



Universidad de Jaén

Escuela Politécnica Superior
de Linares

Desarrollo de metodología no convencional para la recuperación de metales presentes en los residuos electrónicos

Alumno: Sergio Díaz Pérez

Tutor: Prof. D. Francisco Javier Iglesias Godino
Depto.: Ingeniería Química, Ambiental y de los Materiales.

Septiembre, 2019



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Máster en Ingeniería de Minas

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DESARROLLO DE METODOLOGÍA NO CONVENCIONAL PARA LA
RECUPERACIÓN DE METALES PRESENTES EN LOS RESIDUOS
ELECTRÓNICOS

Alumno: Sergio Díaz Pérez

Tutor: Prof. D. Francisco Javier Iglesias Godino

Depto.: Ingeniería Química, Ambiental y de los Materiales.

Firma Alumno:

Firma Tutor:

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	10
ABSTRACT	11
1. INTRODUCCIÓN	12
2. OBJETIVOS	14
2.1. Objetivos Generales.....	14
2.2. Objetivos Específicos	14
3. ESTADO DEL ARTE	16
3.1. Definición y clasificación de los residuos electrónicos.....	16
3.2. Normativa aplicable.....	18
3.2.1. Directivas	18
3.2.2. Real Decreto.....	18
3.3. Generación de residuos electrónicos	19
3.3.1. Impacto ambiental causado.....	21
3.3.2. Contenido metálico de los residuos electrónicos	22
3.3.3. Ejemplo de la importancia estratégica de este tipo de elementos:	23
3.4. Gestión de los residuos electrónicos.....	23
3.5. Reciclado de RAEE	24
3.6. Aplicación de hidrometalurgia para extracción de metales en RAEE.....	29
4. MATERIALES Y MÉTODOS	32
4.1. MATERIALES.....	32
4.1.1. Residuo electrónico.....	32
4.1.2. Ácido sulfúrico.....	32
4.1.3. Agua de análisis	33
4.2. MÉTODOS.....	33
4.2.1. Caracterización inicial de residuo utilizado.	34
- Fluorescencia de rayos X (FRX).....	37

4.2.2. Extracción de material férrico. Separación magnética.....	38
4.2.3. Extracción de elementos mediante métodos hidrometalúrgicos	39
5. RESULTADOS Y DISCUSIONES	44
5.1. Caracterización inicial del residuo. Técnica FRX.	44
5.2. Caracterización material férrico. Técnica μ FRX.....	45
5.3. Resultados extracción de elementos mediante métodos hidrometalúrgicos. ICP masa	50
5.3.1. Resultados ICP masa fracción $< 0'63$ mm [ANALISIS CUANTITATIVO]	52
5.3.2. Resultados ICP masa fracción $< 0'63$ mm [ANALISIS SEMICUANTITATIVO]	60
5.3.3. Resultados ICP masa fracción $0'63 - 2$ mm [ANALISIS CUANTITATIVO]	69
5.3.4. Resultados ICP masa fracción $0'63 - 2$ mm [ANALISIS SEMICUANTITATIVO]	76
5.3.5. Principales porcentajes metálicos obtenidos en fracción $< 0'63$ mm respecto a muestra inicial.....	84
5.3.6. Principales porcentajes metálicos obtenidos en fracción $0'63 - 2$ mm respecto a muestra inicial.....	88
6. CONCLUSIONES	93
7. TRABAJOS Y LINEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS	93
8. ANEXOS	95
8.1. ANEXO I.	95
- FRX FRACCIÓN I: $< 0'63$ mm	96
- FRX FRACCIÓN II: $0'63 - 2$ mm.....	97
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Situación crítica de países en vías de desarrollado	20
Figura 2 - Proceso de gestión de residuos electrónicos	24
Figura 3 – Pretratamiento de reciclaje en RAEE.....	25
Figura 4 – Molino empleado para trituración de residuo	34
Figura 5 - Resultados tras trituración de residuo	35
Figura 6 - Fracciones resultantes tras el tamizado	35
Figura 7 – Molino mezclador RETSCH MM220	36
Figura 8 - Esquema de emisión de radiación en técnica FRX.....	37
Figura 9 – Residuo Fracción I	38
Figura 10 – Materiales ferrosos extraídos	38
Figura 11 – Separación magnética con imán	38
Figura 12 – Precipitación de residuo	40
Figura 13 – Muestras tomadas durante proceso de lixiviación.....	42
Figura 14 – Proceso técnica ICP Masa y principales componentes	43
Figura 15 – Punto I de referencia de probeta.....	47
Figura 16 - Punto II de referencia de probeta	48
Figura 17 - Punto III de referencia de probeta.....	49
Figura 18 – Desarrollo cálculo de concentraciones de elementos	51
Figura 19 – Resultados comparativos entre Pb y Cu	83
Figura 20 – Ejemplo electrolisis	94

