

Minería del futuro



SUMARIO

DIRECTOR ISDE
IDAEL LA O FLO

REDACCIÓN
SARAI ORTA PUGA

DISEÑO Y REALIZACIÓN
ONIEL S. GUTIÉRREZ REYES

WEBMASTER
ISNEY SUSANA HERRERA HERNÁNDEZ
ONIEL S. GUTIÉRREZ REYES

CONTACTOS
Empresa de Ingeniería del Reciclaje
Calle Zapata #1558 e/ Paseo y 2. Vedado.
Plaza de la Revolución. Cuba
observatorio@isde.co.cu
observatorio.reciclaje.cu

**Metodología para la
recuperación de ma-
teriales críticos en
residuos electrónicos**

03

15

**Estrategias Globales:
Maximizar la eficien-
cia en el reciclaje de
envases plásticos**

Metodología para la recuperación de materiales críticos en residuos electrónicos

(Segunda Parte)



Hidrometalurgia: Precisión y eficiencia en la recuperación de metales

La hidrometalurgia es una técnica basada en procesos químicos que utiliza soluciones acuosas para disolver y recuperar metales de matrices complejas como baterías y placas de circuito impreso (PCBs).

La hidrometalurgia ha emergido como una de las tecnologías más prometedoras para la recuperación de metales valiosos a partir de residuos electrónicos, destacando por su selectividad y menor impacto ambiental en comparación con los métodos pirometalúrgicos. Esta tecnología se basa en la utilización de soluciones acuosas, ácidas o básicas, para disolver selectivamente los metales de interés mediante procesos de lixiviación. Los procesos hidrometalúrgicos comprenden varias etapas secuenciales: pretratamiento físico de los residuos,

lixiviación química para solubilizar los metales, separación de impurezas, concentración y purificación de los metales de interés, y finalmente recuperación del metal en forma sólida.

La eficiencia del proceso depende de factores críticos como la concentración del agente lixivante, temperatura, tiempo de reacción y relación sólido/líquido, los cuales deben ser optimizados para cada tipo específico de residuo.

En el caso particular de las baterías ion-litio, estudios recientes han demostrado la viabilidad técnica de la recuperación de litio y cobalto mediante lixiviación con ácido cítrico.

La utilización de ácidos orgánicos como el cítrico representa una alternativa más sostenible frente a los ácidos minerales convencionales, reduciendo los impactos ambientales asociados al proceso. Esta aproximación se alinea con los

principios de la química verde y contribuye a la sostenibilidad global del sistema de reciclaje de RAEE.

Estos resultados evidencian el potencial de la hidrometalurgia para la recuperación eficiente de metales estratégicos a partir de residuos electrónicos complejos. Entre sus principales ventajas destacan:

- **Baja temperatura de operación:** Requiere menos energía que la pirometalurgia, reduciendo la huella de carbono.
- **Alta selectividad:** Permite la recuperación específica de metales como Li, Co y Au mediante la optimización de reactivos y condiciones de proceso.

Estudios recientes han demostrado efi-

ciencias de alta recuperación para cobalto y litio utilizando ácidos orgánicos como el ácido cítrico, málico y aspártico, en combinación con peróxido de hidrógeno como agente oxidante.

Por ejemplo, bajo condiciones óptimas (2 mol/L de ácido cítrico, 80 °C, 120 minutos), se han alcanzado tasas de lixiviación de hasta 80,49% para litio y 76,70% para cobalto en baterías de ion-litio usadas.

La hidrometalurgia también se ha adaptado para la recuperación de oro de PCBs, utilizando soluciones iónicas y técnicas de precipitación selectiva, logrando eficiencias superiores al 95% en algunos procesos patentados recientemente (INAPI, 2023).

Hidrometalurgia: innovación patentada para la recuperación sostenible de litio

La hidrometalurgia se ha consolidado como una tecnología clave para la recuperación selectiva de metales críticos en residuos electrónicos. Este método utiliza soluciones químicas para disolver y extraer metales como litio y cobalto de baterías agotadas con alta eficiencia y menor impacto ambiental que los procesos pirometalúrgicos tradicionales.

La creciente demanda de litio, impulsada por la transición energética y la expansión del mercado de baterías de ion-litio, ha catalizado importantes avances en tecnologías de recuperación, particularmente en procesos hidrometalúrgicos. Estos se destacan por su capacidad de extraer metales



VENTAJAS DE LA HIDROMETALURGIA

Beneficios en la extracción de metales



Mayor flexibilidad

Permite procesar minerales de baja ley y mezclas complejas



Menor consumo de energía

Los procesos acuosos suelen ser menos intensivos en energía



Producción de metales puros

Menores impurezas en los metales obtenidos



Menor impacto ambiental

Utiliza temperaturas bajas y produce menos emisiones

Ejemplo: Extracción de cobre usando ácido sulfúrico



críticos a partir de fuentes secundarias —como baterías agotadas— con una menor huella ambiental, en comparación con métodos tradicionales.

1. Fundamentos de la hidrometalurgia del litio

La hidrometalurgia es una técnica metalúrgica basada en el uso de soluciones acuosas para disolver, separar y purificar metales valiosos. En el caso del litio, el proceso incluye:

- Lixiviación: extracción de litio en fase líquida mediante reactivos ácidos (H_2SO_4 , HCl) o alcalinos.
- Separación de impurezas: como aluminio, cobre o manganeso.
- Precipitación o cristalización: para obtener carbonato u otros compuestos de litio de alta pureza.

