

DEL LODO AL METAL

CÓMO EXTRAER ESTAÑO DE RESIDUOS DE ACERO DE FORMA SOSTENIBLE

FROM SLUDGE TO METAL

HOW TO SUSTAINABLY EXTRACT TIN FROM STEEL WASTE

RODRÍGUEZ TORRES, Isela Jocelín ¹

GONZÁLEZ DE LA CRUZ, José
Manuel²

PUENTE SILLER, Damaris Margarita ²

FUENTES ACEITUNO, Juan Carlos ³

RESUMEN

La industria siderúrgica global enfrenta el desafío dual de gestionar sus residuos y asegurar el suministro de metales críticos. Los lodos y polvos de acería, considerados tradicionalmente un pasivo ambiental, contienen cantidades significativas de estaño, un metal cuya presencia es perjudicial para el acero reciclado, pero de alto valor estratégico. Este artículo revisa las rutas tecnológicas emergentes para la recuperación sostenible de estaño a partir de estos flujos de desecho, con especial énfasis en los procesos hidrometalúrgicos. Métodos como la lixiviación selectiva seguida de electro-obtención se presentan como alternativas prometedoras a la pirometalurgia convencional, debido a su menor consumo energético, mayor selectividad y potencial de integración en un modelo de economía circular. La implementación de estas tecnologías no solo mitiga el impacto ambiental de los residuos, sino que también contribuye a una cadena de suministro de estaño más resiliente y circular.

Palabras clave: estaño; metalurgia sostenible; economía circular; lixiviación; electrodeposición.

ABSTRACT

The global steel industry faces the dual challenge of managing its waste and securing the supply of critical metals. Steelmaking sludges and dusts, traditionally considered an environmental liability, contain significant amounts of tin, a metal whose presence is detrimental to recycled steel but of high strategic value. This article reviews emerging

1. Facultad de Metalurgia,
Universidad Autónoma de
Coahuila, Monclova, Coahuila,
México.

1. Instituto Tecnológico Superior de
Monclova, Tecnológico Nacional
de México, Monclova, Coahuila,
México.

2. Centro de Investigación y de
Estudios Avanzados del Instituto
Politécnico Nacional, Unidad
Saltillo, Ramos Arizpe, Coahuila,
México.

Correspondencia
rodriguezisela@uadec.edu.mx
<https://orcid.org/0009-0003-6455-8249>

Fecha de recepción
13 de noviembre de 2025.

Fecha de aceptación
12 de febrero de 2025.

technological routes for the sustainable recovery of tin from these waste streams, with special emphasis on hydrometallurgical processes. Methods such as selective leaching followed by electrowinning are presented as promising alternatives to conventional pyrometallurgy, due to their lower energy consumption, higher selectivity, and potential for integration into a circular economy model. The implementation of these technologies not only mitigates the environmental impact of waste but also contributes to a more resilient and circular tin supply chain.

Keywords: tin; sustainable metallurgy; circular economy; leaching; electrodeposition.

INTRODUCCIÓN

El estaño (Sn) constituye un elemento metálico estratégico que presenta una paradoja fundamental en la industria moderna: mientras su demanda crece en aplicaciones tecnológicas avanzadas, su presencia como impureza en procesos de reciclaje siderúrgico genera desafíos técnicos significativos. Esta dualidad se acentúa en el contexto de la economía circular, donde la recuperación eficiente de estaño desde residuos industriales emerge como una necesidad tanto ambiental como económica (European Commission, 2023). La Figura 1, muestra una imagen correspondiente al mineral de estaño, la cual ha sido reportada por el Servicio Geológico Mexicano en 2024.



Figura 1. Representación del mineral de Estaño. (Servicio Geológico Mexicano 2024).

El estaño es un metal estratégico con aplicaciones industriales muy diversas que lo convierten en un recurso de alto valor económico y tecnológico. Se utiliza ampliamente en la fabricación de soldaduras para la electrónica y la microelectrónica, debido a su baja toxicidad relativa y excelente conductividad eléctrica (Miyao & Ohno, 2020).