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 - Clasificación de RAEE por líneas de color	17
Tabla 2- Desglose de la cantidad de residuos generados por continentes	19
Tabla 3 – Evolución generación de RAEE	20
Tabla 4 - Impacto ambiental durante el ciclo productivo de los RAEE	21
Tabla 5 – Limitaciones del tratamiento pirometalúrgico.....	27
Tabla 6 – Principales agentes lixiviantes utilizados [22].....	28
Tabla 7 – Limitaciones del tratamiento hidrometalúrgico.....	28
Tabla 8 – Ventajas e inconvenientes tratamiento biometalúrgico	29
Tabla 9 – Resultados tras trituración de residuo.....	36
Tabla 10 – Resumen peso fracciones obtenidas.	39
Tabla 11 – Concentraciones empleadas para lixiviación.....	40
Tabla 12 – Concentraciones molares de muestras diluidas	41
Tabla 13 - Resultados FRX. Fracción < 0'63 mm.....	44
Tabla 14 – Resultados FRX. Fracción 0'63-2 mm	45
Tabla 15 – Resultado FRX muestras magnéticas separadas de fracción < 0'63 mm	46
Tabla 16 – Resultados obtenidos en punto I de análisis	47
Tabla 17 - Resultados obtenidos en punto II de análisis	48
Tabla 18 - Resultados obtenidos en punto III de análisis	49
Tabla 19 – Concentración de Li en residuo (<0'63 mm).....	52
Tabla 20 - Concentración de Mg en residuo (<0'63 mm)	52
Tabla 21 - Concentración de Al en residuo (<0'63 mm).....	53
Tabla 22 - Concentración de Ti en residuo (<0'63 mm)	53
Tabla 23 - Concentración de Ti en residuo (<0'63 mm)	54
Tabla 24 - Concentración de Cr en residuo (<0'63 mm).....	54
Tabla 25 - Concentración de Mn en residuo (<0'63 mm)	55
Tabla 26 - Concentración de Fe en residuo (<0'63 mm).....	55
Tabla 27 - Concentración de Fe en residuo (<0'63 mm).....	56
Tabla 28 - Concentración de Fe en residuo (<0'63 mm).....	56
Tabla 29 - Concentración de Cu en residuo (<0'63 mm)	57
Tabla 30 - Concentración de Zn en residuo (<0'63 mm)	58
Tabla 31 - Concentración de Sb en residuo (<0'63 mm).....	58