“ ...La hidrometalurgia se ha adaptado a la recuperación de oro de PCBs...”

Este método se aplica tanto al reciclaje de baterías de ion-litio, como a la extracción de litio desde recursos no convencionales, como arcillas, granitos o salmueras geotermales.

2. Innovación técnica y patentes recientes

Empresas como GUANGDONG BRUNP RECYCLING TECHNOLOGY CO., LTD. y HUNAN BRUNP RECYCLING TECHNOLOGY CO., LTD. han liderado avances

significativos a través de tecnologías patentadas que integran:

- Procesos de lixiviación selectiva y de bajo impacto ambiental.
- Sistemas de regeneración y reutilización de reactivos químicos.
- Recuperación simultánea de litio, cobalto, níquel y manganeso.



Una manera eficiente de gestionar tus residuos



Si tienes residuos en casa o en tu centro de trabajo y no sabes que hacer con ellos o no tienes tiempo. Reciklando es la solución. Nos encargamos de tus residuos y te ofrecemos un pago por ello.



<http://reciklando.reciclaje.eu>

<https://apklis.eu/application/com.isde.reciklando>

Entre las solicitudes más destacadas se encuentran las patentes:

- ES 202390158: Recuperación de litio y cobalto desde óxidos metálicos con mínima generación de residuos.
- MX 2023014184 y ES 202390060: Procedimientos húmedos que optimizan el uso de energía y mejoran la pureza del litio recuperado.

Estas innovaciones permiten eficiencias de recuperación superiores al 90% y se alinean con los principios de la economía circular en la cadena de suministro de baterías.

3. Investigaciones internacionales: panorama geográfico

Europa

Francia, a través de Recupyl y el proyecto Lithorec II (Alemania), también ha explorado la lixiviación con solventes orgánicos y agentes más benignos con el medio ambiente.

América Latina

En el triángulo del litio (Argentina, Bolivia, Chile), se investiga la hidrometalurgia como alternativa sostenible a la evaporación solar en salmueras, debido a su menor consumo de agua y tiempo de proceso. En particular:

- CONICET (Argentina) ha desarrollado tecnologías de extracción directa de litio desde salmueras con resinas selectivas y procesos acuosos.
- En Chile, universidades como la Pontificia Universidad Católica de Chile han estudiado procesos de lixiviación con ácido sulfúrico para la recuperación eficiente de litio desde minerales de espodumena y lepidolita.

Norteamérica

La empresa Li-Cycle (Canadá) ha paten-

tado un sistema de "reciclaje húmedo" llamado Spoke & Hub, basado en la hidrometalurgia sin fundición, que permite la recuperación de hasta el 95% del litio y otros metales.

Asia

En China, país líder en procesamiento de litio, universidades como Tsinghua University y empresas como CATL y GEM Co. Ltd. colaboran activamente en el desarrollo de técnicas hidrometalúrgicas de circuito cerrado, impulsadas por la necesidad de autosuficiencia en materiales críticos.

4. Impacto ambiental y ventajas comparativas

Los procesos hidrometalúrgicos destacan por su menor huella de carbono y su capacidad de operar a temperaturas más bajas en comparación con técnicas pirometalúrgicas. Sus principales beneficios incluyen:

IMPACTO AMBIENTAL Y VENTAJAS COMPARATIVAS

Los procesos hidrometalúrgicos destacan por su menor huella de carbono y su capacidad de operar a temperaturas más bajas en comparación con técnicas pirometalúrgicas.

Sus principales beneficios incluyen:

- Reducción del uso de energía y reactivos agresivos.**
- Posibilidad de integración en sistemas de reciclaje circular.**
- Adaptabilidad a diferentes fuentes de litio (primarias y secundarias).**
- Alto grado de pureza en los productos finales.**

Ejemplo: Extracción de cobre usando ácido sulfúrico

- Reducción del uso de energía y reactivos agresivos.
- Posibilidad de integración en sistemas de reciclaje circular.
- Adaptabilidad a diferentes fuentes de litio (primarias y secundarias).
- Alto grado de pureza en los productos finales.

Estas características convierten a la hidrometalurgia en una tecnología estratégica para la transición energética, compatible con los objetivos de sostenibilidad y soberanía tecnológica en múltiples regiones.

La hidrometalurgia para la recuperación de litio ha dejado de ser una opción experimental para convertirse en una solución viable, patentada y en expansión industrial, con aplicaciones globales. Desde Asia hasta Europa y América Latina, la innovación se orienta a mejorar la eficiencia, reducir el impacto ambiental y cerrar el ciclo de vida de las baterías de ion-litio, abriendo paso a un nuevo paradigma de reciclaje sostenible de materiales críticos.

Biolixiviación: biotecnología aplicada a la minería urbana y reciclaje avanzado

La biolixiviación es una tecnología emergente que aplica microorganismos especializados para extraer metales valiosos desde materiales sólidos, como minerales o residuos electrónicos. Esta técnica, proveniente de la biohidrometalurgia, ha cobrado creciente interés como una estrategia sustentable para la minería urbana, es decir, el aprovechamiento de metales presentes en residuos tecnológicos, como baterías, placas de circuito y dispositivos electrónicos en desuso.

