

Extracción de zinc: procesos para obtener este metal esencial

Vicente Daniel Treviño Rodríguez¹, Francisco Raúl Carrillo Pedroza²

Ma. de Jesús Soria Aguilar³, Elsa Nadia Aguilera-González⁴

RESUMEN

El presente artículo de divulgación explora los principales métodos para la extracción de zinc, un metal fundamental para diversas industrias e incluso para funciones biológicas. En el mecanismo de extracción, resaltan los procesos de tostación, lixiviación y electrolisis, los cuales forman parte de la pirometalurgia e hidrometalurgia, donde destacan sus ventajas, a pesar de sus limitaciones. Además, se examina el impacto ambiental que estos métodos generan y las corrientes actuales que se enfocan en aumentar la eficiencia y sostenibilidad en la recuperación de este metal. En última instancia, se exploran las recientes innovaciones que permiten una recuperación del zinc de alta pureza por medio de desechos industriales, contribuyendo así a la reducción de la dependencia en la explotación de este metal a partir de minerales primarios.

Palabras clave: Zinc, Extracción, Lixiviación, Tostación, Electrolisis.

¹Maestro en Ciencias, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila, Saltillo, Coahuila, México, vicentetrevino@uadec.com.mx, ORCID0000-0001-6174-89932.

²Doctor en Ciencias, Facultad de Metalurgia, Universidad Autónoma de Coahuila, Monclova, Coahuila, México, raulcarrillo@uadec.edu.mx, ORCID0000-0002-0413-06763

³Doctora en Ciencias, Facultad de Metalurgia, Universidad Autónoma de Coahuila, Monclova, Coahuila, México, ma.soria@uadec.edu.mx, ORCID0000-0003-3910-77724

⁴Doctora en Ciencias, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila, Saltillo, Coahuila, México, elsaaguiera@uadec.edu.mx, ORCID0000-0002-6289-599

Autor de Correspondencia: Vicente Daniel Treviño Rodríguez, vicentetrevino@uadec.edu.mx

Recibido: 11 / 09 / 2024

Aceptado: 24 / 08 / 2025

Publicado: 09 / 10 / 2025

Cómo citar este artículo:

Treviño Rodríguez, V. D., Carrillo Pedroza, F. R., Soria Aguilar, M. de J., & Aguilera-González, E. N. (2025). Extracción de zinc: procesos para obtener este metal esencial. *EPISTEMUS*, 19(38), e3813409. <https://doi.org/10.36790/epistemus.v19i38.409>

Zinc extraction: processes to obtain this essential metal

ABSTRACT

This article explores the main methods for the extraction of zinc, a fundamental metal to several industries and even biological functions. In the extraction mechanism, the processes of roasting, leaching and electrolysis, which are part of pyrometallurgy and hydrometallurgy. These methods stand out for their advantages, despite certain limitations. In addition, the article examines the environmental impact that these methods generate and the current trends that focus on increasing the efficiency and sustainability in the recovery of this metal. Finally, it explores recent innovations that enable the recovery of high-purity zinc from industrial waste, thereby contributing to the reduction of dependence on the exploitation of this metal from primary mineral sources.

Key words: Zinc, Extraction, Leaching, Roasting, Electrolysis.





INTRODUCCIÓN

Por sus diversas aplicaciones en la vida cotidiana, desde la industria, la agricultura, la construcción y los vuelos espaciales, hasta su papel en el fortalecimiento del sistema inmunológico y el funcionamiento adecuado de ciertos procesos biológicos, el zinc es un elemento esencial. Sin embargo, como resultado de todos estos usos, la demanda de este metal ha incrementado [1], [2], [3], lo que indica que se requieren procesos de extracción eficientes, redituales y sostenibles para satisfacer esta creciente demanda. En conjunto, la importancia del zinc a nivel individual y a escala global destacan su relevancia en la vida moderna.

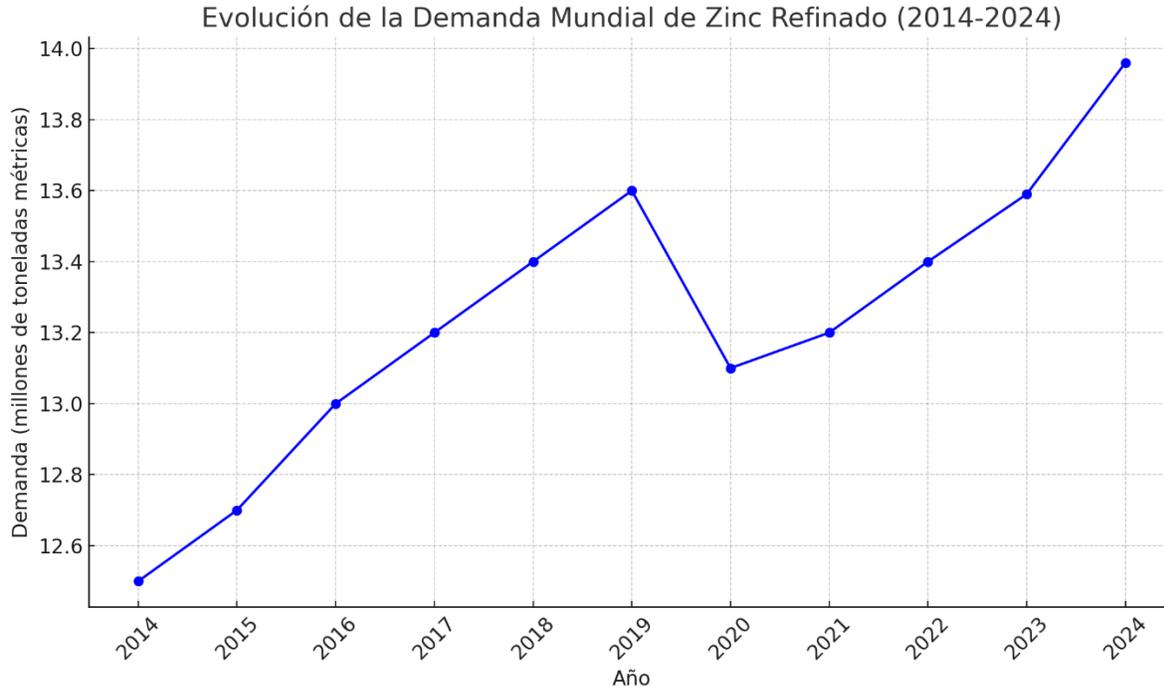


Figura 1. Demanda de zinc en los últimos 10 años. Elaboración propia con datos de Statista [3] e ILZSG [1]



FUENTES DE ZINC Y SU DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA

El Zinc

El zinc, metal con número atómico 30, densidad 7.14 g/cm^3 , y punto de fusión 419.5°C , clasificado con el lugar 24 de los elementos más abundantes [4], [5], es un metal de vital importancia en la salud humana, la industria e, incluso, en biomédica, por sus posibles aplicaciones en esta área. Este metal es utilizado aproximadamente en un 50% de los procesos industriales [6], principalmente en el proceso de galvanización, la fabricación de aleaciones y está presente como componente en el latón y el bronce [7].