Tabla 32 - Concentración de Pb en residuo (<0'63 mm).....	59
Tabla 33 - Concentración de Sc en residuo (<0'63 mm).....	60
Tabla 34 – Concentración Ga en residuo (<0'63 mm)	61
Tabla 35 – Concentración Zr en residuo (<0'63 mm)	61
Tabla 36 - Concentración In en residuo (<0'63 mm)	62
Tabla 37 - Concentración Sn en residuo (<0'63 mm)	62
Tabla 38 - Concentración Cs en residuo (<0'63 mm)	63
Tabla 39 - Concentración Ba en residuo (<0'63 mm)	63
Tabla 40 – Concentración La en residuo (<0'63 mm).....	64
Tabla 41 - Concentración Ce en residuo (<0'63 mm)	64
Tabla 42 – Concentración Pr en residuo (<0'63 mm)	65
Tabla 43 - Concentración Nd en residuo (<0'63 mm).....	65
Tabla 44 – Concentración Sm en residuo (<0'63 mm).....	66
Tabla 45 - Concentración Gd en residuo (<0'63 mm).....	66
Tabla 46 – Concentración Dy en residuo (<0'63 mm)o	67
Tabla 47 - Concentración Th en residuo (<0'63 mm)	67
Tabla 48 – Concentración U en residuo (<0'63 mm)	68
Tabla 49 – Concentración Mg en residuo (0'63 – 2 mm).....	69
Tabla 50 – Concentración Al en residuo (0'63 – 2 mm)	69
Tabla 51 – Concentración V en residuo (0'63 – 2 mm)	70
Tabla 52 – Concentración Ti en residuo (0'63 – 2 mm).....	70
Tabla 53 – Concentración Cr en residuo (0'63 – 2 mm)	71
Tabla 54 – Concentración Mn en residuo (0'63 – 2 mm).....	71
Tabla 55 – Concentración Fe en residuo (0'63 – 2 mm)	72
Tabla 56 – Concentración Co en residuo (0'63 – 2 mm)	72
Tabla 57 – Concentración Ni en residuo (0'63 – 2 mm)	73
Tabla 58 – Concentración Cu en residuo (0'63 – 2 mm)	73
Tabla 59 – Concentración Zn en residuo (0'63 – 2 mm).....	74
Tabla 60 – Concentración Sb en residuo (0'63 – 2 mm).....	74
Tabla 61 – Concentración Pb en residuo (0'63 – 2 mm).....	75
Tabla 62 – Concentración Ga en residuo (0'63 – 2 mm)	76
Tabla 63 – Concentración Zr en residuo (0'63 – 2 mm)	77
Tabla 64 - Concentración In en residuo (0'63 – 2 mm)	77
Tabla 65 – Concentración Sn en residuo (0'63 – 2 mm).....	78

