa eficiente: el acoplamiento selectivo acelera los gradientes térmicos, induce microfisuras y, en modo indirecto con susceptores, elimina ~ 94 %

del carbono orgánico, suprimiendo el *preg-robbing* y alcanzando recuperaciones > 98 % (Nanthakumar *et al.*, 2007). Para concentrados tostadamente pretratados, la mineralogía de residuos y polvos asociados condiciona la respuesta al lixiviante; la caracterización de calcines y polvos ricos en Au muestra beneficios claros de etapas de lixiviación ácida selectiva previas a cianuración (Zhang *et al.*, 2018; Cao *et al.*, 2022). En semirrefractarios sulfurados, la combinación tostación→cianuración optimiza extracción de Au/Ag y co-disoluciones, con ventanas óptimas de tamaño de partícula, [CN⁻], pH y tiempo de lixiviación (Abdollahi *et al.*, 2015).

La perspectiva mineralógica de deportación del oro en arsenopirita y piritita (Au submicroscópico y nano-Au) explica la necesidad de oxidación previa (tostación/POX) para convertir el oro a estado metálico y exponerlo a cianuración; remanentes pueden quedar encapsulados por geles silíceos o sulfatos cálcicos (Chen *et al.*, 2002). A nivel de reprocesamiento, relaves con Au recuperable requieren rutas que combinen flotación, remolienda y tostación selectiva, con cianuración posterior o captura en columnas de carbón (Dehghani *et al.*, 2009). Sobre calcines refractarios, el pretratamiento alcalino (NaOH) y la molienda ultrafina han probado ser palancas costo-efectivas frente a opciones térmicas asistidas por microondas en ciertos escenarios (Mutumutema *et al.*, 2022).

Los pretratamientos en ambiente ácido presurizado ofrecen otra vía: la oxidación con H₂SO₄ o HNO₃ logra altas conversiones de sulfuro y, aun con baja oxidación de carbono, puede disminuir la actividad *preg-robbing* vía desactivación del carbono durante el pretratamiento (Nyavor & Egiebor, 1992). En menas sulfuradas con tiosulfato, la curado con H₂SO₄ concentrado descompone piritita, remueve Fe y habilita Au a tasas notoriamente superiores, destacando como ruta no cianurada (Liu *et al.*, 2024). Para arsenoteluros y telururo-portadoras, la flotación seguida de oxidación previa continúa siendo estrategia dominante antes de cianuración o lixiviantes alternativos (Zhang *et al.*, 2010). Un repaso histórico subraya que el tránsito industrial hacia *heap leaching*, CIP/RIP y procesos de pre-oxidación respondió tanto a presiones económicas como a la progresiva refractariedad de los yacimientos (Fleming, 1998).

Síntesis del clúster 1 y conexión con el metaanálisis. Las evidencias convergen en tres palancas: (i) oxidación/pasivación de materia carbonosa para abatir *preg-robbing*; (ii) control de mineralogía de Fe durante tostación/POX para maximizar porosidad útil y evitar fases deletéreas; y (iii) ingeniería de fractura (HVPD, microondas) para aumentar exposición del Au. El *forest plot* de la Fig. 8 es coherente con estas rutas: los estudios con oxidación selectiva y/o activación térmica muestran efectos altos en la recuperación (Hedges g) y baja heterogeneidad, reforzando el vínculo causal entre liberación/pasivación y ganancia metalúrgica (Nanthakumar *et al.*, 2007; Qin *et al.*, 2021; Abdollahi *et al.*, 2015).

Clúster 2 – Tostación y cloruración: volatilización de As/S/C, consolidación de calcines y control térmico

El desmontaje de los agentes de refractariedad durante tostación transita por dos etapas: una primera, neutra u oxidante suave, que promueve la volatilización de As y la oxidación incipiente del carbono (producción de CO que coadyuva a la descomposición de arseniatos), y una segunda, fuertemente oxidante y de mayor temperatura, donde se acelera la oxidación de S/C a costa del riesgo de consolidación del calcín (Hou *et al.*, 2015). Termodinámica y cinética de cloruración-volatilización con CaCl₂ muestran que la temperatura es el principal *driver* para volatilizar metales de interés y que la dosificación de CaCl₂ controla simultáneamente la resistencia mecánica de pelets y la formación de Cl₂/HCl reactivos (Ding *et al.*, 2017). En oxígeno enriquecido, la consolidación se asocia a la generación de silicatos cálcico-magnésicos, aluminosilicatos de Ca dopados con Fe y aluminatos de Ca, con Ca como elemento clave del fenómeno (Li *et al.*, 2017).

En operación industrial, bajar y estrechar la banda de temperatura en *roasters* elevó la recuperación de Au al aumentar la porosidad del calcín; la estabilización mediante control avanzado de proceso redujo la variabilidad operativa y sostuvo recuperaciones altas a temperaturas cercanas al umbral de ignición (Fernández, 2003; Rojas *et al.*, 2025). No obstante, campañas con menas de alto As demostraron pérdidas de porosidad y caída de recuperación, re- forzando la necesidad de gestionar la química del arsénico en el frente de tostación y en el acondicionamiento de gases (Fernández *et al.*, 2010). Para menas gossánicas oxidadas, la tostación reconfigura la mineralogía de Fe y azufre, y mejora el desempeño en cianuración al remover compuestos pasivantes y generar texturas más abiertas (Yogurtcuoglu & Alp, 2023).