En cuanto a sus propiedades, es principalmente conocido por su capacidad de formar óxidos estables y de protección, ya que funciona como una capa protectora en la corrosión [8], [9]. Este metal se vuelve maleable a temperaturas por encima de 100°C , por lo que es ideal para diversos usos en procesos de manufactura [10], [11].

Usos

Como se mencionó con anterioridad, el principal uso es como capa protectora en el galvanizado, pero en la industria automotriz es utilizado para la elaboración de componentes o autopartes, debido a su resistencia a la corrosión y a su maleabilidad [12]. Sin embargo, sus aplicaciones trascienden el nivel industrial; en el ámbito de la salud y farmacéutico, el óxido de zinc (ZnO) destaca como componente de protectores solares por su capacidad de bloquear los rayos UV, y en pomadas que aceleran la cicatrización hasta un 40%, gracias a sus propiedades antisépticas y regenerativas [8], [9].

Además, el zinc también es fundamental para el sistema inmunológico, ya que mitiga los síntomas y la duración de resfriados en un 33% en las primeras horas, por lo que se recomienda una ingesta diaria de 8-11 mg de zinc para adultos [12], [13]. Estudios recientes revelan innovadoras aplicaciones, como el uso de nanopartículas de zinc en terapias contra el cáncer y la disminución de riesgos en infecciones en las vías respiratorias ante el COVID-19. De esta manera, el zinc no solo protege metales y piel, sino que también, refuerza el cuerpo. Por lo tanto, se considera que es un elemento fundamental en aplicaciones industriales, médicas y nutricionales [14], [15], [16].



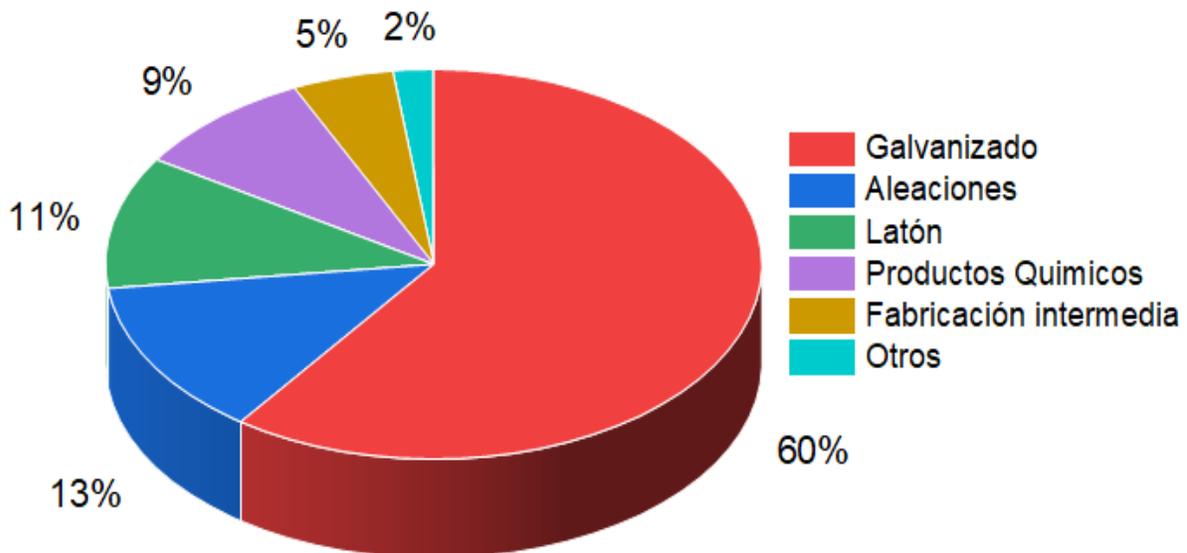


Figura 2. Usos del zinc por industria [12].

De igual manera, el zinc es un elemento importante que podemos encontrar en alimentos como carnes, mariscos, pescados, frijoles, entre otros. Este metal, conocido por su efecto inmunológico y nervioso, es vital para el desarrollo y crecimiento humano en las etapas iniciales. Además, la acción antimicrobiana que ejerce contra bacterias como *staphylococcus aureus*, reduce el avance viral de virus como el herpes simple, el cual genera daños en la piel y las mucosas. De acuerdo con las investigaciones realizadas derivadas del uso de óxido de zinc (ZnO), si este se aplica tópicamente, inhibe la replicación viral y disminuye la inflamación asociada con diversas afecciones dermatológicas, como el acné y el eczema. Debido a esto y a su papel en la síntesis de proteínas y regeneración celular, este compuesto se convierte en un nutriente necesario para apoyar la salud [8], [16], [17], [18].



Minerales con zinc

El elemento de zinc se encuentra principalmente en forma del mineral esfalerita, y frecuentemente está acompañado con plomo y plata en depósitos polimetálicos [19], [20]. No obstante, también lo podemos encontrar como carbonato, silicato u óxido [21], [22], [23]. Estos tipos de minerales los podemos encontrar dentro de la siguiente tabla:

Tabla 1. Tipos de minerales de zinc [23], [24].