Además, se aplica en revestimientos anticorrosivos, aleaciones de bronce y latón, y en componentes de baterías de alto rendimiento, lo que refuerza su papel en sectores emergentes como las energías renovables y la movilidad eléctrica (Zhang y col., 2022). La recuperación de estaño a partir de residuos de acero, como lodos o escorias, ofrece ventajas ambientales y económicas significativas. En primer lugar, reduce la necesidad de minería primaria, disminuyendo la degradación del suelo, la emisión de gases de efecto invernadero y el consumo de energía asociado a la extracción convencional (Kumar y col., 2021). En segundo lugar, la obtención de estaño como recurso secundario contribuye a una gestión más sostenible de residuos industriales, minimizando su volumen y toxicidad en vertederos y promoviendo una economía circular dentro de la industria siderúrgica (Singh & Mehra, 2019).

Finalmente, la reutilización de estaño recuperado en procesos industriales puede disminuir la dependencia de proveedores externos y mitigar la volatilidad de precios internacionales, fortaleciendo la seguridad de suministro y competitividad de las cadenas productivas (OECD, 2023).

La industria siderúrgica constituye un pilar fundamental de la economía global, con una producción que superó los 1,85 mil millones de toneladas métricas en 2023 (World Steel Association, 2024). Sin embargo, esta actividad industrial genera significativos volúmenes de residuos que representan un creciente desafío ambiental. Entre estos subproductos, los lodos de acería emergen como un material particularmente problemático debido a su composición compleja y potencial de contaminación.

Los lodos se producen principalmente en los sistemas de tratamiento de aguas residuales de las acerías, donde capturan partículas finas y compuestos metálicos provenientes de los procesos de producción. Según estimaciones recientes, por cada tonelada de acero producida mediante horno de oxígeno básico (BOF) se generan entre 8-12 kg de lodos, mientras que en la ruta del horno de arco eléctrico (EAF) esta cifra oscila entre 15-25 kg (Zhang y col., 2022).

La composición química de estos lodos refleja la naturaleza de las materias primas utilizadas, mostrando variaciones significativas entre instalaciones. No obstante, su perfil típico incluye:



Tabla 1. Composición química de lodos producidos por la industria siderúrgica (Zhang y col., 2022).

	Fórmula química	%
Óxidos de hierro	Fe_2O_3	40-60%
Calcio	CaO	5-15%
Zinc	Zn	0.5-5%
Estaño	Sn	0.1-2%
Plomo	Pb	0.1-1%
Sílice	SiO_2	2-8%

La presencia de metales potencialmente tóxicos, incluidos zinc, plomo y estaño, clasifica a estos lodos como residuos peligrosos en numerosas jurisdicciones (Salihoglu, 2008). Su disposición en vertederos especializados implica costos considerables y riesgos de lixiviación a largo plazo, generando pasivos ambientales persistentes.

Paradójicamente, esta problemática encierra una oportunidad estratégica. El contenido de metales no ferrosos, particularmente el estaño, representa un recurso valorizable en el contexto de la economía circular. El estaño, clasificado como metal crítico por la Unión Europea (Comisión Europea, 2023), alcanza concentraciones económicamente atractivas en estos residuos, variando entre 0.3-1.5 % en lodos de BOF y 0.2-0.8 % en aquellos provenientes de EAF.

METODOLOGÍA

Este artículo se desarrolla como una revisión sistemática narrativa de la literatura científica y técnica reciente, centrada en los procesos de extracción y recuperación de estaño a partir de residuos de la industria del acero, como los lodos y polvos de horno de arco eléctrico. El objetivo es cartografiar el panorama actual de las tecnologías disponibles, identificando y contrastando

las técnicas convencionales con los enfoques innovadores y emergentes. Se realiza una evaluación crítica de cada método, analizando su eficiencia de recuperación, su viabilidad económica y, fundamentalmente, su alineación con los principios de la economía circular y la química verde con el fin de destacar las rutas más sostenibles.

CLASIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS MÉTODOS

Los métodos identificados se clasificaron en dos grandes categorías: pirometalurgia e hidrometalurgia, con una subclasificación en convencionales y emergentes/verdes. El análisis se centró en extraer datos de la literatura científica sobre:

- Eficiencia de extracción: porcentaje de Sn recuperado del residuo.
- Condiciones operativas: temperatura, pH, concentración de reactivos.
- Consumo energético: estimación cualitativa (alto/medio/bajo).
- Impacto ambiental: naturaleza y toxicidad de los insumos y efluentes.
- Nivel de madurez tecnológica (TRL): Escala de laboratorio (TRL 1-4), piloto (TRL 5-7) o industrial (TRL 8-9).

