



INFORME PROYECTOS—

ECONOMÍA CIRCULAR APLICADA A LA VALORIZACIÓN SOSTENIBLE
DE RESIDUOS ELECTRÓNICOS Y METALIZADOS

“LIXMIX”

Informe: “Final de Resultados”

Programa: Proyectos de I+D en colaboración con empresas



GENERALITAT
VALENCIANA

IVACE
INSTITUTO VALENCIANO DE
COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL



Financiado por
la Unión Europea

AIDIMME
INSTITUTO TECNOLÓGICO

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	4
2. ACTIVIDADES REALIZADAS, DESARROLLO DEL PROYECTO Y RESULTADOS OBTENIDOS	6
PT 1. GESTIÓN Y COORDINACIÓN DEL PROYECTO	6
PT 2. DIFUSIÓN DEL PROYECTO	8
PT 3. TRANSFERENCIA Y PROMOCIÓN DE LOS RESULTADOS	12
PT 4. LIXIVIACIÓN BIOLÓGICA DE METALES BASE	13
4.1. Cultivo de microorganismos y generación biológica de agente lixivante	13
4.2. Lixiviación biológica de metales base	18
PT 5. LIXIVIACIÓN ELECTRO-ASISTIDA DE METALES DE ALTO VALOR AÑADIDO	33
5.1. Identificación y selección de condiciones para la electrolixiviación	33
5.2. Lixiviación electro-asistida de metales valiosos	35
PT 6. ESTUDIO DE RECUPERACIÓN DE LOS METALES Y DISEÑO DE PROTOTIPO	40
6.1. Identificación de alternativas para la recuperación de los metales disueltos	40
6.2. Diseño de un proceso/prototipo para la extracción y purificación de metales	40
PT 7. EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA Y MEDIOAMBIENTAL DE LA TECNOLOGÍA	44
7.1. Evaluación de la viabilidad de la nueva iniciativa	44
7.2. Estudio de los distintos flujos de salida del nuevo proceso y propuesta de clasificación como residuos, subproductos o fin de condición de residuo	46
7.3. Propuesta de caracterización del decapado ácido como subproducto	47

Conclusiones PT7	49
3. CONCLUSIONES	50

1. Introducción

El aumento en la demanda de los equipos eléctricos y electrónicos (AEE) y la disminución en su vida útil generan una enorme cantidad de residuos procedentes de equipos como teléfonos móviles, televisión, ordenadores, impresoras, módem, máquinas de fax, fotocopiadoras, Monitores LED/LCD, equipos médicos etc. Estos residuos contienen una gran variedad de sustancias, algunas de ellas peligrosas, que pueden causar problemas ambientales cuando no se gestionan adecuadamente. Como valor añadido, los RAEE contienen metales base (Cu, Al, Zn, Ni...) y metales preciosos (Au, Ag, Pt...) comparables al contenido de metales en minerales y concentrados, por lo que se pueden considerar nuevas fuentes de recursos, alternativa a los convencionales. De la misma manera, otros residuos metalizados, como el ABS, recubierto con Ni/Cu/Cr, y utilizado mayoritariamente en automoción, pueden ser fuente de recursos.

En el presente proyecto, se ha desarrollado una metodología hidrometalúrgica de bajo impacto ambiental, basada en la economía circular, para la recuperación de metales contenidos en residuos electrónicos y plásticos metalizados. Esto incluye el uso de ácidos residuales como materia prima, el empleo de microorganismos y la electroquímica. El desarrollo aprovecha el bajo consumo energético de los procesos hidrometalúrgicos solventando el principal inconveniente, que es el uso de reactivos químicos peligrosos.

En este entregable se describen las tareas realizadas en la ejecución de todo el proyecto LIXMIX cuyo objetivo es desarrollar una **metodología de bajo impacto ambiental basada en la economía circular** para la recuperación de metales contenidos en residuos electrónicos y metalizados a partir de la utilización de **ácidos residuales** de diferentes industrias, el **empleo de microorganismos y electroquímica**.

Para ello, se han cumplido los siguientes objetivos específicos:

- Definir metodología de biolixiviación mediante la utilización de **microorganismos** como productores biológicos de lixiviantes y adaptación a un proceso secuencial de recuperación.
- Definir una metodología de electrolixiviación para la extracción de metales valiosos
- Identificación y selección de los **residuos ácidos** de nuestras empresas potencialmente utilizables tanto para la producción de lixiviantes en el bioleaching como reactivo para el electro-leaching

- **Diseño** de un prototipo para la recuperación de metales en función de los resultados obtenidos teniendo en cuenta los rendimientos de lixiviación, así como una futura concentración y purificación de los distintos metales contenidos en cada corriente
- Análisis de la viabilidad técnica ambiental y económica del proceso propuesto en comparación con los procesos aplicados en la actualidad.
- Analizar el proceso de legalización de un residuo (decapado ácido) para su utilización como subproducto con la finalidad de minimizar el coste actual de almacenamiento y gestión del residuo.
- **Transmitir** el conocimiento a nuestras empresas para fomentar la competitividad de las mismas basándose en generación de nuevo conocimiento

2. Actividades realizadas, desarrollo del proyecto y resultados obtenidos

A continuación, se muestra un resumen de los diferentes paquetes de trabajo desarrollados durante la ejecución del proyecto.

PT 1. Gestión y coordinación del proyecto

A lo largo de esta tarea se han llevado a cabo todas las actividades de planificación y control de actividades para organizar todos los aspectos del proyecto mediante reuniones periódicas y extraordinarias con los responsables de cada parte del proyecto.



Figura 1. Reuniones de coordinación

Para ello se han realizado reuniones (presenciales y virtuales) entre el personal involucrado, así como con las diferentes empresas que han participado de manera directa o indirecta en el desarrollo de todas y cada una de las tareas, y que han permitido la obtención de los resultados del mismo.

Todo ello se ha llevado a cabo con el fin de:

1. Orientar de manera integral la dirección y los propósitos del proyecto.
2. Armonizar y administrar de manera conjunta las actividades del proyecto.
3. Garantizar una cooperación, comunicación, intercambio de conocimientos y acuerdo apropiados entre los miembros del proyecto, asegurando el cumplimiento de los hitos establecidos, coordinando las acciones de los participantes a lo largo del tiempo y solucionando posibles conflictos entre las tareas y/o colaboradores.
4. Organizar y participar en las reuniones del proyecto, tanto con los técnicos involucrados como con las empresas colaboradoras.
5. Supervisar y mantener el control de la calidad del trabajo realizado en el proyecto, centrándose en los entregables de cada etapa para crear una

documentación coherente y completa.

6. Facilitar los procedimientos y recursos necesarios para acelerar la aplicación de los resultados del proyecto y su difusión, garantizando una adecuada protección de la propiedad intelectual.

PT 2. Difusión del proyecto

Se han identificado los medios de mayor interés para la difusión del proyecto; programas, jornadas, boletines o suplementos especializados para dirigir las comunicaciones. Una vez obtenidos los resultados, se han redactado y plasmado en el soporte correspondiente. Entre otros, se han elaborado artículos técnicos y de divulgación, notas de prensa etc.

- Se ha realizado difusión acotada a base de datos:
 - Solicitudes de información de empresas sobre el proyecto

Diariamente se gestiona el correo general info@aidimme.es, con derivación específica al departamento correspondiente y seguimiento de respuesta. Atendiendo a las solicitudes de información derivadas del proyecto.

- Correos y llamadas específicas de atención personalizada

De este modo se ha realizado un seguimiento de las empresas que han solicitado información a través de los enlaces de las publicaciones y la ficha del proyecto, sobre las que se han registrado más de 2.800 accesos específicos del proyecto LIXMIX.

- Espacios de difusión edificios AIDIMME
 - Panel, cartelería y proyección de tv., permanente del proyecto



- Ferias, eventos, jornadas, seminarios
- Congreso Hábitat – Organizado por AIDIMME en el Palacio de Congresos de Valencia – octubre 2023



- Feria Hábitat– Organizado por Feria Valencia – 19 al 22 de septiembre 2023



- Ecofira – Eurobrico – Eco Chemical Solutions– Organizado por Feria Valencia – 4 al 6 de octubre 2022
- Ecofira 2023 - Organizado por Feria Valencia – 14 al 16 de octubre 2023



- Feria CEVISAMA– Organizado por Feria Valencia – 27 de febrero al 3 de marzo

2023.

- Taller “Hoja de Ruta para la Sostenibilidad en el Sector Metal Valenciano”



PT 3. Transferencia y promoción de los resultados

A lo largo de esta tarea se ha realizado una evaluación de la mejora alcanzada con los resultados obtenidos respecto al estado del arte identificado.

Asimismo, se ha realizado una estrategia para la transferencia de los resultados en función de los modelos de negocio adecuados para la tecnología desarrollada.