Tabla 66 – Concentración Cs en residuo (0'63 – 2 mm).....	78
Tabla 67 – Concentración Ba en residuo (0'63 – 2 mm).....	79
Tabla 68 – Concentración La en residuo (0'63 – 2 mm).....	79
Tabla 69 – Concentración Pr en residuo (0'63 – 2 mm).....	80
Tabla 70 – Concentración Nd en residuo (0'63 – 2 mm)	80
Tabla 71 – Concentración Sm en residuo (0'63 – 2 mm).....	81
Tabla 72 – Concentración Dy en residuo (0'63 – 2 mm)	81
Tabla 73 – Concentración Th en residuo (0'63 – 2 mm).....	82
Tabla 74 – Concentración U en residuo (0'63 – 2 mm)	82
Tabla 75 - % Li en muestra inicial de residuo (< 0'63 mm).....	84
Tabla 76 - % Mg en muestra inicial de residuo (<0'63 mm).....	84
Tabla 77 - % Al en muestra inicial de residuo (< 0'63 mm)	84
Tabla 78 - % Ti en muestra inicial de residuo (< 0'63 mm).....	85
Tabla 79 - % V en muestra inicial de residuo (< 0'63 mm)	85
Tabla 80 - % Cr en muestra inicial de residuo (< 0'63 mm)	85
Tabla 81 - % Mn en muestra inicial de residuo (< 0'63 mm).....	86
Tabla 82 - % Fe en muestra inicial de residuo (< 0'63 mm)	86
Tabla 83 - % Co en muestra inicial de residuo (< 0'63 mm)	86
Tabla 84 - % Ni en muestra inicial de residuo (< 0'63 mm)	86
Tabla 85 - % Cu en muestra inicial de residuo (< 0'63 mm)	87
Tabla 86 - % Zn en muestra inicial de residuo (< 0'63 mm).....	87
Tabla 87 - % Sb en muestra inicial de residuo (< 0'63 mm).....	87
Tabla 88 - % Pb en muestra inicial de residuo (< 0'63 mm).....	88
Tabla 89 - % Sn en muestra inicial de residuo (< 0'63 mm).....	88
Tabla 90 - % Mg en muestra inicial de residuo (0'63 – 2 mm).....	88
Tabla 91 - % Al en muestra inicial de residuo (0'63 – 2 mm)	89
Tabla 92 - % Ti en muestra inicial de residuo (0'63 – 2 mm).....	89
Tabla 93 - % V en muestra inicial de residuo (0'63 – 2 mm)	89
Tabla 94 - % Cr en muestra inicial de residuo (0'63 – 2 mm)	89
Tabla 95 - % Mn en muestra inicial de residuo (0'63 – 2 mm).....	90
Tabla 96 - % Fe en muestra inicial de residuo (0'63 – 2 mm)	90
Tabla 97 - % Co en muestra inicial de residuo (0'63 – 2 mm).....	90
Tabla 98 - % Ni en muestra inicial de residuo (0'63 – 2 mm)	91
Tabla 99 - % Cu en muestra inicial de residuo (0'63 – 2 mm).....	91

Tabla 100 - % Zn en muestra inicial de residuo (0'63 – 2 mm).....	91
Tabla 101 - % Sb en muestra inicial de residuo (0'63 – 2 mm)	92
Tabla 102 - % Pb en muestra inicial de residuo (0'63 – 2 mm)	92
Tabla 103 - % Sn en muestra inicial de residuo (0'63 – 2 mm)	92

RESUMEN

El presente proyecto se basa en el desarrollo de una metodología no convencional capaz de lograr la extracción de los metales de interés que conforman la estructura interna de los residuos electrónicos. Esto nos permitirá obtener metales pesados de elevado valor económico y conseguir dar un aprovechamiento a los residuos electrónicos generados y, por tanto, llevar a cabo su reintroducción en el ciclo productivo.

La metodología de ensayo que se ha llevado a cabo para alcanzar los objetivos propuestos ha abarcado diferentes etapas, desde la selección y preparación de muestras del residuo objeto de estudio hasta la caracterización y lixiviación de los elementos encontrados en la estructura interna del mismo.

Como resultado de la fase de preparación de muestras se obtienen dos fracciones con diferente granulometría: Fracción I: $<0{,}63$ mm y Fracción II: $0{,}63 - 2$ mm

La caracterización de ambas fracciones se llevó a cabo antes del tratamiento, mediante la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX). Posteriormente, las fracciones de residuo son sometidas a proceso de separación de materiales férricos, siendo caracterizados los materiales separados mediante la técnica de microfluorescencia de rayos X.

Por último, el residuo ha sido sometido a lixiviación ácida empleando como agente lixivante ácido sulfúrico (H_2SO_4) en concentraciones molares iguales a 2M, 4M, 6M y 8M. Para la caracterización de los lixiviados se utilizó la técnica de espectrometría de masa de plasma (ICP Masa).

ABSTRACT

The main objective of this experimental project will be consist of the development of a non-conventional methodology that achieve the extraction of the metals that results interesting and are integrated in the WEEE structure. The method will be developed on a laboratory scale. This will allow us to take advantage of the generated electronic waste getting metals with high value and carry out its reintroduction in the productive cycle.

The test methodology that was carried out to achieve the proposed objectives has covered different stages, from the selection and preparation of samples of residue to the characterization and leaching of the elements found in its internal structure.