Mineral	Fórmula química	Tipo de mineral	Método de extracción	Proceso
Esfalerita	ZnS	Sulfuro de zinc	Flotación y tostación	Se convierte en óxido de zinc (ZnO) antes de ser reducido.
Smithsonita	ZnCO ₃	Carbonato de zinc	Lixiviación ácida	Se disuelve en ácido para producir sulfato de zinc (ZnSO ₄).
Hemimorfita	Zn ₄ Si ₂ O ₇ (OH) ₂ ·H ₂ O	Silicato de zinc	Lixiviación ácida	Lixiviado para producir zinc soluble, se precipita como ZnSO ₄ .
Willemita	Zn ₂ SiO ₄	Silicato de Zinc	Lixiviación ácida	Zinc se extrae al disolver en soluciones ácidas.
Hidrocincita	Zn ₅ (CO ₃) ₂ (OH) ₆	Carbonato hidroxilado de zinc	Lixiviación ácida	Disuelto en ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄), formando ZnSO ₄ , CO ₂ y agua. Requiere ajuste de pH para neutralizar hidroxilos.





Principales yacimientos y reservas de zinc a nivel mundial

A inicios del 2024 se reportaron 1.9 mil millones de toneladas en recursos zinc, distribuidos en diferentes países, entre los cuales China es el mayor productor y el que cuenta con más reservas. Otros productores importantes son Australia, Perú y Estados Unidos [7], [20]. Los datos referidos de los países, su producción y sus reservas estimadas se encuentran representados en la siguiente tabla:

Tabla 2. Producción y reservas mundiales de zinc del 2022 y 2023 (en toneladas métricas) [7].

País	Producción minera (2022)	Producción minera (2023)	Reservas aproximadas (2023)
China	4 040 000	4 000 000	44 000 000
Australia	1 240 000	1 100 000	64 000 000
Perú	1 370 000	1 400 000	21 000 000
Estados Unidos	761 000	750 000	6 600 000
México	744 000	690 000	14 000 000
Rusia	300 000	310 000	25 000 000
Sudáfrica	238 000	230 000	6 200 000
India	840 000	860 000	7 400 000
Otros países	1 940 000	1 840 000	25 000 000

A nivel mundial se reportaron en 2023 alrededor de 370 minas de producción de zinc operando [24]. En la tabla 3 se muestran las 10 principales minas que destacaron en su producción durante el 2023. En esta es posible observar una continuidad en operabilidad, en algunos casos, de hasta por más de 25 años adicionales [7].



Tabla 3. Principales minas de zinc 2023 [24].

Mina	Ubicación	Tipo de mina	Propietario	Producción ¹	Operable hasta
Red Dog	Alaska, EUA	Superficial	Teck Resources	539.8	2031
Rampura Agucha	Rajasthan, India	Subterránea	Vedanta Resources	462.75	2033
Antamina	Ancash, Perú	Superficial	Glencore Plc.	370.51	2036
Mount Isa Zinc Mine	Queensland, Australia	Superficial y subterránea	Glencore Plc.	287.2	2036
McArthur River Mine (zinc)	Nothern Territory, Australia	Superficial	Glencore Plc.	262.2	2040
Gamsberg Project	Northern Cape, Sudafrica	Subterránea	Vedante Resources	225	2052
Sindesar Khird	Rajasthan, India	Subterránea	Vedanta Resources	176.54	2029
San Cristóbal	Potosí, Bolivia	Superficial	San Cristóbal Mining	176.42	2030
Duglad River Project	Queensland	Subterránea	China Minmetals	151.84	2044
Vazante	Minas Gerais, Brasil	Subterránea	Votorantim	145.7	2031

Nota: ¹ (miles toneladas).





Minería del zinc en México

México está ubicado en el sexto lugar en extracción de zinc a nivel mundial, lo que equivale al 5% de la producción total y, a lo largo de los últimos 6 años (2018-2024) [25], [26], ha presentado avances significativos tanto en la extracción de este metal, como en sus innovaciones tecnológicas. A nivel nacional, el zinc representó 5.6% del valor total, lo que lo ubica en cuarto lugar por debajo del oro (29.7%), cobre (29.2%) y la plata (18.4%) en cuanto al valor de la producción minero-metalúrgica por mineral [26], [27]. En los registros obtenidos hasta la mitad del año 2024, se documentó que se extrajo un total de 54 905 toneladas de zinc, las cuales están distribuidas por estados en la siguiente tabla, con datos proporcionados por la Secretaría de Economía de México [23],[24].

Tabla 4. Producción minera de zinc por estado de México (enero-junio 2024) [28], [29].

Producción de zinc por estado, julio 2024	
Estado	Total (toneladas)
Zacatecas	29 349
Durango	8 401
Chihuahua	5 861
Edo. Méx.	3 261
San Luis Potosí	2 067
Otras entidades	5 966
Total	54 905



Los principales estados productores de zinc son Zacatecas, con un 53.5%, en segundo lugar, se encuentra Durango, con un 15.3%, seguido de Chihuahua (10.7%), Estado de México (5.9%) y de San Luis Potosí (3.8%). El 10.8% restante de las 54 905 toneladas extraídas hasta julio de 2024 corresponde a otras entidades [28], [29].

Un avance importante es la entrada a la operación de Buena Vista Zinc, una nueva planta de zinc que fue inaugurada en el 2023 con una proyección de producción anual de más de 90 000 toneladas de zinc metálico [30]. Ubicada en una zona rica en depósitos de polimetálicos, esta nueva planta utiliza tecnologías de punta como la lixiviación presión-ácido y la electrólisis asistida por energía solar, para una eficiencia en la recuperación del metal del 95%, emitiendo un 30% menos de CO₂. Además, su sistema de gestión sostenible recicla el 85% del agua utilizada y transforma los residuos de hierro en materiales para la construcción, estableciendo un estándar en minería responsable. Este proyecto no solo impulsa la producción global de zinc, sino que también demuestra cómo la innovación tecnológica puede armonizar productividad y sostenibilidad [31], [32].