Figura 2. Imágenes de difusión y transferencia

El cumplimiento del objetivo se ha llevado a cabo a través del desarrollo de 3 acciones principales:

- Identificación de resultados alcanzados
- Definición de estrategia de transferencia y promoción de resultados
- Acciones de transferencia y promoción de resultados

PT 4. Lixiviación biológica de metales base

4.1. Cultivo de microorganismos y generación biológica de agente lixivante

Se ha realizado el estudio del empleo de la lixiviación biológica de los metales contenidos en residuos industriales. Para ello, se ha realizado el cultivo de las bacterias en condiciones ideales, tras un periodo de crecimiento y adaptación al medio. Además, se ha investigado la posibilidad de realizar un procedimiento para recuperar los metales disueltos en el residuo así como reutilizar el agente lixivante como medio de cultivo para los microorganismos.

Se seleccionaron tres especies bacterianas para estudiar su crecimiento y adaptación a las condiciones a utilizar a una mayor escala; las especies seleccionadas fueron *L. ferrooxidans*, *A. ferrooxidans* y *A. thiooxidans* debido a su importancia en reciclaje de metales mediante biolixiviación.

***Leptospirillum ferrooxidans* DSM 2705:** Según la información obtenida del proveedor, requiere de un tiempo de incubación de 3 a 7 días a 30°C sin agitación. Crece en el medio de cultivo 882, descrito detalladamente en el apartado b. Se trata de una bacteria gran negativa, acidófila, aerobia y quimiolitotrofa. Tienen forma de bacilos curvos en forma de vibrio o espiral y utiliza el hierro (II) como fuente de electrones

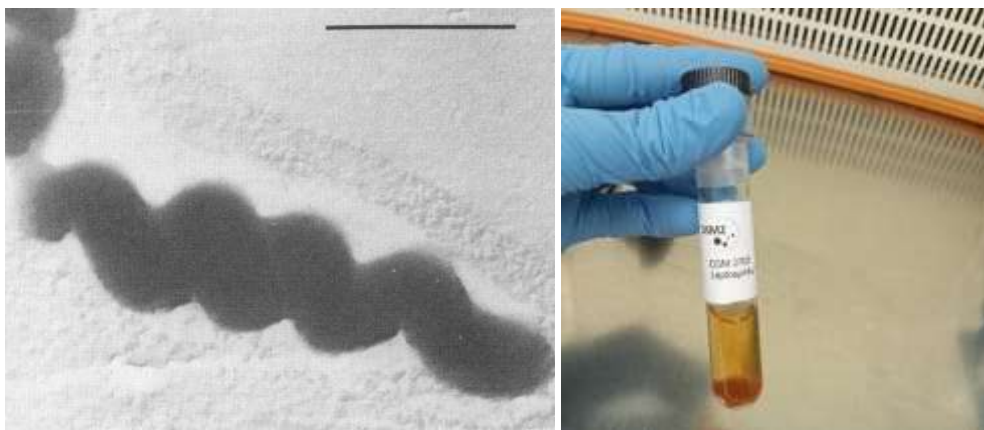


Figura 3. Imagen de la especie *Leptospirillum ferrooxidans* (imagen izquierda). Cepa recibida de *L. ferrooxidans* DSM 2705 (imagen derecha).

Acidithiobacillus ferrooxidans DSM 14882: Según la información obtenida del proveedor, requiere de un tiempo de incubación de 3 a 7 días a 25°C. También crece en el medio 882. Es una bacteria Gram negativa, autótrofa, anaerobia facultativa, acidófila extrema y quemolitótrofa. En condiciones aeróbicas oxida Fe^{2+} a Fe^{3+} , sin embargo, oxida azufre reducido a SO_4 tanto en condiciones aeróbicas como anaeróbicas. Debido a sus características metabólicas produce una aceleración de la disolución oxidativa de minerales de azufre, esto confiere al medio en el que están la capacidad de recuperar metales preciosos de lixiviados, aquí radica la importancia de estas bacterias para este tipo de ensayos



Figura 4. Bacilo de la bacteria *A. ferrooxidans* (imagen izquierda). Tubo de ensayo con la cepa recibida *Acidithiobacillus thiooxidans* DSM 504 (imagen derecha).

Acidithiobacillus thiooxidans DSM 504: Según la información obtenida del proveedor, requiere de un tiempo de incubación de 3 a 7 días a 26°C. Crece en el medio 35 descrito en el apartado c. *A. thiooxidans* es un bacilo acidófilo. Utiliza azufre elemental como fuente de alimentación primaria, dando lugar como producto ácido sulfúrico, es decir acidificando el medio en el que crece [5,6]. No oxida hierro, sin embargo, se sabe que es capaz de crecer simultáneamente con *A. ferrooxidans* y extraer cobre.

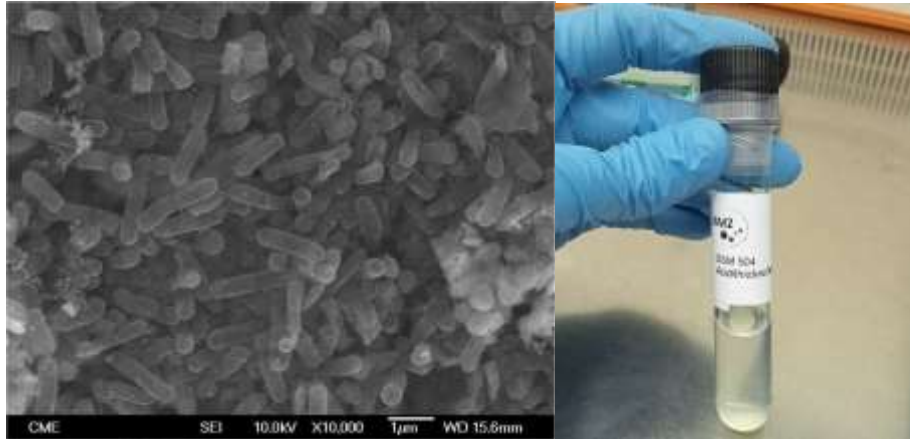


Figura 5. En la imagen de la izquierda se observan bacilos de bacterias *A. thiooxidans*. A la derecha un tubo de ensayo con la cepa recibida *Acidithiobacillus thiooxidans* DSM 504.



Figura 6. Preparación del medio 9K para preparar sub-cultivos de las especies bacterianas. Por un lado en erlenmeyers estaba la solución OK esterilizada y por otro la solución de hierro (II) esterilizada.

Se realizó un cultivo inicial en las condiciones ideales del proveedor para reactivar cada especie bacteriana. Para ello se inoculó el 5% (v/v) de cada bacteria en cada frasco de su medio de cultivo correspondiente. Es decir, en el medio 882 en el caso de *L. ferrooxidans* y *A. ferrooxidans* y 35 en el caso de *A. thiooxidans*. En el caso de la adaptación al medio de cultivo del reactor se inocularon las cepas (5% v/v) en medio de cultivo 9K.

Tras la reactivación e incubación de las distintas especies, se trabajó el cultivo sinérgico de las 3 especies para seleccionar el medio del reactor a mayor escala



A. thiooxidans



+ *A. ferrooxidans* + *L. ferrooxidans*

A. thiooxidans + *A. ferrooxidans*



L. ferrooxidans

Del mismo modo, se comprobó la viabilidad del cultivo de las especies ferrooxidantes con los ácidos de decapados industriales, ricos en hierro (II). Posteriormente, se realizaron los cultivos a mayor escala para la producción del agente lixivante que se utilizaron para la lixiviación de metales en el proyecto.



Figura 7. (a) Cultivo con ácidos de decapado. (b) Cultivo a escala piloto. (c) Agente lixivante final



Figura 8. Agentes lixiviantes para bioleaching

4.2. Lixiviación biológica de metales base

Se han realizado ensayos de lixiviación para los distintos residuos contemplados en el proyecto correspondientes a las distintas empresas colaboradoras

En esta acción se ha procedido a la lixiviación de los metales contenidos en los residuos mediante el empleo del agente generado por los microorganismos, así como a disoluciones sintéticas basadas en esa composición y el uso de los decapados industriales.

Se han realizado análisis de los medios para cada condición a medida que transcurre el tiempo de reacción para evaluar la cinética y rendimiento en cada caso.

Se determinó la composición inicial de referencia con técnicas cualitativas y cuantitativas; mediante FRX, microscopio electrónico y agua regia.