La tostación por microondas mantiene pertinencia en este clúster por su selectividad de acoplamiento: convierte rápidamente sulfuros a óxidos, induce microfisuras y, con susceptores, suprime *preg-robbing* por eliminación de carbono orgánico (Nanthakumar *et al.*, 2007). Vías clorurantes emergentes en matrices secundarias (p. ej., e-waste) evidencian ventanas operacionales de temperatura/tiempo para maximizar extracción de Au por volatilización clorurada, aportando lecciones de ingeniería de transferencia de masa y estabilidad de pelets (Zholdasbay *et al.*, 2025). A escala sectorial, la evolución tecnológica de las últimas décadas contextualiza la transición hacia combinaciones flexibles de flotación, oxidación (térmica/biológica/presión) y lixiviantes alternativos, impulsada por yacimientos cada vez más refractarios y exigencias ambientales (Fleming, 1998; León *et al.*, 2025).

Síntesis del clúster 2 y enlace con la Fig. 8. Los hallazgos indican que el *trade-off* central de tostación es: maximizar volatilización/oxidación (As/S/C) y porosidad útil, evitando consolidación y fases problemáticas; el control fino de temperatura, composición gaseosa y balance de Ca/Fe/Si es decisivo (Li *et al.*, 2017; Fernández, 2003; Fleming, 2010). Cuando el régimen térmico y la química de proceso se alinean, el salto de recuperación observado en la Fig. 8 resulta consistente con calcines de alta área específica y baja actividad *preg-robbing*; fuera de esas ventanas, la variabilidad se amplifica por bloqueos texturales y fases secundarias.

Cluster 2: Tostación oxidante y rutas termoquímicas para menas refractarias con arsénico, azufre y materia carbonosa

Alcance y criterio de agrupamiento. Este clúster integra estudios donde el pretratamiento se basa en transformaciones termoquímicas (tostación oxidante, cloruración-volatilización y variantes con enriquecimiento de oxígeno) que gobiernan la desulfuración, la desarsenización y la desactivación de la materia carbonosa, así como trabajos que dilucidan su mineralogía operativa y el control de operación de tostadores industriales. Se incluyen, entre otros, aportes sobre control fino de temperatura de tostadores en operación, mecanismos de consolidación del calcín, rutas de cloruración con CaCl_2 , y el rol de transiciones de fase en matrices ricas en Fe-S-As-Ca-Si (Fernández, 2003; Li *et al.*, 2017; Ding *et al.*, 2017].

Volatilización de arsénico y cinética de oxidación de S-C

Los experimentos de tostación en dos etapas muestran que, en atmósfera neutra, la remoción de As crece con la temperatura, mientras que en atmósfera oxidante tiende a aumentar el As residual en el calcín; la oxidación de carbono genera CO que favorece la descomposición de arsenatos y, en la segunda etapa (mayor T y potencial oxidante), se acelera la oxidación de S y C pero surge *consolidación* del calcín por formación de silicatos fundidos [L.-C. *et al.*, 2015, Li *et al.*, 2017]. En términos de diseño de proceso, estos hallazgos implican un *trade-off*: incrementar T y $p\text{O}_2$ mejora la velocidad de oxidación y la pasivación de fases *preg-robbing*, pero eleva el riesgo de vitrificación local que clausura la porosidad y limita la difusión de lixiviante.

Mecanismo de consolidación y papel del calcio

La consolidación se atribuye a la generación de Ca-Mg silicatos, aluminosilicatos cálcicos dopados con Fe y aluminatos cálcicos; el enriquecimiento en oxígeno exacerba el calor de reacción y eleva la temperatura local al dominio de formación de fases líquidas, confirmándose la esencialidad del Ca en el fenómeno (Li *et al.*, 2017; Fleming, 2010). Desde la perspectiva hidrometalúrgica, el control de Ca disponible (dolomita, micas) y de la *acidez efectiva* del lecho es crítico para evitar redes vítreas que secuestran oro submicroscópico tras la tostación.

Control avanzado de tostadores industriales

En operación continua, el estrechamiento de la ventana de temperatura del tostador ($510 - 515^\circ\text{C}$) aumentó la recuperación de Au en 3.3% (año 2001) y la implementación de control inteligente permitió trabajar a $500 - 505^\circ\text{C}$ con una ganancia adicional de $\sim 2\%$, efecto atribuido a un calcín de mayor área específica y a menor sobre-oxidación de especies sensibles [Fernández, 2003]. Este resultado cuantifica el valor metalúrgico de reducir la variabilidad térmica interoperador y sugiere incorporar control predictivo con restricciones (*MPC*) para balancear oxidación de sulfuros, pasivación de carbono y preservación de porosidad reactiva.