MÉTODOS DE EXTRACCIÓN DEL ZINC

Procesos pirometalúrgicos

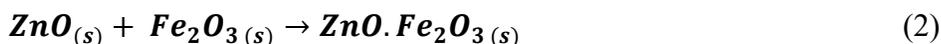
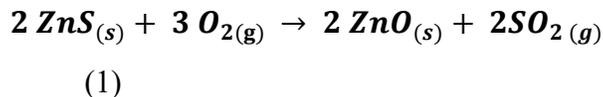
La pirometalurgia inició en el siglo XVIII para satisfacer la demanda industrial de metales puros, especialmente para la fabricación de latón y, posteriormente, en aplicaciones como el galvanizado, se basa en la utilización de calor en los procesos de extracción y purificación de metales [33], [34]. Los métodos pirometalúrgicos más importantes son la tostación, la fundición y el refinado [35], [36]. Para la extracción de zinc, el método más empleado es el proceso de tostación, también conocido como calentamiento en aire sin fusión, que se basa en transformar el mineral o concentrado del metal, usualmente sulfuros en óxidos, por medio de la aplicación de aire caliente [35], [37].

Mediante este proceso, la extracción del zinc se efectúa a partir de sulfuro de zinc (ZnS), obteniendo un óxido de zinc (ZnO) como producto principal y un gas de dióxido de azufre (SO₂).





Este proceso se lleva a cabo a una temperatura de 920-980 °C, con un promedio de 90 minutos del material en el horno. Las reacciones que verifican este proceso son las siguientes [38], [39].



El objetivo de este proceso con el sulfato de zinc es tener la calcina (ZnO) con el menor contenido de azufre. También, debido a la existencia de hierro dentro del mineral ocurre la formación ferrita (ZnO.Fe₂O₃), por lo que se busca que también se encuentre en bajas cantidades, porque este compuesto es insoluble ante ácidos y también es responsable de que altas concentraciones de zinc terminen como residuos durante este proceso y procesos posteriores [38]. En la siguiente tabla se engloban algunas de las ventajas y desventajas que presenta el proceso de tostación durante la extracción del zinc [40], [41], [42].

Tabla 5. Ventajas y desventajas del proceso de tostación.

Ventajas	Desventajas
Reducción del contenido de azufre: puede reducir el contenido de azufre de los concentrados de zinc a menos del 0.5%.	Impurezas en los productos intermedios: los productos intermedios pueden estar contaminados con impurezas, hierro y vapor.
Eficiencia térmica: el proceso es altamente eficiente desde el punto de vista térmico.	Baja productividad específica: los hornos utilizados tienen una baja productividad específica.
Producción de calcina: se produce calcina en forma de pequeñas partículas que son fácilmente lixiviables.	Bajo contenido de SO₂ en los gases del proceso: los gases tienen un contenido relativamente bajo de SO ₂ , lo que reduce la eficiencia en la producción de ácido sulfúrico.
Producción de gas SO₂: el proceso genera gases con alto contenido de SO ₂ , útiles para la producción de ácido sulfúrico.	Dificultad con concentrados de baja ley: el proceso puede ser complicado de operar con concentrados de baja ley o con contenido de plomo superior al 3 %.



Este proceso enfrenta diversos desafíos, así como consideraciones clave que pueden afectar directamente su eficiencia y operación. Algunos de los que podemos mencionar son los siguientes:

- **Control de impurezas:** la presencia de elementos como hierro, cobre y plomo dentro de los concentrados son uno de los principales desafíos dentro de la extracción del zinc, ya que el principal problema que generan es la formación de aglomerados y sinterizados que afectan la calidad del producto [43], [44].
- **Estabilidad y optimización del proceso:** consiste en optimizar la mezcla de alimentación y las condiciones operativas (tiempo, velocidades, temperatura, etc.), para evitar problemas de acumulación de material o gases en los hornos [44].
- **Operación con concentrados de baja ley:** este es uno de los desafíos más significativos, el cual consiste en operar con concentraciones bajas de zinc o altos niveles de impurezas, por lo que requiere realizar ajustes constantes de temperatura y la cantidad de oxígeno inyectado para asegurar una conversión eficiente del ZnS a ZnO [43].
- **Balance de calor y gases:** la producción de SO₂, en algunas ocasiones, puede ser relativamente baja, lo que afecta directamente a la eficiencia en la producción de ácido sulfúrico. Además de que se deben realizar cálculos termodinámicos para asegurar que el calor generado sea el suficiente para que las reacciones se mantengan [44].

Procesos hidrometalúrgicos

Esta serie de procesos se basan en la utilización de soluciones acuosas para extraer metales provenientes de minerales, concentrarlos o recuperarlos de materiales residuales o reciclados. Esta rama inició en 1940 por la necesidad de obtener uranio, lo que los llevó a que en el año de 1960 se extendiera a nuevas áreas debido al desarrollo de la hidrometalurgia a presión. Algunos de los procesos hidrometalúrgicos más importantes se presentan en la siguiente tabla que engloba el tipo de proceso, su aplicación y las condiciones o reactivos necesarios para realizarlo [45].



**Tabla 6.** Procesos hidrometalúrgicos más comunes.

Método	Descripción	Ventajas	Desventajas
Lixiviación Ácida [45]	Consiste en utilizar ácido sulfúrico para disolver el mineral de zinc, de forma que se obtiene una solución de sulfato de zinc.	Alta eficiencia en la extracción.	Por los residuos, requiere manejo específico.
Lixiviación Alcalina [46], [47]	Requiere del uso de soluciones de hidróxido de sodio o carbonato de sodio, es adecuado para minerales de bajo grado.	Mayor selectividad de los metales de interés disueltos y un menor impacto ambiental.	Complejidad en el proceso, formación de efluentes, problemas de corrosión.
Purificación [48]	Se eliminan las impurezas del zinc.	Mejora la pureza del zinc.	Consume gran cantidad de energía eléctrica.
Tratamiento de ferritas de zinc [49]	Se emplea el proceso tostación-lixiviación-electrolisis.	Presenta beneficios ambientales por el aprovechamiento de este mineral.	Puede dejar impurezas en el zinc.
Reciclaje de batería	Las baterías pasan por un proceso de lixiviación-separación-recuperación.	Reciclaje de desecho, reducción de extracción de elementos de minerales.	La presencia de otros elementos afecta a la extracción del zinc.



El proceso de extracción que más se utiliza es el de tostación-lixivación-electrólisis, también conocido por sus siglas en inglés como RLE (Roast-Leach-Electrowin). Como ya se había mencionado con anterioridad, en el proceso de tostación del zinc obtenemos óxido de zinc a partir de un sulfuro. La siguiente etapa del proceso es la lixiviación. Esta usualmente se realiza con ácido sulfúrico y permite recuperar zinc en forma de una solución de sulfato [50].