As a result of the size reduction phase, two fractions with different granulometry are obtained: Fraction I: <0.63 mm and Fraction II: 0.63 - 2 mm

The characterization of both fractions was carried out before the treatment by X-ray fluorescence technique. Subsequently, the waste fractions are subjected to a process of separation of ferrous materials and the separated materials being characterized by the X-ray microfluorescence technique.

Finally, the waste fractions are submitted to acid leaching using sulfuric acid (H_2SO_4) as a leaching agent in molar concentrations equal to 2M, 4M, 6M and 8M. The characterization of the leached was carried out by ICP Mass technique.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la evolución tecnológica generada durante los últimos años va acompañada de una alta producción de residuos electrónicos (RAEE). La mayoría de estos residuos están formados por metales pesados (muy valiosos tanto económica como estratégicamente) y por compuestos orgánicos, lo cual conlleva elevados riesgos medioambientales y para la salud humana, si no son tratados correctamente.

Con el propósito de volver a integrar los residuos en el ciclo productivo, de manera que se puedan obtener nuevas materias primas, a la vez que eliminamos el riesgo medioambiental que supone su tratamiento inadecuado, surge el concepto “Urban Mining” o “Minería Urbana” cuya definición adaptada según diversos artículos aparece como, el conjunto de procesos de recuperación de los residuos procedentes de materiales secundarios valiosos (tales como metales férricos y no férricos) para ser usados posteriormente en la fabricación de nuevos productos, [1].

Apoyándonos en este concepto y en busca de la revalorización de una fuente de residuos cada vez más evolutiva, surge el presente proyecto con el objetivo de desarrollar una metodología no convencional capaz de permitirnos obtener una fuente alternativa de materias primas. De esta manera, obtendremos materiales de alto valor tanto económico como estratégico, solucionamos el problema ambiental generado por esta fuente de residuos y se plantea una alternativa a la minería tradicional. reduciendo el consumo de materias primas finitas en la naturaleza.

Para alcanzar los objetivos propuestos, se ha desarrollado un proceso experimental basado en métodos hidrometalúrgicos. En este método se lleva a cabo una etapa de trituración y clasificación granulométrica para preparar las muestras de residuo y que a posteriori sean sometidas a lixiviaciones químicas hasta lograr identificar y obtener los diferentes elementos que conforman la estructura interna de nuestro residuo.

Para evitar saturaciones en las reacciones provocadas, también se lleva a cabo una fase de separación de las fracciones de material férrico.

Las diferentes fracciones de residuo obtenidas son caracterizadas tanto de manera previa como posterior al tratamiento, obteniendo resultados semejantes en las diferentes metodologías de ensayo llevadas a cabo. No obstante, se logra determinar que el cobre es el elemento con las concentraciones más elevadas, obteniendo valores de hasta el 10 %.

Los valores obtenidos dependen para cada caso de una serie de factores, como son: tiempo de exposición, concentración molar de disolución y temperatura. Estos factores variaran en base al tipo de elemento que se desee extraer.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal del presente estudio se basa en la recuperación de metales integrados en la estructura de tarjetas electrónicas de circuito impreso procedentes de residuos electrónicos.

2.1. Objetivos Generales

Valorizar los residuos electrónicos generados y que actualmente se destinan a vertederos y puntos limpios provocando con ello el final de su vida útil, siendo susceptibles de ser aprovechados ya que la mayoría poseen metales pesados de alto valor económico, además de ser altamente tóxicos y perjudiciales para el medio ambiente.

2.2. Objetivos Específicos

Desarrollar e implementar un procedimiento hidrometalúrgico para la obtención de metales pesados integrados en la estructura de los residuos electrónicos, empleando H_2SO_4 como agente lixivante, de manera que, se logre estimar la cantidad de metales que se pueden recuperar de los residuos electrónicos.