La biolixiviación, también conocida como bioleaching, es un proceso natural en el que ciertos microorganismos —principalmente bacterias quimiolitótrofas como *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans*, o *Acidithiobacillus thiooxidans*— facilitan la disolución de metales mediante reacciones redox. Es-



tas bacterias oxidan compuestos metálicos insolubles a formas solubles en medios ácidos, lo que permite su posterior recuperación desde soluciones líquidas. La biolixiviación representa una innovadora alternativa biotecnológica para la extracción de metales a partir de residuos electrónicos, destacando por su menor impacto ambiental y sostenibilidad en comparación con métodos convencionales. Esta tecnología aprovecha la capacidad metabólica de ciertos microorganismos para catalizar reacciones de oxidación-reducción que facilitan la solubilización de metales.

El proceso se presenta como una herramienta particularmente valiosa en el contexto de la minería urbana, ofreciendo una solución eco-compatible a los desafíos del reciclaje de RAEE.

La biolixiviación ofrece ventajas significativas en términos medioambientales y económicos, como menor consumo energético, reducción de emisiones con-

taminantes y capacidad para procesar residuos de baja ley que no serían económicamente viables mediante otros métodos.

Sin embargo, existen desafíos importantes relacionados con la cinética del proceso, generalmente más lenta que en métodos químicos convencionales, y la necesidad de condiciones controladas para el óptimo crecimiento y actividad microbiana.

El mecanismo de acción de la biolixiviación involucra diversos grupos microbianos, principalmente bacterias que obtienen energía de la oxidación de compuestos inorgánicos como hierro ferroso y compuestos reducidos de azufre.

Estos microorganismos generan ácidos y agentes oxidantes que promueven la solubilización de metales mediante mecanismos directos e indirectos, permitiendo su posterior recuperación mediante técnicas convencionales de separación como extracción por solventes o electro-

deposición.

Biolixiviación: una solución biotecnológica para la minería urbana

1. Aplicación en minería urbana

A diferencia de la lixiviación química convencional, la biolixiviación reduce el uso de reactivos tóxicos (como cianuro o ácido nítrico) y permite operar a temperaturas más bajas y sin presión, lo que disminuye los costos energéticos y el impacto ambiental.

En el contexto de la minería urbana, se aplica principalmente a residuos ricos en metales como:

- Placas de circuito impreso (PCBs) de computadoras y teléfonos móviles.
- Baterías de ion-litio agotadas.
- Residuos de equipos eléctricos y electrónicos (RAEE).

Estudios recientes han mostrado que la biolixiviación puede recuperar eficientemente cobre, níquel, zinc, litio, cobalto y tierras raras, con tasas de recuperación que en algunos casos superan el 90%



BENEFICIOS DE LA MINERÍA URBANA

Ventajas de recuperar metales de desechos electrónicos

Sus principales beneficios incluyen:



Conservación de recursos
Permite reutilizar metales limitados



Impacto ambiental positivo
Reduce las emisiones y el daño ecológico



Reducción de residuos
Disminuye la cantidad de basura
bleciremea



Menor dependencia de la minería tradicional



tras etapas de optimización.

2. Avances en investigación y desarrollo

En distintas regiones del mundo, universidades y centros tecnológicos han impulsado investigaciones en biolixiviación adaptadas al reciclaje de e-waste:

Europa

- El proyecto BIOMOre (Alemania, Polonia) ha explorado la aplicación de biolixiviación a gran escala.
- En España, el Centro Tecnológico CETIM y la Universidad de Santiago de Compostela desarrollan procesos con consorcios microbianos para el reciclaje de metales críticos desde PCBs.

América Latina

- En Perú y Chile, con fuerte experiencia minera, se han desarrollado biorreactores para lixiviar cobre y oro desde minerales sulfurados, con potencial aplicación a residuos electrónicos.
- Brasil ha estudiado el uso de bacterias acidófilas nativas para recuperar metales de teléfonos móviles y componentes electrónicos desechados.

Asia

- En India y China, varios grupos de investigación han combinado biolixiviación con procesos químicos híbridos para mejorar la extracción de metales raros desde RAEE.
- Investigadores de Tsinghua University y Chinese Academy of Sciences han desarrollado cepas modificadas genéticamente para aumentar la eficiencia del proceso y adaptarlo a materiales más complejos.

3. Ventajas de la biolixiviación en minería urbana

- Bajo impacto ambiental: Reduce el uso de agentes tóxicos y la generación de

residuos peligrosos. No requiere temperaturas elevadas ni reactivos altamente contaminantes.

- Alta selectividad y eficiencia en la recuperación de metales valiosos.
- Escalabilidad y modularidad, adaptable a procesos industriales y descentralizados.
- Compatibilidad con economía circular: reduce la dependencia de la minería primaria y disminuye los residuos electrónicos.
- Menor consumo energético: Opera a temperatura ambiente o moderada, disminuyendo los costos energéticos.

4. Limitaciones y desafíos

- Requiere tiempos de proceso más largos que métodos térmicos o químicos.
- Puede presentar dificultades para materiales con revestimientos plásticos o compuestos poliméricos.
- Requiere control biológico estricto del cultivo microbiano, especialmente en condiciones industriales.

La biolixiviación representa una solución biotecnológica limpia, eficiente y adaptable para abordar uno de los mayores retos ambientales de nuestro tiempo: la gestión de residuos electrónicos. Al integrar microbiología, ingeniería ambiental y metalurgia, este enfoque permite recuperar recursos estratégicos desde el desecho, promoviendo una verdadera minería urbana sostenible.