Tipos de métodos y sus aplicaciones

El análisis de la literatura permitió identificar y caracterizar las siguientes técnicas, cuyas aplicaciones prácticas son cruciales para el reciclaje de estaño.

1.1 Métodos pirometalúrgicos

La transformación de residuos que contienen estaño mediante procesos térmicos constituye un enfoque tradicional. Estas técnicas, aunque tecnológicamente maduras, presentan importantes retos ambientales debido a las altas temperaturas requeridas y a la generación de emisiones gaseosas.

- Fumación o volatilización: consiste en calentar los residuos (p. ej., lodos de acería) a temperaturas superiores a 1200 °C en un ambiente reductor, lo que volatiliza los óxidos de estaño para luego condensarlos y obtener un concentrado. Su aplicación principal es el tratamiento inicial de residuos de baja ley. Sin embargo, el alto consumo energético y la necesidad de controlar las emisiones de polvo representan un costo operativo y ambiental significativo (Pickles y col., 2020; Guzman y col., 2022).

- Reducción carbotérmica: Involucra la fundición del residuo con un agente reductor como el coque a altas temperaturas para reducir los óxidos de estaño a metal. Se aplica para la producción directa de estaño metálico o aleaciones, pero es intensiva en energía y genera escorias y emisiones de CO_2 .

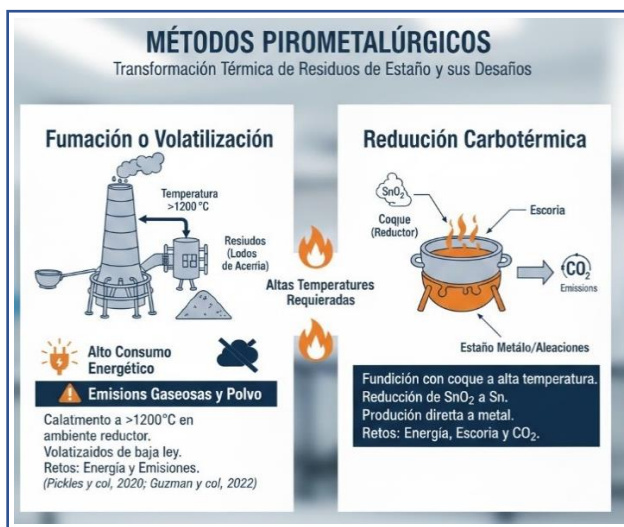


Figura 2. Esquema de Métodos Pirometalúrgicos para la Recuperación de Estaño: Procesos y Consideraciones Ambientales.

1.2 Métodos hidrometalúrgicos

Dentro de las alternativas a los procesos térmicos, los métodos hidrometalúrgicos han ganado relevancia por su potencial para reducir el impacto ambiental. A continuación, se detallan los principales enfoques identificados, con énfasis en lixiviantes sostenibles.

Tabla 2. Evaluación de lixiviantes alternativos y sostenibles para la extracción de estaño.

Referencias	Método (lixiviente)	Mecanismo/ condiciones	Aplicación y eficiencia	Sostenibilidad y limitaciones
(Li y col., 2021; Tanvar & Dhawan, 2022).	Ácido cítrico	Forma complejos solubles con Sn en condiciones suaves (pH ácido, T medio).	Ideal para procesos de bajo impacto ambiental.	Ventaja: Biodegradable, baja toxicidad. Limitación: Cinética más lenta.
(Ahtiainen y col., 2020; Zhang y col., 2023).	Tiosulfato ($S_2O_3^{2-}$)	Forma complejos con Sn, usualmente con Cu^{2+} como oxidante/catalizador.	Alto potencial para residuos electrónicos; alta selectividad	Ventaja: Alternativa no tóxica al cianuro. Limitación: Solución inestable, alto consumo de reactivos.
(Petrus y col., 2021; Bevers y col., 2024).	Tiocianato (SCN^-)	Forma complejos estables de tiocianato de estaño en medio ácido.	Extracción eficiente de fuentes secundarias complejas.	Ventaja: Alta eficiencia y selectividad. Limitación: Toxicidad y corrosividad del lixivante

MÉTODOS DE PURIFICACIÓN Y REFINACIÓN

Una vez obtenidas las soluciones enriquecidas con estaño mediante los procesos de lixiviación, es necesario implementar técnicas eficaces para aislar y purificar el metal.