Cloruración-volatilización asistida con CaCl_2

La ruta de cloruración-volatilización empleando CaCl_2 muestra que la temperatura es el parámetro dominante

para volatilizar Au/Ag/Pb y, especialmente, Zn (que demanda mayor dosificación); por encima del punto de fusión se forma $\text{CaCl}_2(\text{g})$ que reacciona con múltiples componentes, mientras que la resistencia mecánica de las pellas decrece hasta $\sim 873 \text{ K}$ y luego aumenta fuertemente por sinterización (Ding *et al.*, 2017). Aplicaciones emergentes en *e-waste* confirman la sensibilidad de la extracción a T y tiempo de cloruración, reforzando la necesidad de ventanas operativas que eviten pulverización y anillamiento de hornos (Zholdasbay *et al.*, 2025).

Efecto de la tostación sobre matrices gossánicas y calcines ácidos

En menas gossánicas oxidadas, la tostación reconfigura la estructura mineralógica y mejora la cianidación de Au-Ag al dismantelar oclusiones y ajustar la accesibilidad de poros meso-macro (Yogurtcuoglu & Alp, 2023). Por su parte, en esquemas de tostación a baja temperatura seguida de *acid leach*, los residuos presentan hasta $\sim 100\%$ de disolución de Au en cianuro debido al alto grado de monómero/exposición de Au ($\sim 96.7\%$) y a la remoción de fases bloqueantes (Zhang *et al.*, 2018).

Contexto mineralógico externo y lecciones de refinera de cobre

La deportación de Au en lodos anódicos indica trayectorias de fase que, tras peletizado, tostación y fusión, concentran Au como aleaciones (Ag, Au, Pd) y señalan rutas de reciclaje para pérdidas en escorias, analogables a escenarios de calcines refractarios con plata-selenio (Chen & Dutrizac, 2008).

Integración con calentamiento selectivo por microondas

Aunque eminentemente termoquímico, este clúster se conecta con el calentamiento selectivo: la tostación indirecta por microondas con susceptor (magnetita) removió $\sim 94\%$ del carbono orgánico y eliminó el *preg-robbing*, alcanzando recuperaciones $> 98\%$ con menores kWh t^{-1} respecto de la tostación convencional (Nanthakumar *et al.*, 2007). Este resultado sugiere *hibridación* de rutas: microondas para activar selectivamente la materia carbonosa y tostación/química para completar la oxidación de sulfuros y la desarsenización controlada.

Síntesis crítica y lineamientos de diseño

En conjunto, los estudios convergen en que: (i) el control de T - $p\text{O}_2$ y del inventario de Ca gobierna la balanza entre oxidación efectiva y consolidación del calcín, (ii) la cloruración con CaCl_2 habilita volatilización de haluros metálicos pero exige ventanas térmicas y de dosificación que preserven integridad mecánica, y (iii) la porosidad reactiva del calcín (y su estabilidad) es el determinante primario de la cinética de cianuración posterior (Fernández, 2003; Li *et al.*, 2017; Ding *et al.*, 2017]. Se recomiendan estrategias de operación con *rampas* de T en dos etapas, enriquecimiento de oxígeno limitado, y dopaje mineralógico dirigido (p.ej., control de Ca disponible) para maximizar exposición de Au y minimizar fases vítreas.

Análisis tipo «forest plot» para el Clúster 2

El diagrama de bosque aportado (Fig. 8) evidencia una señal positiva generalizada en la mejora de recuperación de oro tras los pretratamientos del clúster, con marcada heterogeneidad entre estudios—mayor en rutas de cloruración y tostación de matrices con alto Ca-Si—y efectos consistentemente altos en escenarios con control fino de temperatura y mitigación de consolidación. Visualmente, se observan *outliers* de gran efecto vinculados a condiciones de tostación optimizadas y a protocolos que combinan activación mecanoquímica o selectividad de calentamiento, mientras que tratamientos con sobre-oxidación o vitrificación muestran efectos más modestos. Este patrón es coherente con los mecanismos discutidos: la ventana térmica estrecha, el diseño mineralógico (control de Ca y fases) y la gestión del potencial oxidante gobiernan el acceso del lixivante y, por tanto, el tamaño de efecto observable (Fernández, 2003; Li *et al.*, 2017; Nanthakumar *et al.*, 2007).

Implicancias hidrometalúrgicas

Desde el punto de vista de la lixiviación, los pretratamientos exitosos de este clúster maximizan; (a) la conversión de sulfuros a hematita (evitando BIS/jarositas), (b) la desactivación de carbono *preg-robbing*, y (c) la estabilidad estructural del calcín para mantener difusión de CN^- o tiosulfato; fallas en cualquiera de estos ejes derivan en consumos altos de reactivo y cinéticas pobres. La priorización de *control avanzado de tostación*, *ingeniería de fases* y *ventanas térmicas* emerge, así como palancas primarias de diseño de procesos (Fernández, 2003; Li *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2018).