Iniciativas europeas para la recuperación de materiales críticos

La Unión Europea ha impulsado un ambicioso programa de investigación e innovación para desarrollar tecnologías avanzadas de recuperación de materia-

les críticos a través de diversas iniciativas financiadas por el programa Horizon 2020. Estos proyectos abordan la problemática desde diferentes ángulos, combinando experiencias científicas, industriales y normativas para crear soluciones integradas y sostenibles de reciclaje de RAEE y recuperación de materias primas críticas.

El proyecto CEWASTE, destacable entre estas iniciativas, aborda tres desafíos fundamentales: garantizar el acceso sostenible a materias primas críticas para la economía europea, combatir el comercio ilegal de residuos dentro y fuera de la UE, y apoyar el desarrollo de sistemas de reciclaje ambientalmente responsables a nivel global.

Este proyecto desarrolla, valida y lanza un esquema voluntario de certificación para instalaciones de recogida, transporte y tratamiento de residuos que contienen cantidades significativas de materias primas valiosas y críticas, estableciendo estándares de sostenibilidad y trazabilidad que elevan la calidad del sector.

Otros proyectos innovadores incluyen e. THROUGH, que considera los residuos como recursos para recuperar materiales críticos, influyendo en toda la cadena de valor; NEOHIRE, centrado en materiales base de neodimio-hierro-boro, técnicas de fabricación y soluciones de reciclaje para reducir el consumo de tierras raras en imanes permanentes para aplicaciones de energía eólica; y el proyecto EU H2020 TARANTULA, que desarrolla procesos para la recuperación de tungsteno, niobio y tantalio presentes como subproductos en flujos de minería

y procesamiento.

El proyecto CHROMIC merece especial atención por su enfoque en el desarrollo de nuevos procesos para recuperar cromo, vanadio, molibdeno y niobio de residuos industriales mediante combinaciones inteligentes de métodos existentes e innovaciones tecnológicas.

Otro proyecto que se debe mencionar es el proyecto Baco, enfocado en el reciclaje de baterías de ion litio del coche eléctrico y de residuos de aparatos electrónicos y electrónicos (RAEE) a través de un proceso hidrometalúrgico. El proyecto está impulsado por Reydesa Recycling, que forma parte del grupo Otua, y tiene como objetivo conseguir generar una unidad de negocio que recupere litio, cobalto, níquel o manganeso entre otros metales de las baterías, “optimizando en el proceso la proporción recuperada y la pureza de los materiales. El Grupo Otua trabaja para recuperar los materiales de las baterías de ion litio de los vehículos eléctricos, garantizándoles así una segunda vida. Este grupo, se centra en la recuperación de materias primas secundarias y cuenta con toda la cadena en este ámbito, desde una refinería de aluminio hasta un vertedero.

Esta iniciativa ejemplifica el enfoque holístico de la UE hacia la economía circular, buscando maximizar el valor extraído de residuos complejos mediante soluciones técnicamente viables y ambientalmente sostenibles.

El impacto de la minería urbana en la economía circular

La minería urbana, conceptualizada como la recuperación sistemática de materiales valiosos a partir de residuos ge-

nerados en entornos urbanos, representa un pilar fundamental para la transición hacia una economía genuinamente circular. Esta práctica trasciende el simple reciclaje, constituyendo una estrategia integral que reincorpora materiales críticos a las cadenas productivas, reduciendo la dependencia de recursos primarios y minimizando los impactos ambientales asociados a la extracción convencional. En el contexto específico de los residuos electrónicos, la minería urbana adquiere especial relevancia debido a las concentraciones de metales valiosos significativamente superiores a las encontradas en yacimientos naturales. Las placas de circuito impreso pueden contener entre 10 y 30% de cobre, además de otros metales preciosos y críticos, cifras que superan ampliamente las leyes minerales de explotaciones tradicionales. Esta realidad convierte a los RAEE en "minas urbanas" de extraordinario potencial económico, cuyo aprovechamiento requiere tecnologías específicas adaptadas a las características particulares de estos residuos. Los beneficios de la minería urbana trascienden el ámbito puramente económico, extendiendo sus impactos positivos a las esferas ambiental y social. En términos ambientales, la recuperación de metales a partir de RAEE puede reducir significativamente la huella ecológica asociada a la producción de dispositivos electrónicos, disminuyendo emisiones de gases de efecto invernadero, consumo energético y generación de residuos tóxicos. En el ámbito social, fomenta la creación de empleo cualificado en el sector del

reciclaje avanzado y contribuye a la independencia estratégica en materias primas críticas.

Esta tendencia ascendente refleja la consolidación progresiva del sector y su capacidad para absorber volúmenes crecientes de residuos electrónicos, convirtiéndolos en recursos valiosos.

Impacto la biolixiviación y la hidrometalurgia en la economía circular y la sostenibilidad

La adopción de estas tecnologías es crucial para mejorar la circulación de materiales y productos en el sector del reciclaje. Permiten:

- Reducir la dependencia de la minería primaria y sus impactos asociados.
- Reincorporar metales críticos al ciclo productivo, asegurando el suministro para industrias estratégicas como la electromovilidad y la electrónica.
- Fomentar la innovación y el desarrollo tecnológico, como lo evidencian varias patentes internacionales registradas sobre procesos avanzados de recuperación de metales en RAEE.