- **Precipitación por cementación:** Utiliza polvo de aluminio o zinc para desplazar y precipitar el estaño de sus soluciones lixiviadas. Es una técnica simple y de bajo costo, ampliamente aplicada en la industria, pero el estaño producido (cemento) suele requerir una refinación posterior debido a su baja pureza.
- **Electro-obtención (EO):** Técnica electroquímica clave para producir estaño metálico de alta pureza (>99.5 %) directamente desde la solución lixiviada y purificada. Los fundamentos de estos procesos convencionales han sido ampliamente documentados. Las aplicaciones de vanguardia buscan optimizar los electrolitos para mejorar la eficiencia energética y la morfología del depósito, utilizando sistemas más benignos que los electrolitos ácidos tradicionales (Zhang, B. y col., 2024).

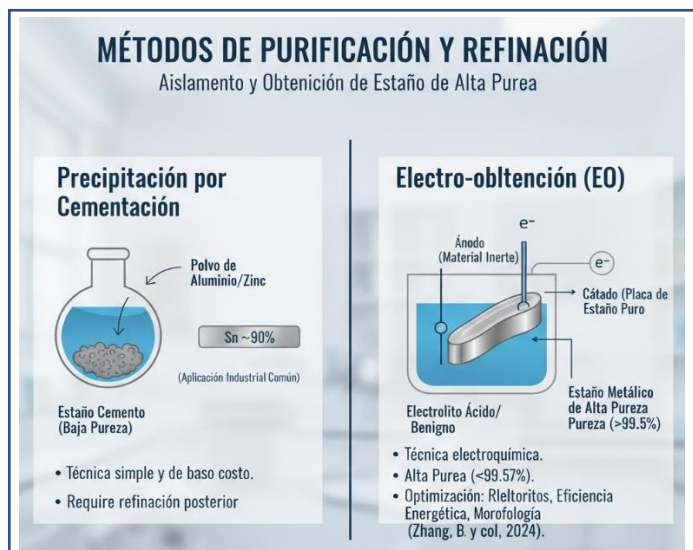


Figura 3. Métodos de Purificación y Refinación de Estaño: De la Solución al Metal Puro.

MÉTODOS DE APOYO Y CARACTERIZACIÓN

Para complementar y optimizar los procesos de extracción y refinación, se han desarrollado diversas metodologías de análisis y caracterización.

- **Análisis de ciclo de vida (ACV):** No es un método de extracción, pero es una herramienta analítica crítica. Se aplica para cuantificar y comparar el impacto ambiental total de las diferentes rutas tecnológicas, desde el residuo hasta el metal final, proporcionando una base objetiva para la toma de decisiones hacia la sostenibilidad (Guzman y col., 2022).
- **Técnicas de caracterización:** El uso de microscopía electrónica de barrido (SEM), difracción de rayos X (XRD) y espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS) es fundamental para comprender los mecanismos de lixiviación, la morfología de los productos y las propiedades superficiales de los residuos y productos intermedios, guiando la optimización de los procesos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis sistemático de la literatura revela un panorama tecnológico en evolución para la recuperación de estaño a partir de residuos de acería, caracterizado por una clara dicotomía entre los métodos establecidos y las alternativas emergentes. Los resultados se presentan y discuten en función de las categorías metodológicas analizadas.

EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LAS RUTAS PRINCIPALES

Pirometalurgia vs. Hidrometalurgia

La comparación entre las rutas pirometalúrgicas e hidrometalúrgicas pone de manifiesto una compensación fundamental entre la madurez tecnológica y la sostenibilidad ambiental.

Los métodos pirometalúrgicos, como la fumación y la reducción carbotérmica, demuestran una alta eficiencia en la recuperación de estaño y su implementación a escala industrial está consolidada (TRL 8-9). Sin embargo, los resultados confirman que esta eficacia tiene un costo ambiental significativo. El consumo energético es inherentemente alto debido a las temperaturas que superan los 1200 °C, y los procesos generan inevitablemente emisiones gaseosas y residuos sólidos como escorias, que requieren una gestión y disposición final cuidadosa (Pickles y col., 2020; Guzman y col., 2022). Esta ruta, aunque robusta, se contrapone a los principios de la economía circular al ser intensiva en recursos y generadora de nuevos flujos de residuos.