4.2.1. Plásticos metalizados

En el caso de los plásticos metalizados, se trabajó en dos formatos;

- Plástico metalizado sin triturar
- Plástico metalizado triturado

En ambos casos, se valoraron las condiciones de proceso para no dañar la superficie del ABS con el fin de que este pudiera ser valorizable. Para la recuperación de metales en este residuo, se tuvo en cuenta;

- Temperatura del proceso (Ambiente)
- Concentración de Fe (III) y ácido (Bacterias)
- Ratio sólido líquido (5-50 mL/g)
- Pretratamientos adicionales (triturado, separación física)



Figura 9. Ensayos correspondientes al ABS metalizado triturado

Con ello, se consiguió realizar una recuperación efectiva de las distintas partes de su composición:

- Cobre
- Níquel
- Cromo
- ABS

4.2.1.1. Plástico sin triturar

La empresa tiene como principal línea de negocio la fabricación y suministro de componentes plásticos metalizados para el sector de automoción. Dentro de su proceso, se tiene un porcentaje de piezas con desperfectos que se descartan. Las diferentes piezas que se han suministrado para el proyecto son las siguientes:



Figura 10. Piezas de ABS originales sin triturar

Determinación con agua regia

Para el análisis elemental de los metales en estas piezas, se ha hecho mediante digestión a temperatura con agua regia HNO₃: HCl 1:3 al 70% y 37%, respectivamente durante por lo menos una hora. Esto se realizó por duplicado sobre distintas piezas, y con ello se han obtenido los siguientes valores:

Tabla 1. Porcentajes de referencia para el ABS sin triturar (%)

Cu	Ni	Cr	Pd
10-12	4-5	0,1-0,3	<0,02



Figura 11. Piezas de ABS tras ser digeridas en agua regia a temperatura

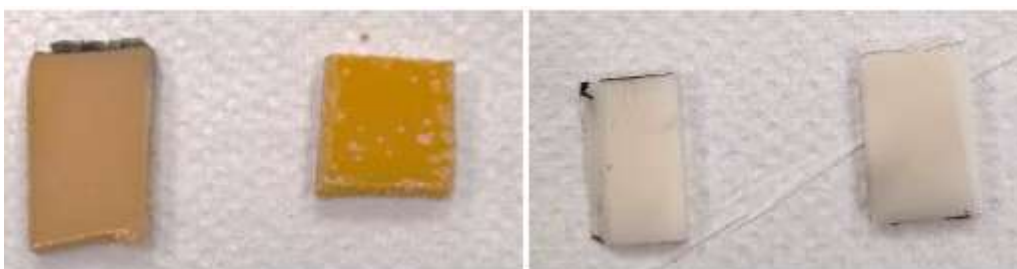


Figura 12. Piezas ABS tratadas a alta temperatura y a temperatura ambiente, respectivamente

Tal y como se puede ver en las imágenes anteriores, el efecto de la temperatura sobre el ABS resulta en un plástico de baja calidad que no se podría reutilizar, por lo que en los resultados siguientes se muestran los resultados obtenidos a temperatura ambiente.



Figura 13. Lixiviado ABS con distintos ácidos residuales de decapado



Figura 14. Piezas de ABS tratadas en condiciones no óptimas de lixiviación



Figura 15. Piezas ABS tratadas con ácidos de decapado

Conclusiones plástico sin triturar

- El medio en sulfúrico de pH alto y Fe (III) tanto sintético como por bacterias ha supuesto los rendimientos más bajos para el ABS entero
- El FeCl_3 y los ácidos de decapado han obtenido los mejores rendimientos para este residuo. No obstante, la dificultad de recuperar el Cu en medio cloruro (PT 6) hacen desestimar esta vía
- El ABS sin triturar sufre deslaminaciones y ofrece un peor contacto con el líquido que el triturado
- Se recomienda el triturado del ABS metalizado como pretratamiento necesario para recuperar los metales y el plástico, tanto por rendimiento del sistema como por sencillez de operación



Figura 16. Piezas ABS antes, durante y después del tratamiento

4.2.1.2. Plástico triturado

El análisis cuantitativo de los metales en estas piezas se ha hecho mediante digestión a temperatura ambiente y a ebullición (Temp. Si/No de la tabla siguiente) con agua regia HNO₃: HCl 1:3 al 70% y 37%, respectivamente durante por lo menos una hora. Esto se realizó por duplicado sobre distintas piezas, y con ello se han obtenido los siguientes valores:

Muestra	Temp. SI/NO	FILTRADO	Cu %	Ni %	Cr %	Pd %
1	NO	NO	12,47	6,57	77,62	0
2	NO	SI	13,01	6,62	61,88	0
3	SI	SI	9,03	4,73	62,77	0
4	SI	SI	14,72	3,32	0,06	0

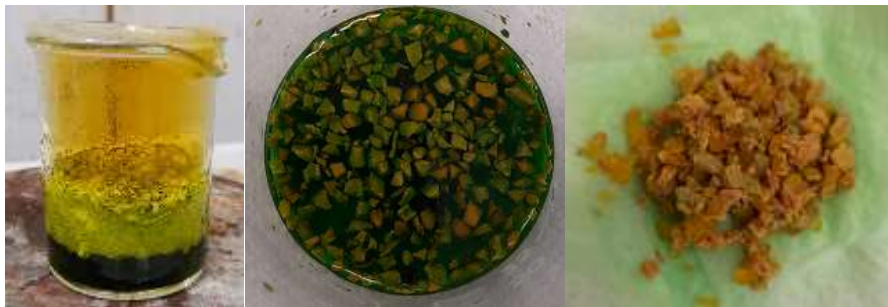


Figura 17. Una muestra durante la digestión en AR de ABS triturado

Durante los ensayos con bioleaching, se observaron partículas metálicas en suspensión en el líquido tras la lixiviación, que quedaban retenidas por el papel filtrante tras la filtración.

Para cuantificar los metales que quedaban en suspensión para determinar la extracción en cada caso, se realizaron varias repeticiones del siguiente procedimiento (ver la ilustración siguiente):

- Biolixiviación convencional durante 4-24h y muestreo tras filtrar
- Muestrear parte de la solución para digerir con microondas (a T^a, presión y ácido nítrico al 70%)
- Análisis del filtro: digestión del filtro con partículas metálicas en microondas
- Digestión de la pieza resultante y análisis

Con todo ello, se extrajeron las siguientes conclusiones:

- Gran parte del cromo queda no digerido y por tanto permanece en suspensión
- Dependiendo del ensayo, gran parte de las partículas en suspensión contienen Ni y algo de Cu. La composición de la suspensión y del filtro es equivalente.
- El Pd permanece en la pieza de plástico resultante

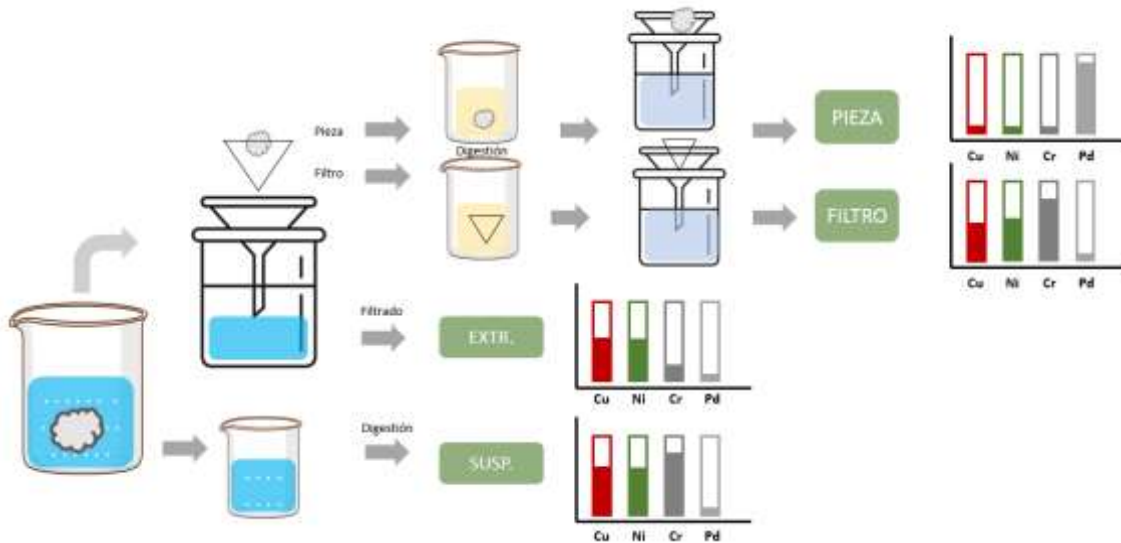


Figura 18. Esquema seguimiento de los metales en los plásticos metalizados

Puesto que la capa metálica del ABS se compone en gran parte por Ni, un material magnético, se puede realizar un pretratamiento físico sencillo de separación magnética, quedando, aproximadamente, un **70% en peso de plástico y un 30% en peso de metal** (con respecto a la masa inicial de ABS triturado).

En la imagen siguiente se ve el ABS metalizado, la separación con el imán y el concentrado metálico sobre el que se trabajará en los siguientes ensayos.