- **Objetivos Técnicos**

Reducción de residuo a tamaño de partícula inferior a 2 mm

Separación magnética de elementos.

Caracterizar los distintos metales a recuperar mediante técnica FRX (vía seca)

Lixiviación de fracciones residuales obtenidas.

Caracterizar muestras de lixiviados mediante técnica ICP masa (vía húmeda)

Determinar la composición metálica a recuperar del residuo lixiviado.

- **Objetivos Medioambientales**

Reducir el impacto ambiental generado por los recursos necesarios para la fabricación de los aparatos electrónicos, así como la toxicidad y contaminación que provocan algunos compuestos químicos integrados en su estructura.

Fomentar la minería urbana, mediante la reintroducción en el ciclo productivo, de una fuente de residuos cada vez más evolutiva.

Reducir el impacto ambiental causado por la minería tradicional, estableciendo una fuente de recursos alternativa.

- **Objetivos Económicos**

Fomentar la economía circular la cual pretende desvincular, a gran escala y de manera extendida en toda la sociedad, el crecimiento económico del consumo de recursos finitos.

- **Objetivos Estratégicos**

Obtener materias primas escasas en la naturaleza y de alto valor económico dado la criticidad de sus aplicaciones. Los residuos electrónicos poseen en su estructura elementos de las denominadas ‘‘tierras raras’’. Actualmente China controla el 97 % del mercado de este tipo de metales, por ello se considera de alto valor estratégico la recuperación de este tipo de elementos dada la dependencia de la UE con respecto a China.

3. ESTADO DEL ARTE

A lo largo de las últimas décadas hemos podido observar un crecimiento acelerado en la industria tecnológica, este crecimiento nos ha ayudado a alcanzar un alto nivel de desarrollo. Sin embargo, como es lógico, proporcionalmente se ha provocado un incremento en la generación de residuos electrónicos, provocado elevados riesgos medioambientales y para la salud humana.

3.1. Definición y clasificación de los residuos electrónicos

De acuerdo con el artículo 3.a del Real Decreto 110/2015, de 20 de febrero, se consideran aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) a todos los aparatos que para funcionar debidamente necesitan corriente eléctrica o campos electromagnéticos, y los aparatos necesarios para generar, transmitir y medir tales corrientes y campos, que están destinados a ser utilizados con una tensión nominal no superior a 1.000 V en corriente alterna y 1.500 V en corriente continua, [2].

Por otra parte, los **residuos de aparatos electrónicos y eléctricos (RAEE)** se definen como cualquier dispositivo que utilice un suministro de energía eléctrica, que haya alcanzado el fin de su vida útil, [2].

Con el paso del tiempo se han ido desarrollando diversas clasificaciones de los residuos electrónicos dentro de las cuales quedan subdivididos en categorías o familias atendiendo a distintas perspectivas, las más utilizadas son las siguientes:

▪ Categorías de AEE según la Directiva de la Unión Europea anexo I del Real Decreto 110/2015 (hasta el 14 de agosto de 2018), [3] :

1. Grandes electrodomésticos
2. Pequeños electrodomésticos
3. Equipos de informática y telecomunicaciones
4. Aparatos electrónicos de consumo
5. Aparatos de alumbrado
6. Herramientas eléctricas y electrónicas
7. Juguetes o equipos deportivos y de tiempo libre
8. Aparatos médicos
9. Instrumentos de vigilancia y control
10. Máquinas expendedoras

- Categorías de AEE según la Directiva de la Unión Europea anexo III del Real Decreto 110/2015 (a partir del 15 de agosto de 2018), [2], [4] :