En contraste, la hidrometalurgia emerge como una familia de técnicas con un perfil de sostenibilidad inherentemente más favorable. Su principal ventaja radica en la capacidad de operar a temperaturas cercanas a temperatura ambiente, lo que se traduce en un consumo energético significativamente menor. Además, permiten un control más preciso sobre el proceso, facilitando la separación selectiva del estaño de la matriz de óxido de hierro, lo que es técnicamente complejo mediante rutas térmicas. No obstante, el análisis revela que la mayoría de estas técnicas se encuentran en etapas de desarrollo menos maduras (TRL 4-7), y su viabilidad económica a gran escala aún debe ser demostrada de manera más contundente (Ahtiainen y col., 2020; Li y col., 2021).



EL POTENCIAL DE LOS LIXIVIANTE VERDES PARA UNA RECUPERACIÓN SOSTENIBLE

Dentro del ámbito hidrometalúrgico, los resultados destacan el notable potencial de los agentes lixiviantes no convencionales, como el ácido cítrico, el tiosulfato y el tiocianato, para redefinir la sostenibilidad en la recuperación de metales.

El ácido cítrico se posiciona como un agente particularmente prometedor debido a su naturaleza biodegradable y baja toxicidad. Los estudios revisados, como el de (Li y col., 2021), reportan eficiencias de lixiviación notables bajo condiciones operativas suaves. La discusión en torno a este método se centra en su mecanismo de acción, donde el ácido cítrico actúa no solo como un acidificante, sino también como un agente complejante, formando complejos estables con los iones de estaño que favorecen su disolución. La principal limitación, una cinética más lenta en comparación con los ácidos minerales, abre una línea de investigación crucial para la optimización del proceso mediante catalizadores o la aplicación de ultrasonido.

Por otro lado, el tiosulfato se consolida como la alternativa más viable y ampliamente investigada para reemplazar a los lixiviantes cianurados en el tratamiento de residuos electrónicos. Su principal ventaja, confirmada en los resultados, es su baja toxicidad y su alta selectividad. Sin embargo, la discusión debe enfatizar el desafío de la estabilidad de la solución de tiosulfato, la cual puede sufrir descomposición termodinámica, generando un alto consumo de reactivos y a la formación de productos de descomposición que pueden interferir en la lixiviación y las etapas posteriores (Zhang y col., 2023). La adición de iones cúpricos como catalizador oxidante es una estrategia común, pero introduce la complejidad de gestionar otro metal en el circuito.

El tiocianato, aunque menos explorado, muestra una alta eficiencia en la formación de complejos muy estables con el estaño. La discusión aquí debe ser cautelosa; a pesar de su efectividad, la toxicidad inherente del ion tiocianato representa un riesgo ambiental y ocupacional que no puede ser subestimado (Bever y col., 2024). Su aplicación probablemente estaría condicionada a sistemas de circuito cerrado con una gestión rigurosa de los efluentes, lo que podría incrementar los costos de operación y limitar su

atractivo como una opción "verde" en comparación con el ácido cítrico o el tiosulfato.

INTEGRACIÓN DE PROCESOS Y EVALUACIÓN DEL CICLO DE VIDA

La discusión no estaría completa sin considerar la integración de las etapas de lixiviación y refinación. Los resultados indican que la electro-obtención (EO) es la técnica de purificación más adecuada para acoplarse a los lixiviantes verdes, ya que permite la producción directa de metal de alta pureza a partir de las soluciones lixiviadas. Los avances recientes se orientan a la formulación de electrolitos más benignos, que mejoren la eficiencia energética y la morfología del depósito de estaño, superando los inconvenientes de los electrolitos ácidos tradicionales (Zhang, B. y col., 2024).

Finalmente, la herramienta del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) proporciona el marco objetivo para esta discusión. El estudio de Guzman y col. (2022) es ilustrativo, ya que cuantifica cómo, a pesar de una posible menor eficiencia en algunas rutas hidrometalúrgicas, su perfil ambiental general —especialmente en términos de huella de carbono y potencial de eutrofización— puede ser significativamente mejor que el de las rutas pirometalúrgicas. Esto subraya que la "sostenibilidad" no es una métrica unidimensional (la eficiencia de recuperación), sino un balance multivariable que incluye el consumo de energía, la generación de residuos y la toxicidad de los insumos.