Según el V Informe Anual de Recyclia (2024), la actividad de reciclaje de RAEE y pilas generó más de 1.360 millones de euros de valor añadido en la economía europea, subrayando el potencial económico de estas tecnologías.

Desafíos y perspectivas futuras para el reciclaje de RAEE

La implementación generalizada de tecnologías avanzadas para la recuperación de metales críticos a partir de residuos electrónicos enfrenta aún importantes desafíos técnicos, económicos y regu-

latorios que deben ser abordados para maximizar su potencial. Entre los retos más significativos se encuentra la gran heterogeneidad de los RAEE, que dificulta la estandarización de procesos y requiere soluciones adaptativas específicas para cada fracción de residuo.

En el ámbito de la biolixiviación, los principales desafíos incluyen la optimización de la cinética de reacción, tradicionalmente más lenta que en procesos químicos convencionales, y el diseño de biorreactores eficientes que permitan el escalado industrial manteniendo condiciones óptimas para la actividad microbiana.

Paralelamente, la hidrometalurgia enfrenta retos relacionados con la selectividad de los procesos y la gestión de efluentes, aspectos críticos para garantizar la sostenibilidad ambiental de la tecnología.

Las perspectivas futuras del sector apuntan hacia la integración sinérgica de diferentes tecnologías, combinando procesos físicos, químicos y biológicos en sistemas híbridos que maximicen la recuperación de materiales valiosos minimizando impactos ambientales

La digitalización y automatización de procesos, junto con la aplicación de inteligencia artificial para la optimización de parámetros operativos, constituyen tendencias emergentes que probablemente transformarán el panorama del reciclaje avanzado en los próximos años.

Tecnologías avanzadas para cerrar el ciclo de materiales

Las metodologías avanzadas de hidrometalurgia y biolixiviación están revolucionando la recuperación de metales

críticos en residuos electrónicos, fortaleciendo la circulación por productos y materiales dentro de la economía circular. Las diferentes patentes y los proyectos de investigación mencionados, ejemplifican cómo la innovación tecnológica puede impulsar procesos más limpios, eficientes y escalables. Estas tecnologías permiten transformar los RAEE en fuentes estratégicas de recursos, alineando los objetivos de sostenibilidad, eficiencia y competitividad.

Los casos de éxito analizados confirman el potencial de estas tecnologías para transformar radicalmente el sector del reciclaje de residuos electrónicos. La minería urbana y el reciclaje avanzado no son solo una necesidad ambiental, sino una oportunidad económica y estratégica para la industria del reciclaje y la sociedad en su conjunto. Para consolidar estos avances, es imprescindible fomentar la colaboración entre sectores, impulsar la investigación aplicada y establecer marcos regulatorios que incentiven prácticas responsables y tecnologías innovadoras.

Para avanzar hacia una economía circular efectiva, es esencial combinar estas tecnologías con estrategias que prolonguen la vida útil de los productos, fomenten la reutilización y mejoren la eficiencia del reciclaje. La transición hacia una verdadera economía circular en el sector electrónico requiere también un enfoque integrado que considere el ecodiseño de productos, facilitando su posterior desmantelamiento y recuperación de componentes valiosos al final de su vida útil. Solo mediante este enfoque holístico será posible maximizar la recuperación



BIOlixiviación vs HIDROMETALURGIA

Tecnologías limpias para la recuperación de metales



QUÉ ES LA HIDROMETALURGIA

Proceso de extracción de metales utilizando soluciones acuosas (ácidos o bases):

- Se realiza en varias etapas:
- Lixiviación; disuelve el metal del mineral
- Filtrado: separa sólidos no deseados

Exemplo: Extracción de cobre usando ácido sulfurico.



QUÉ ES LA BIOlixiviación?

Técnica biotecnológica que utiliza microorganismos para disolver y liberar metales desde minerales o residuos.

- Más ecológica y económica que procesos químicos

Bacterias clave;

Acidithiobacillus ferrooxidans,
Leptospirillum ferrooxidans

- Aplicación estrella: Recuperación de cobre, níquel y oro

COMPARATIVA RÁPIDA

	Hidrometalurgia	Biolixiviación
Medio usado	Ácidos / Bases	Bacterias
Velocidad	Alto	Lenta
Costo	Alto	Puede ser agresivo
Impacto ambiental	Amplio rango metales	Metales base y reciclaje



MINERÍA DEL FUTURO:

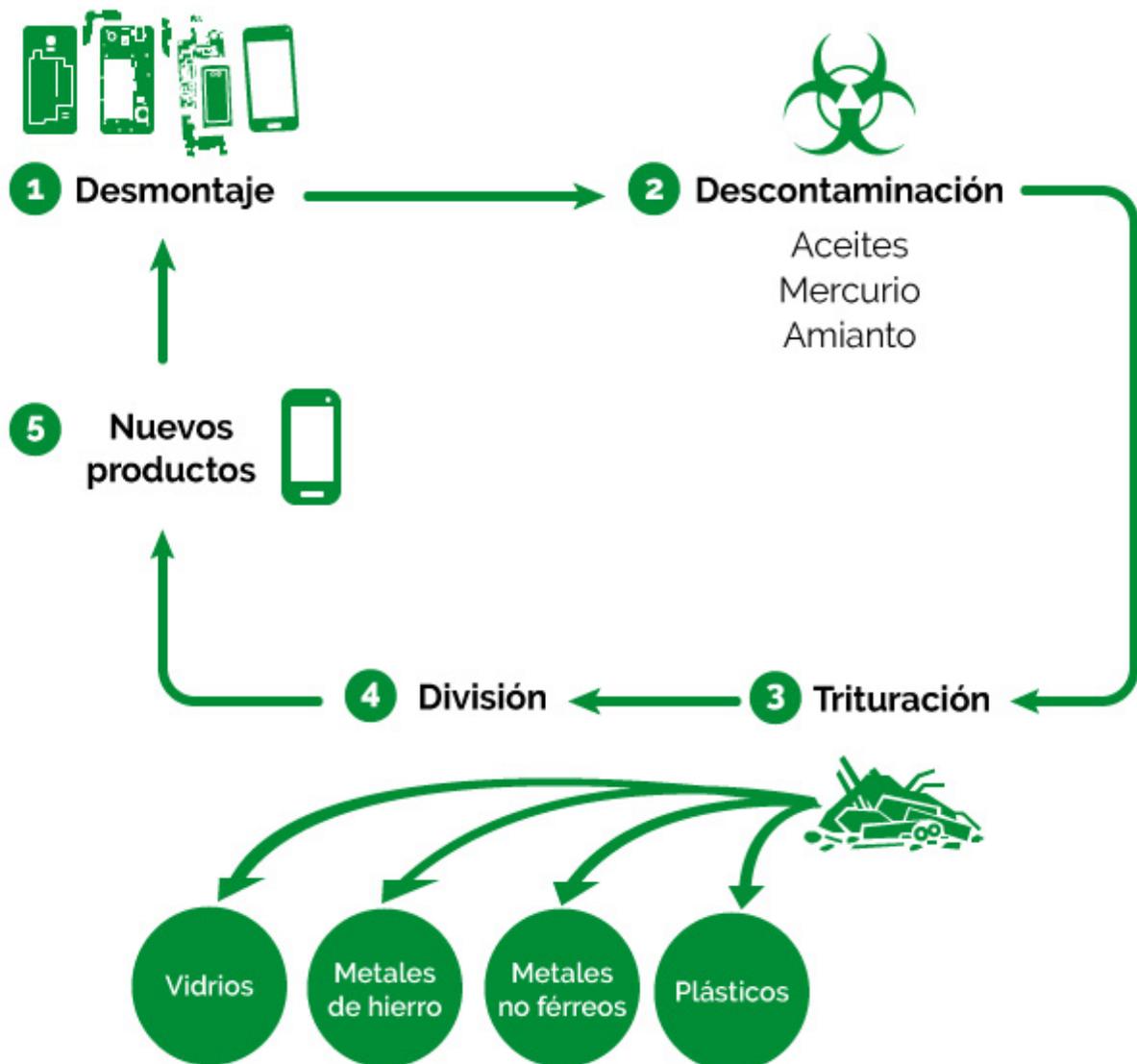
Ambas tecnologías son clave en la minería urbana, permitiendo recuperar metales valiosos desde residuos electrónicos como celulares, baterías y placas madre!

de metales críticos, reduciendo la dependencia de materias primas vírgenes y contribuyendo a la sostenibilidad global del sistema productivo. Las metodologías avanzadas de hidrometalurgia y biolixiviación representan el presente y el futuro del reciclaje de metales críticos en residuos electrónicos. Su implementación a escala industrial es esencial para cerrar el ciclo de

materiales, reducir la presión sobre los recursos naturales y avanzar hacia una economía circular real y sostenible. El reto ahora es acelerar la transferencia tecnológica, optimizar los procesos y fomentar políticas que incentiven la inversión en estas soluciones. ¿Estamos preparados para transformar la basura tecnológica en la nueva mina urbana del siglo XXI?

“...La hidrometalurgia y la biolixiviación representan el presente y futuro del reciclaje de metales críticos en RAEE..”

¿Cómo funcionan las plantas de reciclaje?



Estrategias Globales: Maximizar la Eficiencia en el Reciclaje de Envases Plásticos



¿Es posible alcanzar una economía circular real en el reciclaje de envases plásticos? La experiencia internacional demuestra que sí, siempre que confluyan políticas robustas, innovación tecnológica y una colaboración transversal entre industria, administración y ciudadanía. Alemania ha logrado tasas de retorno del 98% en botellas PET gracias a su sistema de depósito y retorno (GVM, 2021), pero no es el único país que avanza en esta dirección. A nivel global, la Responsabilidad Extendida del Productor (REP), junto con tecnologías avanzadas de separación y trazabilidad, están redefiniendo el paradigma del reciclaje. Este artículo analiza las estrategias y avances más relevantes en la gestión eficiente de envases plásticos, con especial atención al PET y

HDPE, y explora casos de éxito, innovaciones tecnológicas y retos emergentes en la reciclabilidad de envases multicapa. **La Responsabilidad Extendida del Productor: Motor de Circularidad y Eficiencia**

La Responsabilidad Extendida del Productor (REP) es una estrategia que transfiere la responsabilidad financiera y operativa de la gestión de residuos desde los municipios hacia los productores de envases. Este enfoque incentiva el diseño ecológico, la inversión en infraestructuras de reciclaje y la creación de sistemas de recolección más eficientes. Países líderes en la implementación de la REP han demostrado que este modelo es clave para maximizar la recuperación de materiales y reducir la huella ambiental de los plásticos.