Este proceso de lixiviación no solo es para concentrados de óxidos de zinc, también lo podemos utilizar para recuperar este metal de diferentes tipos de residuos como polvos de acerías o cenizas de galvanizado. La reacción de la lixiviación ácida del óxido de zinc utilizando ácido sulfúrico, donde el óxido se disuelve y forma sulfato de zinc disuelto en agua, está representada de la siguiente forma [48]:



El proceso de lixiviación presenta diversas ventajas para la industria metalúrgica, como garantizar altas recuperaciones de zinc, aproximadamente alrededor del 97%, también su eficiencia para extraer este metal de residuos como polvos de acería, incluso de chatarras. Además, los costos del ácido sulfúrico como agente lixivante son bajos, por su disponibilidad, añadiendo el fácil manejo que este presenta. Incluso se podrían reducir costos en algunos casos implementando otro ácido más, como el ácido nítrico [51].

Una vez obtenido el sulfato de zinc y antes de llegar al proceso de electrólisis es necesario realizar una etapa previa de purificación, proceso que usualmente utiliza polvo de zinc para remover metales como cadmio, cobre, níquel y cobalto, los cuales pueden afectar la recuperación del zinc durante la electrólisis. La electrólisis es la parte final del proceso. En esta etapa, la solución de sulfato de zinc, por acción de una corriente eléctrica, el zinc metálico puro, es depositado sobre un cátodo, resultando en una lámina de zinc que posteriormente es transportada para un proceso de fusión y colado [48], [51].



A pesar de la gran efectividad de este proceso, su principal desventaja es la contaminación que genera, dado que afecta tanto al suelo como al aire. Si hablamos de la contaminación atmosférica, se debe a los productos secundarios que se generan, ya sean partículas, humo de zinc y, principalmente, los humos provenientes de la combustión como dióxido de azufre; por otro lado, en cuanto al suelo, el zinc se adhiere a él y, dependiendo de este, puede llegar a aguas subterráneas [52], [53].

En cambio, realizar un proceso de lixiviación a la esfalerita (ZnS), principal mineral sulfurado de zinc requiere de ciertas condiciones específicas. Comúnmente se emplea ácido sulfúrico y un agente oxidante con el oxígeno o hierro (Fe³⁺) para convertir el sulfuro en sulfato de zinc soluble.

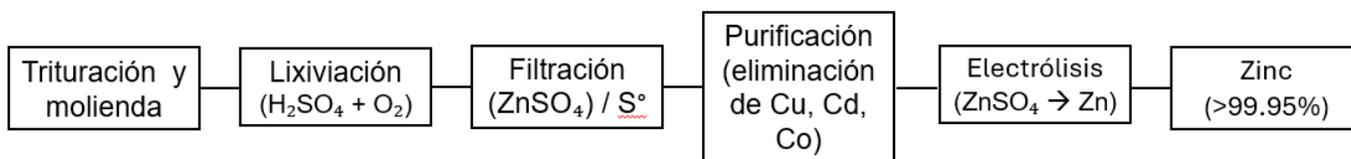
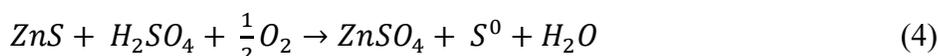


Figura 4. Diagrama de flujo del proceso de lixiviación de esfalerita. Adaptado de Xin et al. (2021) [45].

Importancia de la eliminación de hierro como impureza del zinc

El hierro (Fe) es una impureza común en los minerales de zinc, especialmente en los sulfuros, como la esfalerita (ZnS). En la solución rica en zinc obtenida después de los procesos de tostación y lixiviación, el primer elemento impuro en considerar es el hierro, ya que interfieren en las etapas posteriores, la electrólisis, al reducir la eficiencia y la pureza del zinc metálico (>99.95%); en tanto, el hierro forma compuestos insolubles que se adhieren a los equipos, aumentando los costos de mantenimiento. De ahí que sea crítico para el proceso eliminarlo a fin de asegurar la calidad del producto final [54], [55], [56].

Métodos de eliminación del hierro

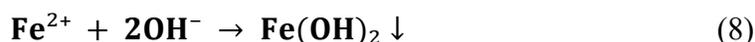
Precipitación con cal (CaO)

Ajuste del pH a 3.5 – 4.0 para precipitar hierro como hidróxido férrico ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) o jarosita ($\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$):



Cementación con polvo de zinc

Reducción de iones Fe^{3+} a Fe^{2+} usando zinc metálico (Zn^0), seguido de precipitación:



Destino del hierro eliminado

1. Presas de relaves:

Los lodos de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ se almacenan en depósitos diseñados para evitar contaminación de acuíferos [18].

2. Reciclaje en siderurgia:

Los residuos ricos en hierro se integran en la producción de acero o como materia prima para pigmentos (ej. óxidos de hierro) [19].

3. Uso en construcción:

Lodos estabilizados se emplean en la fabricación de ladrillos o materiales de relleno [20].

Avances y tendencias actuales en la extracción del zinc

En los últimos años, se han buscado alternativas, como la implementación de otras técnicas combinadas al ácido sulfúrico para aumentar el rendimiento de este proceso. Así mismo, se ha intentado reducir los residuos contaminantes producidos por el proceso de extracción del zinc, algunos de estos trabajos se encuentran agrupados dentro de la siguiente tabla:





Tabla 7. Trabajos recientes sobre la extracción de zinc.

Títulos	Método	Resultado
Lixiviación de zinc y germanio de polvo de óxido de zinc (2021) [57]	Oxidación con ozono y ácido sulfúrico	Recuperación de un 95.79% de Zn y 93.63 % de Ge.
Lixiviación de zinc surfactante y autoclave (2023) [58]	Ácido sulfúrico con surfactante.	93-94% de extracción de zinc.
Lixiviación de residuos de zinc asistida por microondas (2024) [59].	Calentamiento por microondas y ácido sulfúrico	Mejor eficiencia en la extracción de zinc al aplicar la energía de microondas.
Lixiviación de polvos de óxido de zinc potenciado por ultrasonido (2022) [60].	Ultrasonido y ácido sulfúrico	Extracciones de 91.16 % de Zn (5.8% mayor al solo el uso de H ₂ SO ₄).
Recuperación selectiva de residuos de goethita (2020) [61].	Disolventes y ácido sulfúrico	Se logró la recuperación del zinc de alta pureza de residuos industriales.
Lixiviación directa con ozono como oxidante (2020) [59].	Ácido sulfúrico y ozono	Se logró la lixiviación de concentrados de sulfato zinc.