Figura 19. Inicial, separando con imán y metal concentrado con el imán



Figura 20. ABS inicial, ABS valorizable final y metales disueltos respectivamente



Figura 21. Tratamiento del ABS triturado con pH ácido y hierro (III)

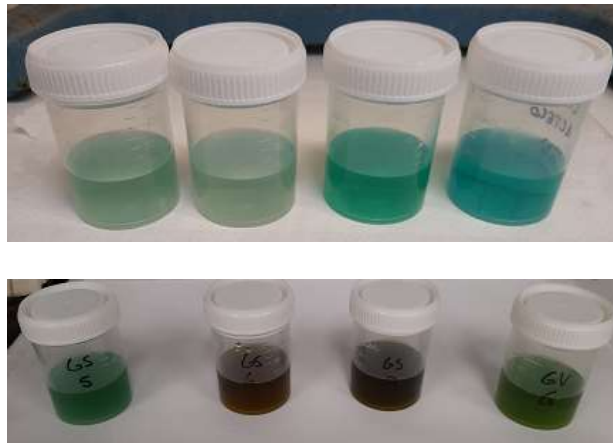


Figura 22. Aspecto de las disoluciones finales tras la lixiviación del ABS en distintas proporciones Líquido/sólido y composiciones de líquido



Figura 23. Ensayo de evaluación del tiempo de lixiviación

Conclusiones plástico triturado

- Se recomienda hacer un triturado fino del ABS para facilitar los tratamientos posteriores
- El tratamiento con el imán supone un cribado sencillo para una primera etapa de separación del plástico sin metalizar, dejando un plástico limpio y reutilizable
- La fracción metálica resultante, está más concentrada y por tanto resultan en rendimientos mayores en la extracción de metal
- El plástico resultante del procedimiento químico queda en buenas condiciones debido a la baja agresividad del proceso
- Se ha estudiado la posibilidad de reutilizar el agente lixivante, con buenos resultados de rendimiento pero con elevados tiempos de operación
- Los ratios elevados de líquido sólido favorecen la lixiviación de los metales (>20 mL/g)

4.2.2. Circuitos electrónicos

En el caso de los circuitos electrónicos, se ha realizado un proceso de pretratamiento de concentración consistente en distintas etapas;

- Trituraciones y tamizados secuenciales
- Separación magnética
- Separación neumática



Figura 24. Ejemplo de la muestra inicial, triturado y final (separación física) para los ensayos

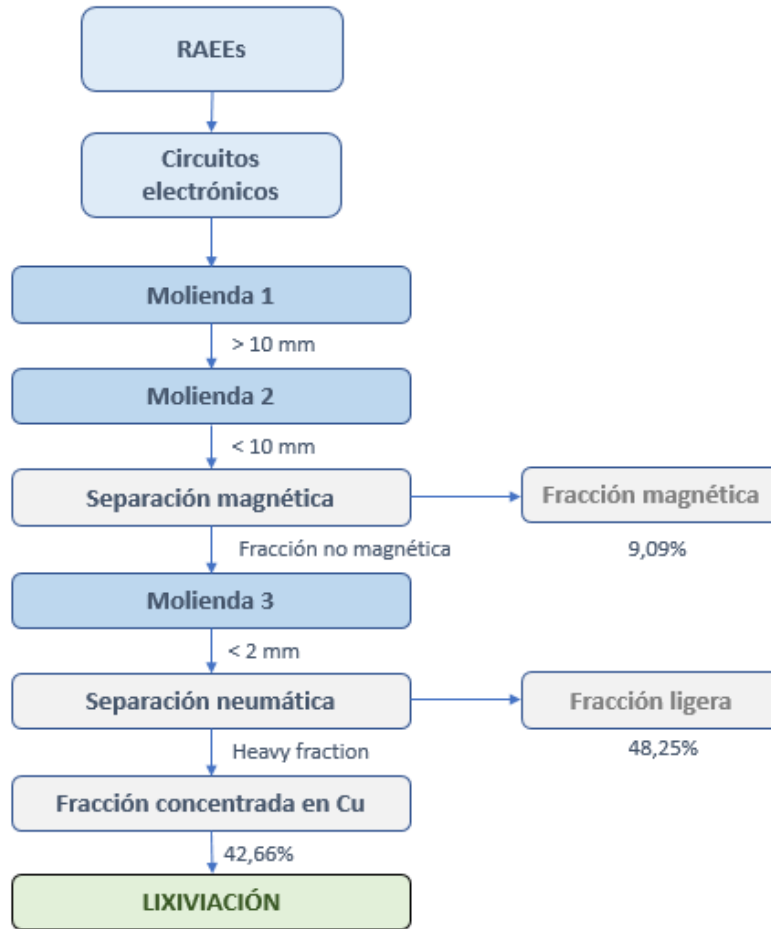


Figura 25. Esquema del pretratamiento para los circuitos electrónicos

De esta manera, se consigue un residuo con un tamaño de partícula más pequeño con el que trabajar, lo cual mejora rendimientos de lixiviación y por otro lado se concentra el contenido metálico de valor, mejorando el rendimiento de las extracciones.

En primer lugar, se han realizado caracterizaciones del residuo y pretratamientos antes de los ensayos mediante diferentes metodologías;

- Análisis termogravimétrico (TGA)
- Calorimetría diferencial de barrido (DSC)
- digestión con agua regia
- Digestión microondas
- Fusión copelación
- Fluorescencia rayos X

- Calcinación de circuitos

Se realizaron diferentes ensayos de lixiviación biológica para los circuitos, cambiando las siguientes condiciones:

- Pretratamiento – calcinación
- Concentración del ácido empleado (bajada de pH sintética)
- Concentración – ratio liquido solido: de 25 a 100
- Temperatura

Procedimiento:

- Pesado de la masa inicial de circuitos
- Preparación de la muestra (pretratamiento en caso necesario)
- Preparación del agente lixiviante (mL y temperatura según ensayo)
- Agitación y tiempo según ensayo



Figura 26. Circuitos antes y después de calcinación



Figura 27. Circuitos durante y después del tratamiento químico



Figura 28. Filtración y disolución final rica en cobre procedente de los circuitos



Figura 29. Tratamiento con ácido concentrado y temperatura



Figura 30. Tratamiento a temperatura ambiente



Figura 31. Disoluciones finales tras distintas condiciones de operación



Figura 32. lixiviación biológica de circuitos

Para los agentes lixiviantes conseguidos mediante agentes biológicos se han obtenido rendimientos de 99% para el Cu a temperatura ambiente tras 96h de contacto en agitación (con buenos rendimientos a partir de las 24h), quedando el resto de metales en el sólido concentrado, que será empleado en la siguiente etapa de extracción mediante electrolisis

Conclusiones PT4

- Para el ABS triturado sin pretratamiento magnético tratado con ácido de decapado, se consigue un buen rendimiento con ratio L/S de 20 para una concentración optima de Fe (III) 0,5 M, sea en forma cloruro o sulfato tanto para el Cu como para el Ni. El ratio debería ser superior a 5 para acabar el proceso en 4h a baja temperatura, siendo los mejores resultados obtenidos con 1M de FeCl_3
- El empleo de únicamente 0.5-1M FeCl_3 tiene buenos rendimientos para los residuos, debido al contenido en Fe (III) y el bajo pH
- En general, el empleo de AD únicamente no ha supuesto una mejora significativa en términos de Fe puesto que el contenido en hierro es mayoritariamente Fe (II), aportando únicamente acidez al medio
- El empleo de ácido de decapado en el tratamiento de ABS se descarta ya que colorea el plástico resultante y dificulta su valorización posterior
- El empleo de ácido de decapado en esta etapa ha consistido en al ajuste del pH en los ensayos de lixiviación biológica y a ser empleados en los ensayos electroquímicos
- Con respecto a la **lixiviación biológica** de los distintos residuos, se ha observado lo siguiente:
 - ABS sin pretratar: Es necesaria una concentración de hierro 0.5M y $\text{pH} < 1$ para un ratio S/L de al menos 30 mL/g y para poder tener un buen rendimiento en un tiempo $< 4\text{h}$.

- ABS concentrado (fracción metal): ratio L/S entre 50-100, con un tiempo de 24-96 horas para un rendimiento óptimo
 - ABS limpio (Fracción plástico): ratio L/S puede ser de aproximadamente 25, con un tiempo de 4 horas para un rendimiento aceptable de separación
 - CIRCUITOS: ratio L/S entre 50 y 100 con pH <1 y tiempos de 24-96h
- En general, para relación L/S baja (<25) y el pH es >1, el rendimiento es menor (% y tiempo necesario) para todos los residuos

PT 5. Lixiviación electro-asistida de metales de alto valor añadido

5.1. Identificación y selección de condiciones para la electrolixiviación

Se han analizado los residuos procedentes de los procesos de tratamiento superficial para evaluar su factibilidad en la electro-lixiviación, así como las corrientes procedentes de la etapa anterior. Asimismo, se han analizado los WPCB de las distintas procedencias y tratamientos con diferentes metodologías de análisis.