Países Pioneros en la Implementación de la Responsabilidad Extendida del Productor

- Alemania: Referente mundial, con una tasa de reciclaje del 87,9% para envases y un sistema de depósito y retorno que ha transformado el valor de los residuos plásticos (GVM, 2021).
- Bélgica: Con una ley REP desde 1997 y una tasa de reciclaje del 89% para plásticos, vidrio y papel, Bélgica destaca por su alta eficiencia y colaboración público-privada.
- Japón: Pionero en Asia, implementó la Ley de Reciclaje de Recursos en 1991 y alcanzó una tasa del 86% en 2020, combinando educación ciudadana y tecnología.
- España: Bajo la Ley de Residuos (2011), alcanzó un 78,8% de reciclaje de envases en 2019, apoyándose en sistemas de recogida selectiva y entidades como Ecovidrio. Instituciones internacionales como la Federación Española de la Recuperación y el Reciclaje (FER), el Congreso Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) y la Global Alliance for Incinerator Alternatives (GAIA) impulsan la estandarización y difusión de buenas prácticas en la gestión circular de plásticos.

Caso de Éxito: Sistema de Depósito y Retorno en Alemania

El sistema alemán de depósito y retorno, vigente desde 2002, establece un depósito de 0,25 euros por botella, reembolsable al devolver el envase vacío en cualquier punto de venta. Esta política ha permitido alcanzar una tasa de retorno del 98% en botellas PET, generando flujos de material reciclado de alta pureza, aptos para nuevas aplicaciones alimentarias y envases

(GVM, 2021). Además, ha reducido significativamente la basura en espacios públicos y ha consolidado la percepción social del residuo plástico como recurso valioso. “El sistema de depósito/reembolso en Alemania ha transformado las botellas de bebidas en artículos de alto retorno, alcanzando una tasa de retorno del 98%.”

— GVM, 2021

Innovación Tecnológica: Separación Automatizada y Trazabilidad

La eficiencia del reciclaje depende en gran medida de la pureza y calidad de los materiales recuperados. Aquí, las tecnologías de clasificación avanzada desempeñan un papel fundamental, especialmente para polímeros como PET (polietilentereftalato) y HDPE (polietileno de alta densidad), ampliamente utilizados en envases de bebidas, productos lácteos y limpieza.

Tecnologías de Clasificación: Sensores Ópticos, IA y Robótica

Los sistemas de separación automatizada han evolucionado notablemente en la última década. Entre las tecnologías más destacadas se encuentran:

- Sensores ópticos (NIR y LOD): El infrarrojo cercano (NIR) permite identificar y clasificar polímeros como PET y HDPE en flujos mixtos, mientras que la detección láser (LOD) facilita la separación de plásticos tradicionalmente problemáticos, como los de color negro.
- Inteligencia artificial (IA): Algoritmos avanzados analizan imágenes y datos espectrales en tiempo real, optimizando la pureza del material y adaptando los parámetros de clasificación según la composición de los residuos.
- Robótica: Equipos dotados de visión artificial y actuadores de alta

precisión, como los desarrollados por Goldensorter, pueden separar plásticos por color, forma y composición con una eficiencia superior al 95%.

La innovación tecnológica, clave para mejorar el reciclaje de plástico

“La apuesta por la innovación, desde el diseño de un producto hasta su reciclado, permitirá en el futuro mejorar de manera significativa el volumen de plástico que se recicla” La tecnología aplicada al reciclaje de plástico permite que cada vez se pueda reciclar más y mejor, favoreciendo sustancialmente la sostenibilidad del planeta. La inversión en innovación también permite mejorar la separación de los distintos tipos de plásticos, haciendo el reciclado más eficiente y contribuyendo al desarrollo de elementos como los bioplásticos, que permiten reducir la cantidad de plástico derivado del petróleo que se comercializa.

Reciclar más y mejor



La tecnología ofrece distintas fórmulas para mejorar el nivel actual de reciclaje de plástico. De hecho, es posible innovar en cada una de las fases del ciclo de vida de un producto, comenzando por su diseño y terminando con el trabajo que se lleva a cabo en las plantas de reciclaje. Estas son algunas vías: Apuesta por el ecodiseño. Diversos es-

tudios señalan que el diseño de un envase determina cerca del 80% del impacto ambiental que tendrá cuando sea desechado. Gracias al trabajo en ecodiseño, en el futuro será posible crear envases menos pesados y con una menor huella medioambiental. Trazabilidad de los productos. Las nuevas técnicas de etiquetado digital permiten, por un lado, un mejor seguimiento de cualquier producto, aunque sea desechado, y por otro aportan información cualitativa sobre sus componentes y en relación a dónde deben reciclarse para poder ser reutilizados. De este modo, será posible obtener información más precisa para mejorar los sistemas de reciclado y reducir la generación de residuos plásticos. Gestión urbana de los residuos. A nivel administrativo, el uso de softwares de Inteligencia Artificial está permitiendo conocer mejor en qué lugares es necesario emplazar contenedores de reciclaje o con qué frecuencia recoger los residuos para evitar que los ciudadanos no tengan dónde depositarlos. Desde el punto de vista de la educación ciudadana, ya hay Apps de reconocimiento de voz que resuelven cualquier duda de una persona sobre cómo reciclar un producto, brindando por otro lado información de gran valor a la Administración para saber cómo formar mejor a la población sobre el reciclaje. Mejorar la separación de los materiales. Uno de los procesos más complejos del reciclado se produce en las plantas de selección, donde hay que separar y clasificar los diferentes componentes que tienen los productos. Desde hace algunos años, se utilizan separadores ópticos, balísticos y magnéticos que agrupan y compactan los

distintos materiales. El uso del 'Internet de las cosas' y otras herramientas digitales está empezando a mejorar significativamente el control y la gestión de las plantas de selección, agilizando y automatizando la toma de decisiones mientras se minimiza el número de incidencias.