La tabla 7 muestra un panorama sobre la dirección de las investigaciones más recientes para la extracción de zinc, enfocándose en la búsqueda de métodos más eficientes y a la vez sostenibles. Los avances buscan aprovechar el conocimiento ya existente en la lixiviación y la química del zinc para desarrollar nuevas alternativas, todo esto por medio de la integración de tecnologías



innovadoras que presenten aumento en el porcentaje de recuperación del metal y que, a su vez, reduzcan la huella ambiental generada por este proceso, asegurando también la sostenibilidad del suministro de zinc en el futuro.

Por lo tanto, la comparación entre los procesos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos demuestra importantes contrastes en cuanto a la eficiencia, el impacto ambiental y la aplicabilidad. La pirometalurgia, que involucra principalmente la tostación de sulfuros como el ZnS esfalerita, permite una recuperación del zinc moderada del 85–90% [26], [32]. Sin embargo, la pirometalurgia genera emisiones críticas de SO₂ y CO₂. Además, el alto consumo energético 900–1200 kWh/ton Zn a temperaturas de 920–980°C en hornos es un desafío.

Aunque es eficaz para minerales sulfurados de alta ley, su dependencia de combustibles fósiles y la formación de compuestos insolubles como las ferritas (ZnO·Fe₂O₃) limitan su sostenibilidad [29], [35]. Por otro lado, la hidrometalurgia, destacada por el proceso RLE (tostación-lixiviación-electrólisis), alcanza eficiencias superiores (90–97%) con menor consumo energético (500–700 kWh/ton Zn) al operar a temperaturas moderadas (80–95°C) y permitir el reciclaje de reactivos como el ácido sulfúrico [36], [42]. Este método es versátil para minerales complejos, residuos industriales y concentrados de baja ley, pero enfrenta desafíos en la gestión de lodos tóxicos (ej. Fe(OH)₃) y la purificación de soluciones [39], [44].

Estudios recientes [47], [49] enfatizan que la hidrometalurgia, al integrar innovaciones como lixiviación presión-ácido o uso de ultrasonido, reduce la huella ambiental y se alinea con las demandas de economía circular. En conclusión, mientras la pirometalurgia sigue siendo relevante para yacimientos sulfurados puros, la hidrometalurgia emerge como la alternativa dominante para contextos que priorizan la sostenibilidad y la eficiencia en recursos complejos.

CONCLUSIONES

En resumen, el zinc es un metal muy utilizado en diferentes sectores de nuestra vida y, pese a la efectividad del proceso de tostación-lixiviación-electrólisis, en la actualidad, y al igual que otros procesos de extracción de metales, su principal problemática es la contaminación que se genera. Por ello, el presente y el futuro de este proceso consiste en buscar e implementar alternativas para mejorar la obtención de este metal esencial, sin afectar los costos y efectividad que ya se





han logrado, ya sea obteniéndolo directamente del mineral o recuperándolo de desechos industriales y/o productos.

REFERENCIAS

- [1] International Lead and Zinc Study Group, «What Is Zinc – International Lead and Zinc Study Group». Accedido: 4 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ilzsg.org/what-is-zinc/>
- [2] MarketScreener, «Mercados mundiales de plomo y zinc registrarían excedentes en 2023 y 2024: ILZSG - MarketScreener». Accedido: 4 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://es.marketscreener.com/noticias/ultimas/Mercados-mundiales-de-plomo-y-zinc-registrar-an-excedentes-en-2023-y-2024-ILZSG-45019880/>
- [3] «Zinc: producción minera global 2010-2023», Statista. Accedido: 4 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://es.statista.com/estadisticas/1139535/produccion-minera-de-zinc-a-nivel-mundial/>
- [4] University of Toledo, «Zinc». Accedido: 15 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.utoledo.edu/nsm/ic/elements/zinc.html>
- [5] Reazn The Zinc Company, «REAZN - Facts about zinc - Did you know?», REAZN S.A. Accedido: 15 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.reazn.com/news/facts_about_zinc/
- [6] J. Antrekowitsch, S. Steinlechner, G. Hanke, y U. Brandner, «Chapter 23 - Zinc», en *Handbook of Recycling (Second Edition)*, C. Meskers, E. Worrell, y M. A. Reuter, Eds., Elsevier, 2024, pp. 371-383. doi: 10.1016/B978-0-323-85514-3.00009-9.
- [7] U.S. Geological Survey, «Mineral Commodity Summaries 2024», p. 216, 2024, doi: <https://doi.org/10.3133/mcs2024>.
- [8] P. Lambert, M. Said-Ahmed, B. Lescop, S. Rioual, y M. Lebrini, «Protection against Atmospheric Corrosion of Zinc in Marine Environment Rich in H₂S Using Self-Assembled Monolayers Based on Sargassum fluitans III Extract», *Coatings*, vol. 14, n.º 8, Art. n.º 8, ago. 2024, doi: 10.3390/coatings14080988.