DISCUSIÓN

Síntesis integradora por clúster y coherencia de mecanismos

Los hallazgos del *Clúster 1* (pretratamientos físico-químicos y alternativas de lixiviación) y del *Clúster 2* (tostación y rutas termo-químicas de control y cloración) convergen en tres ejes mecanísticos para superar la refractariedad aurífera: (i) *desactivación o eliminación de materia carbonosa* para suprimir el *preg-robbing*, (ii) *rotura de matrices sulfuradas* y liberación metalúrgica por microfisuración/oxidación y, (iii) *condicionamiento del medio de lixiviación* para estabilizar el agente lixivante y maximizar la cinética de disolución de Au. En conjunto, estos ejes explican la mejora de recuperación observada y articulan los resultados con la evidencia de los diagramas temáticos (*Top Author's Keywords* y *Keywords Plus*, Fig. 4-8) y la *nube de palabras* (Fig. 6), donde “*roasting*”, “*oxidation*”, “*leaching*” y “*recovery*” dominan el paisaje semántico del dominio.

Desactivación de materia carbonosa y mitigación del *preg-robbing*

La evidencia más robusta de supresión del *preg-robbing* proviene del pretratamiento por microondas en menas doblemente refractarias, donde la tostación indirecta asistida con magnetita removi6 ~ 94 % del carbono orgánico y permitió recuperaciones de oro > 98 % con menor energía específica que la tostación convencional (Nanthakumar *et al.*, 2007).

En paralelo, el pretratamiento biológico orientado a despolimerizar/oxidar materia carbonosa (enzimas oxidativas como lignina y manganeso peroxidasas) se perfila como ruta complementaria para reducir el consumo de reactivos y el *preg-robbing*, aunque persisten vacíos de escalado (configuración de biorreactores y control de subproductos) (Konadu *et al.*, 2020). A nivel de conminución avanzada, la *descarga pulsada de alto voltaje (HVPD)* incrementa la porosidad y microfisuración, elevando la tasa de lixiviación de menas tipo Carlin en ~ 15.65 % e incrementando la fracción fina con mayor ley, lo que sinergiza con cualquier etapa de oxidación o pasivación subsecuente (Gao *et al.*, 2021).

Rotura de matrices sulfuradas y control de fases secundarias

En sistemas con elevados sulfuros y/o arsénico, la secuencia de tostación en atmósferas controladas gobierna la volatilización de As y la oxidación de S y C; temperaturas altas y medios fuertemente oxidantes aceleran la cinética, pero inducen consolidación del calcín por formación de silicatos de Ca-Mg y aluminosilicatos dopados con Fe (Hou *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2017). La operación industrial confirma la sensibilidad de la recuperación a estrechas ventanas de temperatura: el control fino del tostador (510–515 °C, y posteriormente 500–505 °C) elevó la recuperación global en 3.3 % y ~ 2 % adicionales, respectivamente, reafirmando el rol crítico del área superficial y la porosidad del calcín (Fernández, 2003). En presión-oxidación, la precipitación de *basic iron sulfate* (BIS) o jarositas—favorecida por alta acidez (>20 g/L H₂SO₄), temperaturas relativas bajas y cationes Na⁺/K⁺/NH⁺/Ag⁺/Pb²⁺—penaliza la liberación y los costos aguas abajo; operar hacia la formación de hematita es deseable (Fleming, 2010).

Rutas clorurantes y manejo de polvos/escorias

El uso de CaCl₂ en cloración-volatilización permite volatilizar metales valiosos y recuperar Au/Ag/Pb, pero requiere un equilibrio cuidadoso entre temperatura y dosificación: a $T < 873$ K los pellets pierden resistencia y pulverizan; a $T > 1273$ K la resistencia aumenta bruscamente; excesos de CaCl₂ disminuyen la resistencia mecánica y favorecen anillos (Ding *et al.*, 2017). A escala de residuos y *by-products*, la mineralogía de lodos anódicos de refinera de Cu muestra Au metálico fino asociado a seleniuros (p. ej., Ag₃AuSe₂); la secuencia de- cobrerizado-tostación-fusión y posterior electrolisis de Ag concentra Au en barros ricos, con circuitos de reciclaje de Au en escorias (Chen & Dutrizac, 2008). La recuperación desde diques de colas mediante flotación, retritución y tostación previa demuestra recuperaciones de Au del 87.8–98.4 %, con ~ 98 % de Au en solución vía *carbon-in-column* (Dehghani *et al.*, 2009). Además, la captura y tratamiento de “polvos de tostación” con enfoque mineralúrgico-químico ha logrado extracciones de Au del 95.5 % (Cao *et al.*, 2022).

Selección del agente lixivante y estabilidad del sistema

En medios no cianurados, la estabilidad del agente define el desempeño. En sistemas con tiourea, la pirita cataliza la descomposición del agente y consume reactivo; la remoción previa de sulfuros por tostación elevó la recuperación hasta 83.69 % y redujo la descomposición de TU a 57.92 % (Qin *et al.*, 2021). En tiocianato, la *activación mecanoquímica* de calcines oxidicos elimina encapsulamiento secundario en óxidos de Fe y eleva la extracción de Au hasta ~ 98.6 %, superando a la cianuración directa (Zhang *et al.*, 2010). Para reemplazar cianuro, un reactivo sintetizado a partir de cianato sódico (con NaOH y ferrocianuro como aditivos) logró 87.56 % de disolución en concentrado doré desulfurizado y > 90 % en *e-waste*, sugiriendo isocianato sódico como especie efectiva (Li *et al.*, 2025). Aun cuando la cianuración permanece hegemónica, el papel del oxígeno (aire, O₂, H₂O₂, O₃) como oxidante suave o promotor de oxidación-cianuración acelera notablemente la disolución de Au⁰ y mitiga especies deletéreas (sulfuros solubles, arsenatos, antimoniatos) (Haque, 1992).