En esta etapa, se han definido las mejores condiciones de trabajo para el reactor de electrólisis;

- Reactor monocelda o compartimentado
- Modo de operación galvanostático
- Configuración monopolar
- Electrodo DSA
- Recirculación
- Temperatura ambiente
- Horas de ensayo

Caracterización de los ácidos de decapado

En esta parte se hace una caracterización de los ácidos de decapado en distintos puntos de las empresas de tratamiento de superficies y galvanizado en caliente con el fin de evaluar su factibilidad para los ensayos de electrolixiviación.

Tabla 2. Resultados caracterización de los ácidos de decapado agotados recibidos

	Ud.	1	2	3	Rango
Acidez	g/L	70-90	15-50	50-120	10-80
Densidad	g/mL	1.23	1.34	1.19	1.1-1.4
Cl⁻	g/L	216	223	44	50-230
Cu	ppm	113	13	-	10-100
Cr	ppm	89	123	41	40-120
Ni	ppm	68	95	-	60-100
Zn	g/L	1.4	30	-	1-30
Fe	g/L	90-120	120-150	20-50	50-150
Mn	ppm	605	1342	43	40
Fe:Cl⁻	-	1:3	1:6	1:2	1:2-1:6



Figura 33. Caracterización residuos lixiviantes

Se puede ver en los resultados que hay variabilidad en términos de contenido en metales así como en la acidez (columna Rango). En el caso de la electrolixiviación estudiada en el proyecto, se considera que lo más relevante es el contenido en hierro, los cloruros, la acidez y ratio de cloruros y hierro. Con el fin de valorizar estos residuos y aprovechando el alto contenido en cloruros, las pruebas se han hecho utilizando los ácidos de decapado con y sin hierro disuelto tanto en las proporciones de origen como en otras diferentes con el fin de ver cuáles serían las mejores condiciones de lixiviación. Es importante remarcar que el hierro contenido en estos residuos de decapado está presente como hierro II y no como hierro III. El hierro III ha sido encontrado en bibliografía en varias ocasiones demostrando su efectividad para metales base y en teoría para la electrolixiviación, pero el efecto de hierro II todavía no ha sido demostrado en la bibliografía consultada.

Tipología de circuitos

Los circuitos, considerados RAEE ya caracterizados anteriormente, proceden de residuos de telecomunicaciones y aparatos informáticos, los cuales han sido sometidos a un proceso mecánico y físico de separación. En los tratamientos de electrolixiviación, se estudiará el proceso sobre los distintos metales en los circuitos:

- pretratados via bioleaching en el PT4, los cuales no cuentan con los metales base ya que han sido disueltos en la etapa previa empleando los agentes generados por microorganismos. Esta es una corriente de menor densidad rica en metales preciosos
- Sin pretratar, donde aún están presentes los metales base como el cobre.

Esto se hace para evaluar el efecto de los metales base sobre el proceso de electrolixiviación, lo cual permite conocer mejor el sistema y aportar nuevas soluciones a la problemática abordada en el proyecto.

- Ratio líquido/sólido

El ratio L/S corresponde a la cantidad de agente lixivante o electrolito que hay por masa de residuo. Cuanto mayor sea el ratio líquido/sólido, la reacción es más rápida con el inconveniente de consumir más volumen de líquido y por tanto menores concentraciones finales para una etapa. Este ratio se puede modificar incrementando la cantidad de gramos pesada en cada ensayo o el volumen de electrolito en la celda. Para los casos de estudio, se trabaja con un volumen de líquido constante de 350 mL para 15 gramos de circuito sin pretratar. Esto hace un **L/S entre 20-25**, menor que los vistos en bibliografía (encontrados hasta de >100), lo que dificulta la extracción pero mejora el rendimiento y la sostenibilidad del proceso en conjunto.

- Temperatura

Todos los ensayos se realizan a **temperatura ambiente**. El incremento de temperatura mejora la disolución de los metales, pero supondría un consumo energético mayor, una evaporación del lixivante y por tanto un proceso menos sostenible. Las membranas de intercambio pierden propiedades a temperaturas superiores a la T^a ambiente por lo que se deben tener conductividades altas en ambos compartimentos que eviten el incremento de temperatura del medio o incluso refrigerar los compartimentos si fuera necesario.

- Homogeneización

Durante todos los ensayos se ha mantenido una **recirculación constante**. Esto se garantiza mediante una bomba peristáltica multicanal que permite recircular el líquido y distribuirlo entre los circuitos sin tocar componentes mecánicos de la bomba.

5.2. Lixiviación electro-asistida de metales valiosos

En esta tarea han tenido lugar los ensayos de electro lixiviación de los circuitos electrónicos, tanto pretratados (habiendo lixiviado los metales base previamente) como sin pretratar.

Sobre el tipo de residuo estudiado, uno de los inconvenientes inherente a la tipología

de los residuos, es la elevada complejidad del mismo debido a la variada composición de los circuitos electrónicos. En línea con esta característica, cabe destacar la incertidumbre con respecto representatividad de las muestras empleadas para el análisis. Existe una alta variabilidad en la composición de este residuo a pesar de intentar triturar y concentrar al máximo sus componentes, por tanto, conocer el rendimiento real de extracción. Esto se ha intentado solucionar mediante la digestión total del residuo que queda tras el tratamiento. Gracias a estos ensayos se ha podido proponer una secuencia de tratamiento en el siguiente paquete de trabajo.

Análisis de las muestras

La concentración de metales base se determinó mediante la espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) utilizando el espectrómetro PerkinElmer OPTIMA 2000™ con óptica de doble vista y un rango espectral de 160–900 nm. La concentración de los metales preciosos se determinó mediante espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) con una solución estándar de HNO₃ ultrapuro al 2%/HCl ultrapuro al 0,5% (iCAP Q/RQ Tune Solution Specpure, ThermoFisher). Las Diluciones en todos los casos fueron hechas 0.1: 100, acidificando en cada muestreo para evitar la precipitación de los metales. Todos los % están referidos a la cantidad de metal teórico contenido en la muestra según la tabla siguiente.

Tabla 3. Valores de referencia para los cálculos de rendimiento

%	Cu	Fe	Al	Zn	Pb	Ni	Sn	Cr	Ti	Ag	Pd	Au
INICIAL	25,85	11,27	2,75	1,2	1,07	1,61	1,43	0,61	0,86	0,097	0,0045	0,01455
SP	52,57	10,63	2,21	2,56	1,73	0,97	3,18	0,45	0,99	0,133	0,0105	0,01987
PRET	10,51	-	-	-	-	-	-	-	-	0,3296	0,0243	0,0498

Parámetros de estudio

A lo largo de esta tarea, se han planteado distintos ensayos para ver el efecto que tiene sobre la lixiviación de los metales los siguientes factores:

- Cantidad de Cloruros / cloro en el medio
- Cantidad de hierro
- Tipo de especie de Fe; Fe (II) y Fe (III)
- Ratio cloro/hierro según residuos de decapado
- Efecto Fenton o electrofenton

- Acidez del medio y control de pH
- Efecto del pretratamiento

Se priorizó el estudio de la composición frente al ratio solido liquido puesto que se sabe que a mayor ratio liquido solido se posee una mayor capacidad de lixiviación aunque los metales estén menos concentrados, y las condiciones que han sido fijadas en los siguientes estudios (como el tipo de electrodos, el ratio liquido solido o densidad de corriente), se han considerado las menos agresivas con el medio ambiente en comparación con el estado del arte actual según lo revisado en bibliografía.

Ensayos de electrolixiviación

Como electrolito se utilizan residuos ácidos de decapado reales y sintéticos con alta concentración de Cl^- para generación in situ de Cl_2 . Se potenciará la oxidación mediante la generación in situ del reactivo Fenton. Para los ensayos, se han usado como reactivos; cloruro sódico, sulfato sódico, sulfato ferroso, sulfato férrico, cloruro férrico y ácidos poco concentrados, por lo que se consideran reactivos no agresivos para el medio ambiente.



Figura 34. Electrolito después de diferentes ensayos

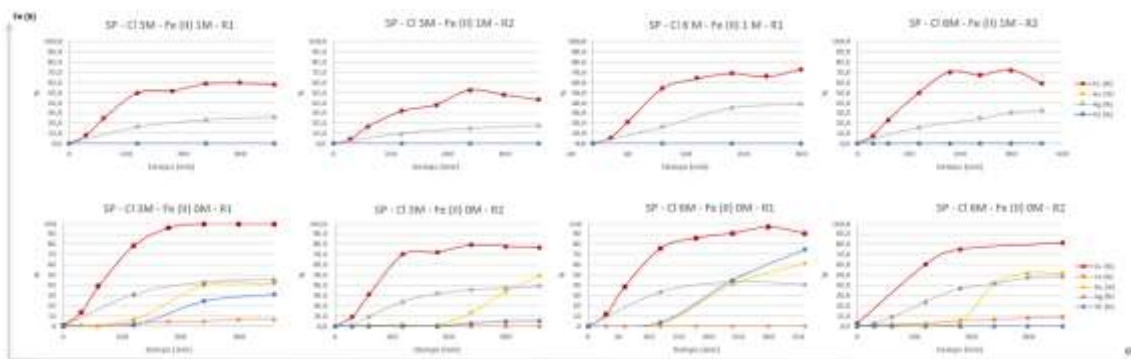


Figura 35. Ensayos de electrolixiviación realizados sin pretratamiento de los circuitos, a

distintas concentraciones de cloruros y de hierro en el electrolito. Rojo Cu – Gris Ag – Amarillo Au – Azul Pd.