- [9] A. B. Pop, G. Iepure, A. M. Titu, y S. Ravai-Nagy, «Characterization and Corrosion Behavior of Zinc Coatings for Two Anti-Corrosive Protections: A Detailed Study», *Coatings*, vol. 13, n.º 8, Art. n.º 8, ago. 2023, doi: 10.3390/coatings13081460.
- [10] F. Chen, «Zinc Melting Point: Key Facts and Industrial Applications», BOYI. Accedido: 18 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.boyiprototyping.com/materials-guide/zinc-melting-point/>
- [11] «Zinc Element Properties and Information», Chemical Engineering World. Accedido: 18 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://chemicalengineeringworld.com/zinc-element-properties-and-information/>
- [12] H. Harri, «Zinc lozenges and the common cold: a meta-analysis comparing zinc acetate and zinc gluconate, and the role of zinc dosage - Harri Hemilä, 2017». Accedido: 25 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/2054270417694291>
- [13] NIH, «Office of Dietary Supplements - Zinc». Accedido: 25 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://ods.od.nih.gov/factsheets/Zinc-HealthProfessional/>
- [14] S. D. Lee, N. J. Kellow, T. S. T. Choi, y C. E. Huggins, «Assessment of Dietary Acculturation in East Asian Populations: A Scoping Review», *Adv. Nutr.*, vol. 12, n.º 3, pp. 865-886, may 2021, doi: 10.1093/advances/nmaa127.
- [15] M. Al Fayi, «Thymoquinone and curcumin combination protects cisplatin-induced kidney injury, nephrotoxicity by attenuating NFκB, KIM-1 and ameliorating Nrf2/HO-1 signalling: Journal of Drug Targeting: Vol 28 , No 9 - Get Access». Accedido: 25 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/1061186X.2020.1722136>
- [16] R. A. Rojas Labastida y J. V. Pacheco Julián, «Nanopartículas de óxido de zinc y óxido de plata para uso de protección solar de piel». Accedido: 18 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2594-19252024000200101
- [17] MedlinePlus, «Zinc en la dieta: MedlinePlus enciclopedia médica». Accedido: 17 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/002416.htm>
- [18] Healthdirect Australia, «Zinc and your health». Accedido: 17 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.healthdirect.gov.au/zinc>





- [19] Royal Society of Chemistry, «Zinc - Element information, properties and uses | Periodic Table». Accedido: 15 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.rsc.org/periodic-table/element/30/zinc>
- [20] Britannica, «Zinc | Properties, Uses, & Facts | Britannica». Accedido: 15 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.britannica.com/science/zinc>
- [21] S. Rout, «Extraction of Zinc: Froth Floatation Process, Roasting, Refining, Uses», Embibe Exams. Accedido: 17 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.embibe.com/exams/extraction-of-zinc/>
- [22] British Geological Survey, «Zinc ore and mines | Minerals and mines | Foundations of the Mendips». Accedido: 17 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www2.bgs.ac.uk/mendips/minerals/Mins_Mines_5.htm
- [23] bare syndicate, «5 Key Steps in the Lead and Zinc Ores Extraction Process». Accedido: 17 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://baresyndicate.com/5-steps-lead-and-zinc-ores-extraction-process/>
- [24] Mining Technology, «The world's ten largest zinc mines», Mining Technology. Accedido: 16 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.mining-technology.com/marketdata/ten-largest-zincs-mines/>
- [25] Mundo Minero, «México en la sexta posición de producción de Zinc en el mundo - Mundo Minero MX». Accedido: 11 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://mundominero.mx/sexta-lugar-en-zinc/>
- [26] Camara Minera de México, «Informe Anual :: Camimex». Accedido: 16 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.camimex.org.mx/index.php/publicaciones/informe-anual>
- [27] Servicio Geológico Mexicano, «Anuario Estadístico de la Minería Mexicana», gob.mx. Accedido: 16 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://www.gob.mx/sgm/articulos/consulta-el-anuario-estadistico-de-la-mineria-mexicana?idiom=es>
- [28] Secretaria de Economía de México, «Boletín estadístico de la industria minero-metalúrgica», Secretaria de Economía, México, Boletín Estadístico, 2024. [En línea]. Disponible



en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/947677/Bolet_n_estad_stico_-_julio_2024.pdf

[29] Secretaria de Economía, «Prontuario Estadístico de la Minería enero – marzo 2024», Secretaria de Economía, 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/922201/Prontuario_Ene-Mar_2024.pdf

[30] Mining Technology, «Grupo Mexico reports 12.6% revenue growth in 2024, led by mining division», Mining Technology. Accedido: 25 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.mining-technology.com/news/grupo-mexico-mining-division/>

[31] «Grupo Mexico profit down 19% on sliding metal prices», MINING.COM. Accedido: 25 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.mining.com/web/grupo-mexico-profit-down-19-on-slide-in-metal-prices/>

[32] W. Mackenzie, «Data & analytics solutions». Accedido: 25 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.woodmac.com/reports/metals-buenavista-zinc-mine-16289266/>

[33] F. Habashi, «Extractive Metallurgy☆», en *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, Elsevier, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11324-4>.

[34] F. Habashi, «A Textbook of Hydrometallurgy, 2nd edition», *Fathi Habashi*, vol. 13, nov. 2000, doi: [10.1016/S0892-6875\(00\)00127-8](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(00)00127-8).

[35] R. Curley, «Pyrometallurgy | Metal Extraction, Heat Treatment & Refining | Britannica». Accedido: 19 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.britannica.com/technology/pyrometallurgy>

[36] C. L. Nassaralla, «Pyrometallurgy», en *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, K. H. J. Buschow, R. W. Cahn, M. C. Flemings, B. Ilschner, E. J. Kramer, S. Mahajan, y P. Veysseyre, Eds., Oxford: Elsevier, 2001, pp. 7938-7941. doi: [10.1016/B0-08-043152-6/01429-7](https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/01429-7).

[37] H. Liang, C. Yang, K. Huang, y. Li, y W. Gui, «A Hybrid First Principles and Data-Driven Process Monitoring Method for Zinc Smelting Roasting Process», *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 70, pp. 1-14, 2021, doi: [10.1109/TIM.2021.3126390](https://doi.org/10.1109/TIM.2021.3126390).

[38] J. Vidalon, «La Tostación», *Dir. Investig. Desarro. INCITEMI*, p. 10, 1977.