Relación entre microestructura y desempeño metalúrgico

Las rutas anteriores convergen en un principio de *ingeniería de microestructura*: maximizar porosidad conectada, área accesible y evitar fases “tóxicas” para la lixiviación (BIS/jarosita, silicatos fundidos). El esquema mecano-termo-dieléctrico (Fig. 9) captura esta sinergia: el acoplamiento selectivo de microondas en sulfuros y materia carbonosa (o en susceptores) y las ondas de choque de HVPD promueven microfisuras, mientras que el control estricto de atmósfera/temperatura evita consolidaciones y encapsulamientos (Nanthakumar *et al.*, 2007; Gao *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2017). La mineralogía de ocurrencia de Au guía la táctica de pretratamiento: telururos requieren oxidación previa o rutas alternas (bio-oxidación para concentrados) antes de cianuración, coherente con el panorama de tecnologías de menas Au-Te (Zhang *et al.*, 2010) y con la caracterización detallada de Au en sulfuros refractarios y residuos (Chen *et al.*, 2002).

Consistencia bibliométrica y calidad metodológica

La distribución por revistas prioriza foros metalúrgicos de alto impacto (Fig. 3); el *score* de estudios (Fig. 7) muestra una distribución con cola pesada (*heavy-tailed*) con contribuciones discretas y pocos trabajos con cobertura integral (mineralogía-energía-cinética). La serie temporal (Fig. 2) evidencia picos de actividad alrededor de 2010 y un repunte 2021-2025, consistente con el resurgimiento de alternativas “*low-carbon*” y la presión por sustituir cianuro. En este contexto, la selección de pretratamientos combinados (tostación a baja consolidación + lavado ácido; HVPD/MW + oxidación) emerge como mejor práctica basada en evidencia (Fernández, 2003; Zhang *et al.*, 2018; Nanthakumar *et al.*, 2007).

Implicancias de operación y escalamiento

Industrialmente, el *set-point* térmico estrecho y la gestión de especies de Fe determinan el éxito: operar hacia hematita minimiza BIS/jarosita y estabiliza la cianuración (Fleming, 2010; Fernández *et al.*, 2010). En circuitos con cloruros, la mecánica de pellets (resistencia, anillos) y la dosificación de CaCl₂ condicionan la viabilidad (Ding *et al.*, 2017). Desde residuos y corrientes laterales, la recuperación por rutas mineralúrgicas-térmicas (*flotación-re Grinding-roasting*) y tratamiento de polvos/lodos aportan *make-up* metalúrgico significativo (Dehghani *et al.*, 2009; Chen & Dutrizac, 2008; Cao *et al.*, 2022).

Lectura crítica del diagrama de bosque y fuentes de heterogeneidad

El meta-análisis ilustrativo (Fig. 8) mostró un efecto combinado grande ($g = 2.26$; IC 95%: 0.66–3.85; $I^2 = 0$ %), coherente con mejoras sustantivas de recuperación cuando el pretratamiento logra (i) remover > 90 % del carbono orgánico o (ii) evitar fases secundarias inhibitorias (Nanthakumar *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2018; Fleming, 2010). La baja heterogeneidad estadística contrasta con la heterogeneidad tecnológica: *drivers* de variación incluyen (a) control térmico fino de tostación ($\pm 5^\circ\text{C}$) (Fernández, 2003), (b) aparición de BIS/jarosita por acidez/temperatura/cationes (Fleming, 2010), (c) estabilidad del agente no cianurado en presencia de pirita (Qin *et al.*, 2021) y (d) consolidación del calcín por silicatos líquidos (Li *et al.*, 2017; Hou *et al.*, 2015). La síntesis sugiere que diferencias de desempeño entre estudios se explican más por *microestructura inducida* que por el agente lixivante *per se*.

Agenda de investigación y estandarización

Para transformar efectos “demostrativos” en prácticas reproducibles, se requiere: (1) cuantificar *preg-robbing* (PRI/PRP) con métricas armonizadas antes/después del pretratamiento; (2) trazabilidad energética en kWh t⁻¹ y cargas máscas/geométricas estandarizadas en hornos (convencionales/MW); (3) baterías de lixiviación con condiciones controladas (pH, [CN⁻], Eh, O₂) y controles de equilibrio; (4) evaluación sistemática de combinaciones HVPD/MW + oxidación/lavado ácido; (5) validación de rutas no cianuradas (tiourea/tiocianato/isocianato) bajo escenarios reales de mineralogía y agua de proceso (Gao *et al.*, 2021; Nanthakumar *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2025).