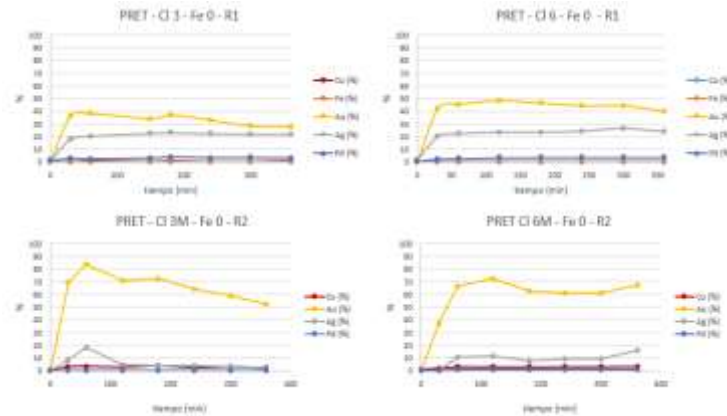


Figura 36. Ensayos de electrolixiviación realizados con pretratamiento de los circuitos, a distintas concentraciones de cloruros y de hierro en el electrolito. Rojo Cu – Gris Ag – Amarillo Au – Azul Pd.

Se realizaron digestiones con agua regia a temperatura sobre los sólidos resultantes en los ensayos con circuitos pre-tratados, reajustando el valor de la referencia a la cantidad total digerida+lixiviada (la cantidad real de metal en cada ensayo), quedando los resultados anteriores en los siguientes valores:

Tabla 4. Rendimientos extracción teniendo en cuenta digeridos. Ensayos con circuitos pretratados y sin hierro.

[Cloruros]	Repetición	Au (%)	Ag (%)
3	R1	60	32
3	R2	51	3
3	R3	30	60
6	R1	64	57
6	R2	56	84
6	R3	70	95

Tal y como se puede observar en la tabla anterior, no se aprecia gran diferencia en los rendimientos para el oro tanto en 3M de cloruros como para 6M de cloruros, aunque con diferencias del 50% entre distintos ensayos. En algunos ensayos, el rendimiento de extracción se ha visto aumentado y en otros disminuido tras haber hecho la digestión del concentrado, esto se debe a que en la muestra de cada día pueda haber más o menos metal en cuestión, es decir, a la gran variabilidad del residuo y la relativamente poca

cantidad de muestra. Por ello, serían necesarios más ensayos o incrementar la cantidad de residuo por ensayo.

Resumen y conclusiones PT5

Sobre el tipo de residuo estudiado, uno de los inconvenientes inherente a la tipología de los residuos, es la elevada complejidad del mismo debido a la variada composición de los circuitos electrónicos.

En línea con esta característica, cabe destacar la incertidumbre con respecto representatividad de las muestras empleadas para el análisis. Existe una alta variabilidad en la composición de este residuo a pesar de intentar triturar y concentrar al máximo sus componentes, por tanto, conocer el rendimiento real de extracción. Esto se ha intentado solucionar mediante la digestión total del residuo que queda tras el tratamiento.

- Una mayor cantidad de hierro no fomenta la lixiviación de ningún metal entre los que han sido analizados.
- Un incremento en la cantidad de cloruros no supone un incremento directo en el rendimiento de extracción
- Se ha visto una inhibición de la lixiviación de oro para los casos en los que se introduce Fe (II), tanto para el contenido bajo en cloruros como para el alto en cloruros
- La eliminación del cobre en una primera etapa acelera la extracción del oro, consiguiendo llegar al equilibrio del sistema antes de 2 horas de la lixiviación
- Si se introducen los circuitos sin pretratar en el sistema electrolítico se producen dos escenarios; la no lixiviación del oro en presencia de hierro (II) y por otro lado la lixiviación del oro cuando ya se ha lixiviado el cobre (tras las 2-3 horas de proceso)
- En el caso de la plata, se produce su lixiviación en la mayoría de los casos al 40% e incluso al 100%, presentando una gran variabilidad debido probablemente a la formación del AgCl como precipitado

PT 6. Estudio de recuperación de los metales y diseño de prototipo

6.1. Identificación de alternativas para la recuperación de los metales disueltos

En este paquete de trabajo se ha realizado la **optimización** y diseño de un proceso de lixiviación y recuperación de metales secuencial en base a los resultados obtenidos. Durante este paquete se ha desarrollado un proceso donde se contemplan las distintas etapas en función de los mejores resultados de rendimientos para fomentar su futura implantación en las empresas objetivo. Se ha realizado una revisión y concreción de las variables de interés para la extracción, definidos en los diagramas del proceso y se han evaluado los potenciales procedimientos de recuperación/purificación de los metales para permitir la valorización de cada corriente;

- Metales base: Cementación, precipitación, electrodeposición
- Metales de alto valor añadido: Precipitación e intercambio iónico.

6.2. Diseño de un proceso/prototipo para la extracción y purificación de metales

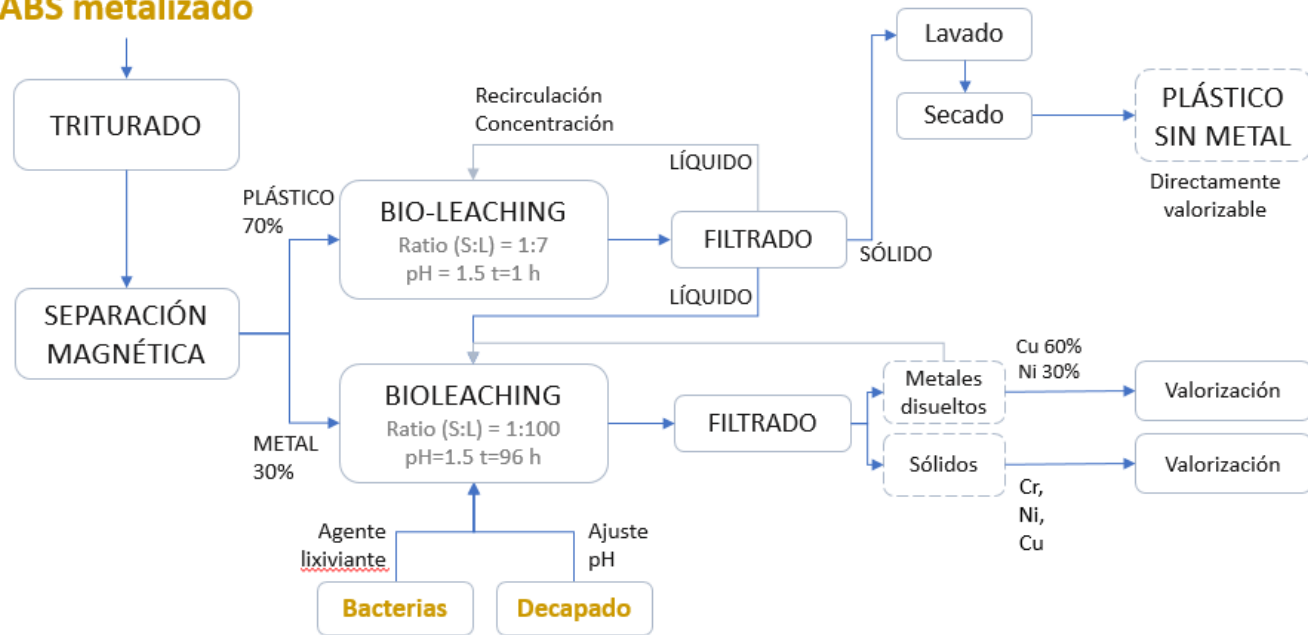
Dentro del diseño del proceso para la extracción y purificación de los metales, se han diseñado un procedimiento y proceso secuencial de lixiviación selectiva teniendo en cuenta los rendimientos de extracción y las posibilidades de extracción, presentando un esquema conceptual y con balance para cada uno de ellos.