CONCLUSIONES

Este análisis pone en evidencia que la transición hacia una recuperación sostenible de estaño a partir de residuos de acería es técnicamente viable, con la hidrometalurgia emergiendo como la ruta más prometedora. Frente a los métodos pirometalúrgicos, intensivos en energía y generadores de significativos impactos ambientales, los procesos hidrometalúrgicos, especialmente aquellos que emplean lixiviantes verdes como el ácido cítrico y el tiosulfato, ofrecen un perfil de sostenibilidad notablemente mejorado. Estos

agentes permiten la lixiviación selectiva del estaño en condiciones operativas suaves (como temperaturas cercanas al ambiente, presiones atmosféricas y concentraciones moderadas de reactivo), minimizando la generación de emisiones tóxicas y alineándose con los principios de la química verde y la economía circular. Sin embargo, debido a que la madurez tecnológica de estas alternativas aún es limitada, y su escalamiento industrial enfrenta el desafío dual de optimizar la cinética de reacción y demostrar su viabilidad económica en un contexto competitivo, es importante el desarrollo de investigaciones que generen conocimiento sobre el aprovechamiento de residuos industriales que contengan estaño.

TENDENCIAS FUTURAS

Con base en los hallazgos de esta revisión, se identifican varias líneas de investigación y desarrollo cruciales para el futuro del sector:

1. Optimización y sinergia de lixiviantes: Se prevé una investigación intensiva dirigida a superar las limitaciones de los lixiviantes verdes. Esto incluye el desarrollo de coadyuvantes o catalizadores para acelerar la cinética del ácido cítrico y la formulación de estabilizadores para prevenir la descomposición del tiosulfato. Una tendencia clave será el diseño de sistemas lixiviantes mixtos o en etapas que combinen las ventajas de varios reactivos (por ejemplo, un pre-tratamiento con un ácido orgánico suave seguido de una lixiviación con tiosulfato) para maximizar la eficiencia y selectividad.
2. Avances en la purificación sostenible: La integración eficiente de la etapa de refinación es fundamental. Las investigaciones futuras se centrarán en el desarrollo de electrolitos avanzados para la electro-obtención que sean no corrosivos, de alta conductividad y que permitan la deposición de estaño con una morfología uniforme y alta pureza, minimizando el consumo energético. La exploración de técnicas alternativas, como la precipitación selectiva con ligandos verdes o la separación por membranas, también ganará relevancia.
3. Intensificación de procesos y digitalización: La aplicación de tecnologías de intensificación de procesos, como la lixiviación asistida por microondas o ultrasonido, podría revolucionar la cinética de extracción, reduciendo drásticamente los tiempos de reacción y el consumo de reactivos. Paralelamente, la implementación de herramientas de modelado digital machine learning y análisis de big

data permitirá optimizar los parámetros operativos, predecir el comportamiento de los residuos y diseñar plantas de reciclaje más eficientes y adaptables. Enfoque en la economía circular integral: El futuro no reside únicamente en extraer estaño, sino en valorizar todos los componentes del residuo. Las tendencias apuntan hacia el diseño de procesos de "cero residuos" o "biorrefinerías de residuos", donde, después de la extracción del estaño, la matriz de óxido de hierro restante sea aprovechada en la fabricación de cementos, cerámicas o como pigmento, cerrando completamente el ciclo de los materiales.

4. Desarrollo de marcos normativos e incentivos: La transición a gran escala requerirá de políticas públicas que incentiven la valorización de residuos sobre su disposición final. La futura legislación, basada en evidencia científica como la generada por los Análisis de Ciclo de Vida, podría incluir impuestos a las emisiones de carbono o créditos verdes para aquellos productores que implementen tecnologías de recuperación sostenible, acelerando la adopción industrial de estas prácticas.

En definitiva, el camino "del lodo al metal" está siendo redefinido por la innovación científica. La tendencia futura es clara: se transita desde procesos lineales de alto impacto hacia sistemas circulares, inteligentes y ambientalmente responsables, donde la recuperación de metales como el estaño se convierte en un pilar fundamental de una industria metalúrgica sostenible.