- [39] B. Berdiyarov y S. Matkarimov, «Method for oxidative roasting of sulfide zinc concentrates in an air oxygen stream in fluidized bed furnaces», *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1142, n.º 1, p. 012035, mar. 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1142/1/012035.
- [40] Byjus, «Calcination And Roasting - What Is Calcination And Roasting», byjus. Accedido: 20 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://byjus.com/chemistry/calcination-and-roasting/>
- [41] A. Richards, «Zinc processing | Extraction, Refining & Uses | Britannica». Accedido: 20 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.britannica.com/technology/zinc-processing>
- [42] Vendatu, «Calcination and Roasting- Definition, Differences and FAQs», vendatu. Accedido: 20 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.vedantu.com/chemistry/calcination-and-roasting>
- [43] P. Taskinen, M. Metsärinta, B. Saxén, S. Penttinen, K. Svens, y B. Kerstiens, «Increased Productivity of Zinc Roasters and SO₂ -Quality», 2008. Accedido: 20 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/Increased-Productivity-of-Zinc-Roasters-and-SO2-Taskinen-Mets%C3%A4rinta/ca158df42af91b77b27e567db07012019306f7b1>
- [44] S. Heukelman y D. Groot, «Fluidized bed roasting of micro-pelletized zinc concentrate: Part II- Particle entrainment and residence time», *J. South. Afr. Inst. Min. Metall.*, vol. 111, n.º 11, pp. 767-772, nov. 2011.
- [45] «23.3: Hydrometallurgy», Chemistry LibreTexts. Accedido: 21 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://chem.libretexts.org/Courses/University_of_Missouri/MU%3A__1330H_\(Keller\)/23%3A_Metals_and_Metallurgy/23.3%3A_Hydrometallurgy](https://chem.libretexts.org/Courses/University_of_Missouri/MU%3A__1330H_(Keller)/23%3A_Metals_and_Metallurgy/23.3%3A_Hydrometallurgy)
- [46] M. L. Álvarez, A. Méndez, R. L. Rodríguez Pacheco, J. Paz-Ferreiro, y G. Gascó, «Recovery of Zinc and Copper from Mine Tailings by Acid Leaching Solutions Combined with Carbon-Based Materials», jun. 2021, doi: 10.13039/501100004837.
- [47] F. G. Sánchez Rivadeneira, «Recuperación de zinc de polvos de acería por lixiviación selectiva con ácido fosfórico o hidróxido de sodio.», masterThesis, Quito : EPN, 2024., 2024.



Accedido: 4 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/25289>

[48] F. J. T. Garcia, «Metodo hidrometalúrgico para la recuperación de zinc en medio sulfúrico a partir de concentrados de zinc sulfurados», WO2012140284A1, 18 de octubre de 2012

Accedido: 22 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://patents.google.com/patent/WO2012140284A1/es>

[49] N. Leclerc, E. Meux, y J.-M. Lecuire, «Hydrometallurgical extraction of zinc from zinc ferrites», *Hydrometallurgy*, vol. 70, pp. 175-183, ene. 2003, doi: 10.1016/S0304-386X(03)00079-3.

[50] S. Hellgren, F. Engström, y L. Sundqvist Öqvist, «The Characterization of Residues Related to the Roasting– Leaching– Electrowinning Zinc Production Route for Further Metal Extraction», *Metals*, vol. 14, n.º 1, Art. n.º 1, ene. 2024, doi: 10.3390/met14010073.

[51] C. Xin, H. Xia, G. Jiang, Q. Zhang, L. Zhang, y Y. Xu, «Studies on Recovery of Valuable Metals by Leaching Lead–Zinc Smelting Waste with Sulfuric Acid», *Minerals*, vol. 12, n.º 10, Art. n.º 10, oct. 2022, doi: 10.3390/min12101200.

[52] Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, «Resumen de Salud Pública: Cinc (Zinc) | PHS | ATSDR». Accedido: 24 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs60.html

[53] Departamento de Salud Pública de Illinois, «Zinc», Departamento de Salud Pública de Illinois. Accedido: 24 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dph.illinois.gov/topics-services/environmental-health-protection/toxicology/hazardous-substances/zinc.html>

[54] Y. Zou, A. Chernyaev, S. Seisko, J. Sainio, y M. Lundström, «Removal of iron and aluminum from hydrometallurgical NMC-LFP recycling process through precipitation», *Miner. Eng.*, vol. 218, p. 109037, nov. 2024, doi: 10.1016/j.mineng.2024.109037.

[55] J. Formanek, J. Jandova, y J. Čapek, «Iron removal from zinc liquors originating from hydrometallurgical processing of spent Zn/MnO₂ batteries», *Hydrometallurgy*, vol. 138, pp. 100-105, jun. 2013, doi: 10.1016/j.hydromet.2013.06.010.





- [56] L. Hoeber y S. Steinlechner, «A comprehensive review of processing strategies for iron precipitation residues from zinc hydrometallurgy», *Clean. Eng. Technol.*, vol. 4, p. 100214, jul. 2021, doi: 10.1016/j.clet.2021.100214.
- [57] C. Xin, H. Xia, Q. Zhang, L. Zhang, y W. Zhang, «Leaching of zinc and germanium from zinc oxide dust in sulfuric acid-ozone media», *Arab. J. Chem.*, vol. 14, n.º 12, p. 103450, dic. 2021, doi: 10.1016/j.arabjc.2021.103450.
- [58] E. B. Kolmachikhina, T. N. Lugovitskaya, M. A. Tretiak, y D. A. Rogozhnikov, «Surfactants and their mixtures under conditions of autoclave sulfuric acid leaching of zinc concentrate: Surfactant selection and laboratory tests», *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 33, n.º 11, pp. 3529-3543, nov. 2023, doi: 10.1016/S1003-6326(23)66352-6.
- [59] B. Kenzhaliyev, T. Surkova, A. Berkinbayeva, Z. Baltabekova, y K. Smailov, «Harnessing Microwave Technology for Enhanced Recovery of Zinc from Industrial Clinker», *Metals*, vol. 14, n.º 6, p. 699, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/met14060699>.
- [60] X. Zheng, S. Li, B. Liu, L. Zhang, y A. Ma, «A Study on the Mechanism and Kinetics of Ultrasound-Enhanced Sulfuric Acid Leaching for Zinc Extraction from Zinc Oxide Dust», *Materials*, vol. 15, n.º 17, Art. n.º 17, ene. 2022, doi: 10.3390/ma15175969.
- [61] N. R. Rodriguez, L. Machiels, B. Onghena, J. Spooen, y K. Binnemans, «Selective recovery of zinc from goethite residue in the zinc industry using deep-eutectic solvents», *RSC Adv.*, vol. 10, n.º 12, pp. 7328-7335, feb. 2020, doi: 10.1039/D0RA00277A.

Cómo citar este artículo:

Treviño Rodríguez, V. D., Carrillo Pedroza, F. R., Soria Aguilar, M. de J., & Aguilera-González, E. N. (2025). Extracción de zinc: procesos para obtener este metal esencial. *EPISTEMUS*, 19(38), e3813409. <https://doi.org/10.36790/epistemus.v19i38.409>