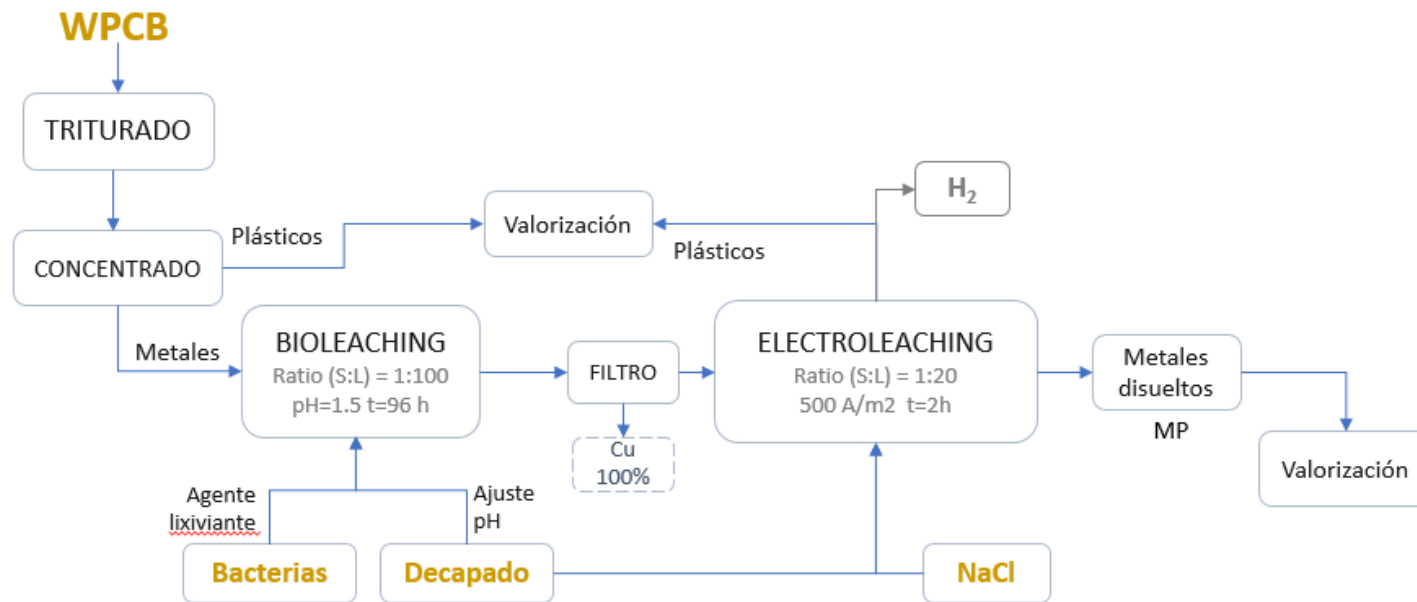
- El proceso de lixiviación se realiza de forma secuencial, para extraer en primer lugar una corriente líquida con los MB disueltos y obtener un residuo sólido concentrado en MP.
- Los metales preciosos se obtendrían en una segunda etapa empleando técnicas electroquímicas, con una disolución diferente a la inicial para facilitar la posterior recuperación de los MP.
- Los sistemas de recuperación/valorización de las corrientes dependen directamente del proceso de lixiviación seleccionado
- La corriente líquida con metales base tiene un alto contenido en hierro, por lo que, de las tecnologías planteadas, se evita la precipitación por la alta generación de lodos y la electrodeposición de MB por el bajo rendimiento encontrado en bibliografía para estos metales en presencia de Fe.
- Se plantea la cementación del Cu y Ni como principal tecnología para la obtención de los MB en formato metal sólido, esperando un buen rendimiento

y pureza así como un reaprovechamiento de la disolución rica en hierro para recuperar el mismo como FeSO_4 , reutilizable como alimento para el cultivo de las bacterias ferroxidantes.

- La disolución resultante podría reutilizarse en el proceso o bien tratarse para recuperar en forma de hidróxidos los posibles metales disueltos.
- La recuperación de metales preciosos tras la electrolixiviación (con posible recirculación para reconcentrar) se realizaría empleando la tecnología del intercambio iónico empleando resinas aniónicas ya que se trata de una tecnología ampliamente estudiada para estos elementos y adecuada para el rango de concentraciones obtenido en el proceso incluso en presencia de cloruros.

ABS metalizado





PT 7. Evaluación técnico-económica y medioambiental de la tecnología

Durante este paquete de trabajo, se han realizado las siguientes acciones:

7.1. Evaluación de la viabilidad de la nueva iniciativa

Desarrollo de una evaluación de la viabilidad de las iniciativas planteadas, que contemple el análisis **técnico, ambiental, legislativo y económico**; comparando los procesos convencionales con los nuevos procesos planteados

Con respecto a la recuperación de metales extraídos de los aparatos eléctricos y electrónicos hay que tener en cuenta que éstos contienen además de metales valiosos pueden contener sustancias potencialmente contaminantes, convirtiéndose en un residuo complejo a la hora de reciclar debido a la gran variabilidad de componentes, sus constantes cambios y la composición y las características de estos. Dichas propiedades intrínsecas encontradas principalmente en las placas de circuito impreso (PCB) condicionan el reciclaje de este tipo de residuos.

Con respecto a la recuperación del metal de las piezas de plástico recubiertas con metal se realiza mediante una recolección de las piezas para ser enviadas al extranjero. Las técnicas convencionales de recuperación de estos metales se corresponden con técnicas de fundición y uso de ácidos agresivos que permite la recuperación de parte del material mediante el resto es enviado a los vertederos

Para complementar los resultados del trabajo desarrollado, se ha realizado un estudio de viabilidad de la nueva metodología para la recuperación de metales contenidos en equipos, aparatos eléctricos y electrónicos; así como en piezas de plástico con recubrimiento metalizado.

La nueva metodología de recuperación de metales, como se describe en los paquetes de trabajo anteriores, consiste en una lixiviación secuencial en dos etapas, empleo de microorganismos (bioleaching) y técnicas electroquímicas (electroleaching).

El análisis de la viabilidad contempla en conocer de forma, principalmente, cualitativa como influyen los factores técnico-legislativas, ambientales, económicos y de mercado sobre la puesta en marcha del proyecto. Con respecto a los factores:

- **Factores tecnológicos:** donde se analiza la complejidad de la aplicación de la tecnología y si a su vez responde a las necesidades y especificaciones técnicas requeridas. Teniendo en cuenta aspectos como la tecnología y el equipamiento necesario, la necesidad de recursos para llevar a cabo la aplicación de las nuevas técnicas y el análisis de la calidad de los resultados obtenidos
- **Factores ambientales:** El análisis de los aspectos ambientales permite detectar los cambios que a nivel ambiental va a suponer la ejecución del proyecto y analizar como dichos cambios pueden influir con el objetivo de la nueva iniciativa, de tal forma que en ningún caso se traslade la contaminación ambiental de un medio a otro.
- **Factores legislativos:** Dichos factores valoran si es necesaria la solicitud de nuevos permisos administrativos relacionados con algún nuevo aspecto ambiental generado o si hay algún requisito legal de aplicación para un nuevo aspecto ambiental generado, etc.
- **Factores de mercado:** el estudio de los factores de mercado analiza si el esfuerzo a realizar compensará el beneficio o beneficios que se obtendrá con el desarrollo del proyecto, analizando la posible demanda, la oferta, la aceptación del producto/servicio, etc.
- **Factores económicos:** Para el análisis de la viabilidad económica se requiere disponer de datos correspondientes a la estimación de costes, de recursos humanos y materiales, en servicios externos como laboratorios, costes de formación o asesoramiento para llevar a cabo la nueva solución, beneficios previstos, etc. Con el fin de poder realizar una estimación de los costes económicos de la ejecución del proyecto, así como de los beneficios que se podrían obtener, obteniéndose los siguientes indicadores, que determinan la viabilidad de los proyectos de simbiosis industrial:

Para mejorar la gestión, anticiparse a los posibles problemas e incidencias que puedan surgir cuando se quiere poner en marcha un proyecto sobre nuevas iniciativas de sostenibilidad como son acciones de simbiosis, es un requisito necesario previo disponer de datos que permitan analizar los riesgos asociados ya que podrían llegar a suponer el fracaso de la iniciativa y poder de esta forma tomar la decisión más acertada antes de realizar una inversión determinada.

Para el análisis de los factores se ha utilizado el módulo de proyectos de la plataforma de simbiosis industrial desarrollada por AIDIMME, con una serie de modificaciones y los

resultados han sido trasladados a una tabla de recogida de resultados.

7.2. Estudio de los distintos flujos de salida del nuevo proceso y propuesta de clasificación como residuos, subproductos o fin de condición de residuo

Se han estudiado los distintos flujos de salida del proceso de lixiviación y se han clasificado según la Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular en residuos, subproductos o fin de condición de residuo. Con ello, se pretende facilitar una futura adopción de la tecnología por las empresas objetivo.

Los flujos de salida generados mediante la aplicación de las nuevas técnicas se corresponden con:

- Emisiones: La utilización de estas técnicas no produce emisiones COVs debido al uso de temperatura ambiente. Se considera este flujo despreciable.
- Vertidos: Mediante la utilización de estas técnicas se minimiza la contaminación de los vertidos, debido al uso de ácidos menos agresivos. Minimizando el PH de los vertidos y la concentración de cianuros.
- Residuos: Por un lado, se obtienen metales disueltos (objeto del proyecto), plástico y fibra de vidrio. Ambos residuos adicionales se pueden valorizar mediante un análisis exhaustivo de su composición y usos posteriores.