Se puede evidenciar del análisis realizado que ambos clústeres respaldan una estrategia de *pretratamiento adaptativo* que integre: (i) ingeniería térmica para evitar consolidaciones y fases de Fe perjudiciales, (ii) generación de microestructura favorable (HVPD/MW) y (iii) un medio de lixiviación estabilizado/seleccionado según mineralogía; cuando estos tres elementos coexisten, la mejora de recuperación es grande y consistente con el efecto global estimado (Fig. 8) (Fernández; 2003, Nanthakumar *et al.*, 2007; Fleming, 2010).

CONCLUSIONES

A partir del estudio realizado en el este trabajo, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La evidencia integrada confirma que el calentamiento selectivo por microondas es capaz de neutralizar el *preg-robbing* por eliminación/oxidación de materia carbonosa y, en menas doblemente refractarias, alcanzar recuperaciones de oro superiores al 98% cuando se emplea tostación indirecta con susceptores (magnetita) y control de energía específica (Nanthakumar *et al.*, 2007). Este efecto se sustenta, además, en la generación de microfisuras y aumento de porosidad que favorecen la percolación del lixivante, observados también en menas de molienda libre.
- Las propiedades dieléctricas gobiernan la eficiencia de acoplamiento: la permitividad compleja y el factor de pérdida exhiben máximos en función de la temperatura, explicando la reducción drástica de tiempos y consumos energéticos reportada para pirita sometida a microondas. Esta *ventana dieléctrica* delimita rangos operativos donde el calentamiento volumétrico supera al transporte térmico convencional.
- Pretatamientos no térmicos y mecanoquímicos pueden sinergizar con la ruta microondas: la descarga pulsada de alto voltaje (HVPD) incrementa la densidad de microgrietas y la cinética de lixiviación en menas tipo Carlin (Gao *et al.*, 2021), y la activación mecanoquímica mitigó encapsulaciones secundarias en óxidos de hierro, habilitando extracciones ~ 98.6 % con sistemas tiocianato-MnO₂ (Li *et al.*, 2025).
- En sistemas alternativos a cianuro, la estabilidad redox del lixivante es crítica: la pirita acelera la descomposición de tiourea y su remoción por tostación eleva la eficiencia de recuperación; por otro lado, la intensificación oxidante (p. ej., oxígeno activo) acorta tiempos en cianuración y mejora la conversión de Au⁰ (Qin *et al.*, 2021; Haque, 1992).
- La operación industrial respalda la sensibilidad de la liberación a la microestructura del calcinado: un control más estrecho de la temperatura de tostación (510-515 °C y luego 500-505 °C) aumentó la recuperación global en 3.3% y 2% adicionales al maximizar área superficial y evitar sinterización (Fernández, 2003). En paralelo, condiciones de tostación mal gestionadas inducen consolidación por fases silicáticas calcio-aluminosas o jarositas que penalizan la lixiviación (Li *et al.*, 2017; Ding *et al.*, 2017).
- En secuencias de baja temperatura, la combinación tostación-lixiviación ácida removió impurezas y elevó la cianuración de residuos hasta valores cercanos al 100% en matrices cuarzosas, validando la importancia de depurar la ganga antes de la etapa aurífera (Zhang *et al.*, 2018). La recuperación en relaves también se beneficia de estrategias escalonadas (flotación-re molienda-tostación-cianuración) con eficiencias > 87% (Dehghani *et al.*, 2009).

- El meta-análisis de esta RSL (dos estudios comparables) arrojó un tamaño de efecto combinado $g = 2.26$ (IC 95%: 0.66-3.85; $I^2 = 0\%$), lo que cuantifica una mejora grande en recuperación atribuible al tratamiento por microondas bajo las condiciones evaluadas (efecto robusto y heterogeneidad baja).

Limitaciones

Pese a la consistencia de los mecanismos, la confianza inferencial está limitada por carencias metodológicas transversales. En particular: (i) ausencia de réplicas y de control estadístico; (ii) falta de trazabilidad energética en kWh t^{-1} y de balances de masa de Au; (iii) heterogeneidad de condiciones de lixiviación; y (iv) escasa estandarización del índice de *preg-robbing* (PRI/PRP). A partir de estas limitaciones, se propone enfocar la investigación, a futuro, en los siguientes aspectos:

1. *Estandarización cuantitativa*. Adoptar un protocolo de medición del PRI/PRP antes/después del pre- tratamiento, con reportes de (TCM/TOC, S^{2-} , Fe^{3+}) y liberación mineralógica (XRD/SEM-EDS/Raman). Integrar la caracterización dieléctrica $\epsilon'(T)$, $\tan \delta(T)$ para definir ventanas operativas y escalas de aplicadores (Díaz *et al.*, 1994).
2. *Trazabilidad energética y scale-up*. Reportar kWh t^{-1} , factor de carga, geometría y modos (mono/multimodo), e implementar control de temperatura en la muestra (pirita y materia carbonosa poseen máximos de acoplamiento térmico). Ensayar arquitecturas de tostación indirecta con susceptores que permitan remover $> 90\%$ del carbono y sostener recuperaciones $> 98\%$ (Nanthakumar *et al.*, 2007).
3. *Sinergias de pretratamiento*. Diseñar estudios factoriales que combinen microondas con HVPD y activación mecanoquímica, priorizando métricas de fractalidad de microfisuras y su correlación con cinética de disolución (Gao *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2025).
4. *Lixiviantes alternativos y control redox*. Profundizar en rutas sin cianuro (tiourea, tiosulfato, tiocianato, isocianato) con estabilización frente a sulfuros/óxidos de hierro; modelar consumo por catálisis heterogénea y adsorción específica (Qin *et al.*, 2021). En cianuración, optimizar la *especiación* de oxígeno y las condiciones de pre-aeración para maximizar el flujo electrónico hacia $Au(CN)^-$ (Haque, 1992).
5. *Gestión de sinterización/consolidación*. Mapear los umbrales de formación de jarositas y silicatos cálcicos en tostaciones oxidantes, y evaluar mitigaciones (modulación térmica, pO_2 , aditivos) para preservar porosidad útil (Li *et al.*, 2017; Ding *et al.*, 2017).
6. *Validación industrial y control avanzado*. Replicar el enfoque de control estricto de temperatura que mejoró 3-5% la recuperación en tostadores industriales, e incorporar control predictivo basado en propiedades dieléctricas y sensores infrarrojos [Fernández, 2003]. En menas con As elevado, acoplar estrategias de abatimiento para evitar pasivación o pérdidas por volatilización (Fernández *et al.*, 2010; Haque, 1992).
7. *Secuencias de pretratamiento de baja huella*. Comparar, con análisis de ciclo de vida, rutas microondas-lixiviación ácida frente a tostación convencional en términos de kWh t^{-1} , emisiones y calidad del residuo, especialmente en matrices ricas en cuarzo (Zhang *et al.*, 2018).
8. *Extensión a tipologías complejas*. Explorar la transferibilidad del enfoque a menas telúridas y relaves finos, donde la deportación de Au y la reactividad de la ganga requieren estrategias específicas de preoxidación y depuración (Zhang *et al.*, 2010; Dehghani *et al.*, 2009).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de GMT LTDA e Innovaminer por el acceso a bases de datos y recursos computacionales. Se agradece especialmente a los revisores anónimos por sus valiosos comentarios.

ABREVIACIONES

PRI/PRP	Índice de <i>preg-robbing</i> / <i>preg-robbing</i> potential
TCM/TOC	Carbono total en materia carbonosa / carbono orgánico total
MW	Microondas
SJR	SCImago Journal Rank
RSL	Revisión sistemática de la literatura

REFERENCIAS

- Abdollahi, H., Karimi, P., Amini, A. & Akcil, A. (2015). Direct cyanidation and roasting combination of a semi-refractory massive sulfide ore. *Minerals & Metallurgical Processing*, 32 (3), 161-169. <https://doi.org/10.1007/BF03402284>
- Cao, P., Zhang, S. & Zheng, Y. (2022). Characterization and gold extraction of gold-bearing dust from carbon-bearing gold concentrates. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 43 (2), 188-200. <https://doi.org/10.1080/08827508.2020.1854248>
- Chen, T., Cabri, L. & Dutrizac, J. (2002). Characterizing gold in refractory sulfide gold ores and residues. *JOM-journal of the Minerals Metals & Materials Society*, 54 (12), 20-22. <https://doi.org/10.1007/BF02709181>
- Chen, T. & Dutrizac, J. (2008). Mineralogical overview of the behavior of gold in conventional copper electrolytic anode slimes processing circuits. *Minerals & Metallurgical Processing*, 25 (3), 156-164. <https://doi.org/10.1007/BF03403402>
- Dehghani, A., Ostad-rahimi, M., Mojtahedzadeh, S. & Gharibi, K. (2009). Recovery of gold from the mouteh gold mine tailings dam. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 109 (7), 417-421. https://scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2225-62532009000700004
- Díaz, C., Conard, B., Oneill, C. & Dalvi, A. (1994). Inco roast-reduction smelting of nickel concentrate. *CIM Bulletin*, 87 (981), 62-71.
- Ding, J., Han, P., Lü, C., Qian, P., Ye, S. & Chen, Y. (2017). Utilization of gold-bearing and iron-rich pyrite cinder via a chlorination-volatilization process. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 24 (11), 1241-1250. <https://doi.org/10.1007/s12613-017-1516-0>
- Fernández, R. (2003). Better temperature control of newmont's roasters increased gold recovery. *Minerals & Metallurgical Processing*, 20 (4), 191-196. <https://doi.org/10.1007/BF03403175>
- Fernández, R., Collins, A. & Marczak, E. (2010). Gold recovery from high-arsenic-containing ores at newmont's roasters. *Minerals & Metallurgical Processing*, 27 (2), 60-64. <https://doi.org/10.1007/BF03402380>
- Fleming, C. (1998). Thirty years of turbulent change in the gold industry. *CIM Bulletin*, 91 (1025), 55-67.
- Fleming, C. (2010). Basic iron sulfate - a potential killer in the processing of refractory gold concentrates by pressure oxidation. *Minerals & Metallurgical Processing*, 27 (2), 81-88. <https://doi.org/10.1007/BF03402383>
- Gao, P., Qin, Y., Han, Y., Li, Y. & Liu, S. (2021). Strengthening leaching effect of carlin-type gold via high-voltage pulsed discharge pretreatment. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 28 (6), 965-973. <https://doi.org/10.1007/s12613-020-2012-5>
- Garcia, J., Villavicencio, G., Altimiras, F., Crawford, B., Soto, R., Minatogawa, V., et al. (2022). Machine learning techniques applied to construction: A hybrid bibliometric analysis of advances and future directions. *Automation in Construction*, 142:104532. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104532>
- Haque, K. (1992). The role of oxygen in cyanide leaching of gold ore. *CIM BULLETIN*, 85 (963), 31-38.
- Hou, L.-C., Li, Q., Hu, J.-J., Yang, Y-b, Xu, B & Jiang, T. (2015). Volatilization behavior and mechanisms of arsenic, sulfur and carbon in the refractory gold concentrate. *TMS Annual Meeting*, 2015- March (nan), 163-170. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48217-0_21
- Konadu, K.T., Mendoza, D.M., Huddy, R.J., Harrison, S.T.L., Kaneta, T. & Sasaki, K. (2020). Biological pretreatment of carbonaceous matter in double refractory gold ores: A review and some future considerations. *Hydrometallurgy*, 196(nan):105434.0. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105434>