AGRADECIMIENTOS

Isela Jocelín Rodríguez Torres desea expresar su agradecimiento a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación de México (SECIHTI) y a la Universidad Autónoma de Coahuila por el respaldo financiero e institucional recibido para la elaboración de este artículo de revisión, que es parte de su proyecto de investigación sobre la recuperación de metales valiosos a partir de residuos industriales mediante técnicas hidrometalúrgicas sostenibles.



CienciAcierta

REFERENCIAS

- Ahtiainen, R., Lundström, M., & Liipo, J. (2020). Tin leaching from printed circuit boards using ammoniacal thiosulfate solutions. *Minerals Engineering*, 145: 106070. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106070>
- Beyers, S., Van Petegem, S., & Spooren, J. (2024). Thiocyanate leaching of critical metals from secondary sources: A review. *Hydrometallurgy*, 225: 106265. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2024.106265>
- European Commission. (2023). Study on the critical raw materials for the EU – 2023 final report. Publications Office of the European Union. https://single-market-economy.ec.europa.eu/publications/study-critical-raw-materials-eu-2023-final-report_en
- Euroslag. (2022). Status and prospects of iron and steel slag application in Europe. <https://www.euroslag.com/publications/>
- Guzman, S., Morales, A., & Torres, R. (2022). Life cycle assessment of pyrometallurgical and hydrometallurgical tin recovery from steelmaking wastes. *Resources, Conservation and Recycling*, 176: 105945. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105945>
- Kumar, R., Patel, A., & Singh, D. (2021). Recovery of tin from steel scrap and industrial waste: Environmental and economic perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 290: 125790.
- Li, J., Gao, L., & Wang, H. (2021). Leaching of tin from steel waste using oxalic acid and hydrogen peroxide: Mechanism and kinetics. *Hydrometallurgy*, 205: 105720. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105720>
- Miyao, S., & Ohno, M. (2020). Applications of tin and tin alloys in electronic packaging and soldering technologies. *Journal of Materials Science and Engineering*, 12(3): 145–159.
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2023). Global outlook on critical raw materials: Resilience through diversification. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/12345678-en>
- Petrus, H. T. B. M., Setiawan, A., & Perdana, I. (2021). Tin extraction from electronic waste using acidic thiocyanate leachant. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1143(1): 012033. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1143/1/012033>
- Pickles, C. A., Marzoughi, T., & Akbar Rhamdhani, M. (2020). Thermodynamic analysis of the vaporization of tin from electric arc furnace dust. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 51(2): 589–603. <https://doi.org/10.1007/s11663-020-01785-0>

- Secretariat of the Basel Convention. (2014). Guidance on environmentally sound management of wastes consisting of, containing or contaminated with metals. United Nations Environment Programme. <https://www.basel.int/>
- Servicio Geológico Mexicano. (s. f.). Estano. México Minero. Recuperado el 22 de mayo de 2024, de <https://mexicominero.org/tipos-de-minerales/estano-nuevo/>
- Singh, P., & Mehra, A. (2019). Secondary resources for critical metals: A review of sustainable recovery practices. *Environmental Technology Reviews*, 8(1): 37–54.
- Tanvar, H., & Dhawan, N. (2022). Alkaline leaching of tin from waste steelmaking dust for its recovery as nano-SnO₂. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3): 107567. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107567>
- World Steel Association. (2024). World steel in figures 2024. <https://worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/World-Steel-in-Figures/>
- Zhang, B., Chen, Y., & Li, W. (2024). Eco-friendly electrodeposition of high-purity tin from a sulfuric acid system with non-toxic additives. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 952: 117987. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2023.117987>
- Zhang, B., Wang, J., & Li, Z. (2022). Comprehensive characterization and strategic utilization of steelmaking sludges. *Journal of Cleaner Production*, 345: 131128. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131128>
- Zhang, X., Li, Y., & Chen, J. (2022). Sustainable sourcing and applications of tin: Advances and challenges. *Resources, Conservation and Recycling*, 178: 105952.
- Zhang, Y., Li, H., & Wang, C. (2023). Sustainable recovery of tin from waste printed circuit boards using choline chloride-based deep eutectic solvents. *Waste Management*, 157: 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.11.040>