De estos flujos hay que destacar que los residuos generados tras la aplicación de las técnicas y siguiendo la legislación de aplicación se podría considerar la condición de fin de condición de residuo para poder ser reintroducidos en el mercado.

Con respecto a los flujos de entrada para la aplicación de estas nuevas técnicas es necesario el uso de materias primas como son ácidos de bacterias y ácidos menos agresivos comparado con el uso de las técnicas convencionales. Así como el desarrollo de procesos de pretratamiento y postratamiento de las muestras obtenidas.

Como flujo de entrada además se utiliza el decapado ácido agotado procedente de otra empresa. En este caso es necesario que esta sustancia o producto cumpla con la condición de subproducto.

7.3. Propuesta de caracterización del decapado ácido como subproducto

A lo largo de esta tarea se ha estudiado y generado la documentación necesaria para solicitar ante la administración la consideración del decapado ácido como un subproducto ante la administración de la comunidad valenciana.

En dicha tarea se ha realizado un estudio de caracterización del decapado ácido agotado de una empresa del sector de la galvanotecnia para validar su uso como subproducto y de esta forma ser considerada como materia prima secundaria en otras industrias del sector metal. Tras la caracterización del residuo generado, se ha preparado la documentación técnica necesaria para solicitar ante la administración la consideración del decapado ácido como un subproducto.

Tras el análisis de la sinergia entre dos empresas en las que una de las empresas (empresa TOMADORA) le podría interesar utilizar dentro de su proceso productivo la salida (residuo) de otra empresa (en adelante DADOR) se revisaron el estado de la legislación para la puesta en marcha de la sinergia de intercambio. Tras la revisión de la información de las analíticas y de los datos obtenidos de los ensayos tras el intercambio de las primeras muestras, se procedió a la documentación para la preparación del informe que acompañaría a la solicitud de la condición de subproducto para su posible intercambio y de esta forma materializar el concepto de simbiosis industrial.

Recogida de muestras de las distintas líneas de producción de la empresa DADORA y caracterización del residuo (decapado ácido) a través de la realización de ensayos en los laboratorios. Los datos clave, en este caso, se corresponden con el dato de la concentración de hierro y Zinc.

Para el desarrollo de la actividad ha sido necesario establecer una sistemática de revisión entorno a la legislación de aplicación. En concreto, en el mes de Abril del 2022 se publicó la nueva Ley de Residuos y suelos contaminados para una Economía Circular, en la que se revisaban y se modificaban determinados aspectos de la Ley 22/2011, como la responsabilidad del productor del residuo, la aplicación de los conceptos de subproducto y fin de la condición de residuo, y se procedía a la actualización del régimen sancionador y el refuerzo sobre la recogida separada de los residuos, con el objetivo de permitir un reciclado de alta calidad y estimular la utilización de materias primas secundarias de calidad. (BOE, 2022)

Con respecto a cómo ésta afectaba al desarrollo del proyecto, la ley establece las figuras de Subproducto y Fin de Condición de Residuo, regulando los procedimientos pero dejando la posibilidad de aplicación a nivel autonómico.

A finales de noviembre del 2022 se publicó la ley 5/2022, de 29 de noviembre, de la Generalitat, de residuos y suelos contaminados para el fomento de la economía circular en la Comunitat Valenciana en la que se indicaba que para conseguir la transición hacia la economía circular era necesario realizar una correcta gestión de los residuos. De esta forma se conseguiría evitar el derroche de materiales, incrementar la eficiencia en el uso de recursos y energía, utilizar fuentes de energía renovables, proteger el medio ambiente, restaurar la biodiversidad y realizar una transición ecológica para reducir la vulnerabilidad.

Es en esta ley la que recoge la figura de subproducto y fin de condición de residuo, indicando las competencias para su evaluación y autorización. Y en el artículo 36 indica que el Consell tendrá que poner en marcha líneas de ayuda y promoción de proyectos de investigación, desarrollo e innovación (I+D+I) e iniciativas de interés social en relación con:

- el ecodiseño.
- la obtención y utilización de materiales no tóxicos en la producción de bienes y servicios.
- la obtención y utilización de materias primas renovables y de materiales recuperados y reciclados.
- la reutilización de productos.
- la reparación de productos.
- la simbiosis industrial.
- las operaciones de gestión de residuos que minimizan su impacto ambiental y climático.
- la aplicación de los criterios de economía circular a las cadenas de valor de bienes y servicios.
- la formación y la educación ambiental para la prevención y gestión de residuos. (Diario Oficial de la Generalitat Valenciana, 2022)

Tras estos cambios surgidos a finales del proyecto, nos encontramos en un periodo de indefinición ya que la solicitud de evaluación de una sustancia como subproducto no se

puede redirigir al Ministerio y en Conselleria no se ha definido el procedimiento que de actuación por parte de las empresas interesadas en solicitar una autorización.

Finalmente, a finales de septiembre se publica el procedimiento para solicitar a través de la Conselleria la evaluación y autorización de una sustancia objeto de un proceso productivo como subproducto. Tras la publicación se ha analizado el contenido de la memoria preparada para adaptar la información a las nuevas prescripciones.

Conclusiones PT7

El desarrollo del presente paquete de trabajo ha permitido realizar un estudio de viabilidad técnico ambiental legislativo, de mercado y económico de las nuevas técnicas de recuperación de metales estudiadas a lo largo del proyecto

El estudio realizado se ha basado en el análisis de determinados aspectos, categorizados en los factores anteriores, de forma cualitativa y la realización de un estudio económico simplificado de cara a conocer la posibilidad de escalado de las técnicas innovadoras de reciclado y extracción de metales.

Además del estudio de las técnicas de recuperación de metales procedentes de aparatos eléctricos y electrónicos, y de las piezas de plástico metalizadas, se ha analizado el uso de decapados ácidos agotados como residuo de una empresa como materia prima secundaria de otra empresa para ser introducido en su proceso productivo, manteniendo de este modo los recursos en uso productivo durante más tiempo.

Con respecto al estudio llevado a cabo de caracterización del decapado ácido agotado para su uso como materia prima secundaria, se ha verificado la viabilidad técnica, económica y se ha comprobado el condicionamiento para garantizar que la sustancia cumple con las indicaciones adecuadas para su solicitud como subproducto.

3. Conclusiones

Se ha desarrollado una metodología de bajo impacto ambiental para el tratamiento y recuperación de los metales base (Cu, Ni, Cr...) y de alto valor añadido (Au, Ag, Pt...) contenidos en **circuítos** de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) **y en plásticos metalizados**. La metodología se basa en la economía circular y el empleo secuencial de microorganismos (bio-leaching) y técnicas electroquímicas (electro-leaching).

En LIXMIX se ha desarrollado un **tratamiento secuencial** en el cual, durante la primera etapa se recuperan los metales base con agentes lixiviantes generados por distintos microorganismos. Para ello, se han seleccionado y cultivado los **microorganismos** adecuados a través de la combinación de distintas cepas, estudiando y adecuando las condiciones del medio para la generación del agente lixiviante. Una vez obtenido, se han optimizado las variables de cada proceso (plásticos y circuítos) para maximizar la extracción de metales en condiciones de bajo impacto ambiental.

Se han obtenido rendimientos de >95% para la extracción del **cobre** de los circuítos, permitiendo concentrar los metales valiosos para la siguiente etapa del proceso. Para los plásticos metalizados, se ha obtenido un alto porcentaje en la extracción de los diferentes metales contenidos, permitiendo también la valorización del plástico ABS.

Durante la segunda etapa de la propuesta LIXMIX, en el tratamiento **electroquímico**, se ha empleado un agente lixiviante de bajo impacto, logrando las condiciones oxidantes necesarias para disolver los **metales preciosos** mediante las reacciones que tienen lugar en los electrodos, evitando así la adición de compuestos cancerígenos como los cianuros o disolventes. En este proceso, se ha obtenido un rendimiento satisfactorio de los metales de alto valor añadido en un tiempo de operación relativamente corto, a temperatura ambiente y con un bajo consumo energético.

Por último, el proyecto ha abordado el estudio de las **condiciones legales y permisos** administrativos necesarios para la consideración como subproductos de los residuos ácidos utilizados como materia prima la metodología. Para ello se ha presentado un proyecto a la administración competente, estando a la espera de resolución.

Con la colaboración de:



AIDIMME

INSTITUTO TECNOLÓGICO

Domicilio fiscal —

C/ Benjamín Franklin 13. (Parque Tecnológico)

46980 Paterna. Valencia (España)

Tlf. 961 366 070 | Fax 961 366 185