Mayor eficiencia en el proceso de reciclado

El otorgamiento de patentes a sistemas que permitan separar envases plásticos con precisión es sin duda un avance en el reciclado de este producto de uso cotidiano. La mayoría de estas innovaciones incluyen sistemas automatizados que integran cámaras de alta velocidad, sensores espectrales y brazos robóticos para identificar y separar envases plásticos con precisión lo que unido a la combinación de reconocimiento morfológico y análisis químico permite alcanzar tasas de pureza inéditas en el reciclaje de PET y HDPE, facilitando su reincorporación en aplicaciones de alto valor.

Caso de Innovación

La patente B07C 5/34, titulada "Automatic sorting of waste", describe un sistema automatizado para clasificar residuos sólidos (incluyendo plásticos) mediante una combinación de sensores (ópticos, de peso e inductivos), visión artificial y algoritmos de aprendizaje automático. El sistema identifica objetos basándose en su forma, color, logotipo o tipo de material, y los redirige automáticamente al contenedor correcto mediante mecanismos de selección. Su aplicación se orienta a mejorar la eficiencia del reciclaje y reducir errores humanos en la clasificación.

Trazabilidad Digital: RFID y el Internet de las Cosas

La tecnología RFID (Radio Frequency Identification, o Identificación por Radiofrecuencia) utiliza etiquetas electrónicas que transmiten datos sin contacto visual, permitiendo rastrear envases durante todo su ciclo de vida. Combinada con el Internet de las Cosas (IoT), esta tecnología optimiza la trazabilidad, facilita la logística inversa y mejora la transparencia en la cadena de reciclaje.

Tecnologías de Lavado Avanzado para HDPE

El HDPE, identificado por el código de reciclaje "2", es ampliamente utilizado en envases rígidos por su resistencia y versatilidad. Las tecnologías de lavado avanzado, como las implementadas por Boretech, incluyen módulos de prelavado, lavado en caliente por fricción y sistemas de flotación de bajo consumo energético, logrando niveles de pureza excepcionales y ampliando las aplicaciones del HDPE reciclado, incluso en el sector alimentario.

Reciclabilidad de Envases Multicapa: Retos y Soluciones

Los envases multicapa, diseñados para prolongar la vida útil de los productos y reducir el uso de materiales, presentan importantes desafíos para el reciclaje debido a la combinación de polímeros incompatibles. Sin embargo, investigaciones recientes han demostrado que es posible reciclar estos envases mediante procesos mecánicos, compatibilización de capas y tecnologías de separación física (Ragaert, Delva & Van Geem, 2020). "Los envases multicapa de poliamida con polietileno o polipropile-

no son reciclables, tanto por métodos tradicionales como alternativos.”
— Ragaert et al., 2020

La tendencia actual es desarrollar envases multicapa con combinaciones de polímeros compatibles y fácilmente separables, facilitando su reciclaje y reincorporación en la economía circular.

Estrategias Globales y Perspectivas de Futuro

La Unión Europea ha fijado metas ambiciosas: alcanzar un 55% de reciclaje de envases plásticos para 2030. Japón, Bélgica y Alemania ya superan el 85%, demostrando que la combinación de REP, innovación tecnológica y educación ciudadana es la vía más efectiva para maximizar la eficiencia del reciclaje. Instituciones internacionales como FER, CONAMA y GAIA desempeñan un papel clave en la difusión de estándares y el intercambio de experiencias. El desafío ahora es trasladar estos

modelos a economías emergentes, adaptando las soluciones tecnológicas y regulatorias a contextos locales y promoviendo la colaboración entre todos los actores de la cadena de valor.

Maximizar la eficiencia en el reciclaje de envases plásticos requiere una visión integral: políticas REP robustas, tecnologías de separación y trazabilidad avanzadas, y un rediseño de productos orientado a la reciclabilidad. Los casos de éxito en Alemania, Bélgica y Japón demuestran que es posible alcanzar tasas de reciclaje cercanas a la totalidad cuando se alinean incentivos, infraestructura y conciencia social. El futuro del reciclaje pasa por la digitalización, la innovación continua y la cooperación internacional, transformando los residuos plásticos en recursos clave para una economía verdaderamente circular.

Conoce e identifica los 7 tipos de plástico

1 PET
Botellas de agua y refresco, envases de aceite

2 HDPE
Envases de productos de limpieza y detergentes

3 PVC
Tubos y cañerías

4 LDPE
Bolsas de basura

5 PP
Tuppers y popotes

6 PS
Utensilios de comida rápida

7 OTROS
Biberones, CD's y DVD's



EMPRESA DE INGENIERIA DEL RECICLAJE

Calle Zapata #1558 e/ Paseo y 2. Vedado.Plaza de la Revolución. Cuba

 observatorio@isde.co.cu

 observatorio.reciclaje.cu

 [observatorio-cubano-del-reciclaje](https://www.linkedin.com/company/observatorio-cubano-del-reciclaje)

 [observatorio tecnologico](https://www.facebook.com/observatorio-tecnologico)