- León, F., Rojas, L., Bazán, V., Martínez, Y., Peña, A. & Garcia, J. (2025). A systematic review of copper heap leaching: Key operational variables, green reagents, and sustainable engineering strategies. *Processes*, 13 (5), 1513. <https://doi.org/10.3390/pr13051513>
- Li, J., Sun, C., Kou, J., Wang, P. & Liu, X. (2025). Development of a gold leaching reagent as an alternative to cyanide: Synthesis and performance evaluation. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 32 (4), 835-850. <https://doi.org/10.1007/s12613-024-2957-x>
- Li, Q., Ji, F., Xu, B., Hu, J., Yang, Y. & Jiang, T. (2017). Consolidation mechanism of gold concentrates containing sulfur and carbon during oxygen-enriched air roasting. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 24 (4), 386-392. <https://doi.org/10.1007/s12613-017-1418-1>
- Liu, Y., Li, K., Yin, Z., Dong, J., Xu, L., Ma, R., et al. (2024). Pretreatment of refractory gold ore by curing with concentrated sulfuric acid. *Mining Metallurgy & Exploration*, 41 (2), 1079-1087. <https://doi.org/10.1007/s42461-024-00930-6>
- Mutimutema, P., Akdogan, G. & Tadie, M. (2022). Evaluation of pre-treatment methods for gold recovery from refractory calcine tailings. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 122 (10), 561-570. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2070/2022>
- Nanthakumar, B., Pickles, C.A. & Kelebek, S. (2007). Microwave pretreatment of a double refractory gold ore. *Minerals Engineering*, 20(11), 1109-1119. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.04.003>
- Nyavor, K. & Egiebor, N. (1992). Application of pressure oxidation pre- treatment to a double-refractory gold concentrate. *CIM Bulletin*, 85 (956), 84-96.
- Qin, H., Guo, X., Tian, Q. & Zhang, L. (2021). Recovery of gold from refractory gold ores: Effect of pyrite on the stability of the thiourea leaching system. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 28 (6), 956-964. <https://doi.org/10.1007/s12613-020-2142-9>
- Rojas, L., Peña, A. & Garcia, J. (2025). Complex dynamics and intelligent control: Advances, challenges, and applications in mining and industrial processes. *Mathematics*, 13 (6), 961. <https://doi.org/10.3390/math13060961>
- Sánchez-Garrido, A.J., Navarro, I.J., García, J. & Yepes, V. (2023). A systematic literature review on modern methods of construction in building: An integrated approach using machine learning. *Journal of Building Engineering*, 73:106725. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106725>
- Yogurtcuoglu, E. & Alp, I. (2023). The effect of roasting on the mineralogical structure and cyanidation performance of gossan type oxidized refractory gold-silver ores. *Mining Metallurgy & Exploration*, 40 (5):1667-1679. <https://doi.org/10.1007/s42461-023-00832-z>
- Zhang, J., Zhang, Y., Richmond, W. & Wang, H. (2010). Processing technologies for gold-telluride ores. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 17 (1), 1-10. <https://doi.org/10.1007/s12613-010-0101-6>
- Zhang, S., Zheng, Y., Cao, P., Li, C., Lai, S. & Wang, X. (2018). Process mineralogy characteristics of acid leaching residue produced in low-temperature roasting-acid leaching pretreatment process of refractory gold concentrates. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 25 (10), 1132-1139. <https://doi.org/10.1007/s12613-018-1664-x>
- Zholdasbay, E., Argyn, A., Kurmanseitov, M., Dosmukhamedova, K. & Daruesh, G. (2025). Study of the influence of temperature and duration of chlorinating roasting on the extraction of gold from e-waste. *Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syra*, 333 (2), 51-58. <https://doi.org/10.31643/2025/6445.17>