1. Aparatos de intercambio de temperatura con excepción de:
 - 1.1. Aparato eléctrico de intercambio de temperatura clorofluorocarburos (CFC), hidroclorofluorocarburos (HCFC), hidrofluorocarburos (HFC), hidrocarburos (HC) o amoníaco (NH₃)
 - 1.2. Aparato eléctrico de aire acondicionado
 - 1.3. Aparato eléctrico con aceite en circuitos o condensadores
2. Monitores, pantallas y aparatos con pantallas de superficie superior a los 100 cm²
3. Lámparas
4. Grandes aparatos (con dimensión exterior superior a 50 cm)
5. Pequeños aparatos (sin dimensiones exteriores superior a 50 cm)
6. Equipos de informática y telecomunicaciones pequeños (sin ninguna dimensión exterior superior a los 50 cm)
7. Paneles fotovoltaicos grandes (con una dimensión exterior superior a 50 cm)

- Clasificación de RAEE por líneas de color, [5] :

Línea	Clasificación
Blanca	Electrodomésticos
Marrón	Equipos de Consumo
	Equipos de Audio y Video
Gris	Equipos Informáticos

Tabla 1 - Clasificación de RAEE por líneas de color

- Clasificación de RAEE desde la perspectiva del reciclaje, [6] :

1. Aparatos que contienen refrigerantes (requieren un transporte seguro y tratamiento individual).
2. Electrodomésticos grandes y medianos (contienen en gran parte diferentes metales y plásticos que pueden ser manejados según los estándares actuales).
3. Equipos de iluminación (requieren procesos especiales de reciclaje o valorización).

4. Aparatos con monitores y pantallas (los tubos de rayos catódicos requieren un transporte seguro y tratamiento individual)
5. Otros aparatos (compuestos en principio de los mismos materiales y componentes y requieren tratamiento de reciclaje).

Dentro de las distintas clasificaciones expuestas, el presente estudio experimental se enfoca a los residuos electrónicos de gama gris (equipos informáticos).

3.2. Normativa aplicable

Antes de continuar profundizando en el sistema de gestión y tratamiento de residuos electrónicos resulta interesante exponer como antecedente, una revisión del marco normativo que regula el manejo integrado de los RAEE en la Unión Europea y en España.

3.2.1. Directivas

Directiva 2002/96/CE – Primera normativa específica aprobada dirigida a la Unión Europea. Su propósito fue asentar las bases de un modelo de gestión que planteaba la necesidad de diseñar aparatos más eficientes, menos contaminantes y más fáciles de ser tratados una vez se convertían en residuos, [7], [8], [9], [10].

Directiva 2012/19/UE – Modificación de la normativa 2002/96/CE, establecida en base a la toxicidad y peligrosidad de los materiales contenidos en los RAEE, busca medidas para proteger el medio ambiente y la salud humana, [3], [7], [8], [9].

Directiva 2011/65/UE – Normativa aplicada tras la revisión de la Directiva 2002/95/CE en la que se aplican las restricciones a la utilización de determinadas sustancias peligrosas en aparatos eléctricos y electrónicos, así como la reducción de los problemas de gestión derivados de los metales pesados y retardantes de llama. Impulsa a la separación de residuos en puntos de recogida para su posterior tratamiento y reutilización, [7], [8], [9], [11].

3.2.2. Real Decreto

Real Decreto 208/2005 – Primer Real Decreto establecido, incorporo al ordenamiento jurídico Español la Directiva 2002/96/CE. Tiene como objetivos reducir la cantidad de RAEE y la peligrosidad de sus componentes, fomentar la reutilización de los aparatos y la valorización y determinación de una gestión atendiendo al medio ambiente, [7], [8], [9], [12]

Real Decreto 110/2015 – Deroga el anterior Real Decreto 208/2005, continúa la línea marcada por la Directiva. Los principales objetivos que se establecen son los siguientes, [2], [7], [8], [9] :

- Establecimiento de una regulación que aumente el nivel de seguridad jurídica.
- Describir las obligaciones de todos los agentes implicados en la cadena de RAEE.
- Constitución de un único instrumento de datos de RAEE a nivel autonómico y estatal.
- Asegurar la coherencia y homogeneidad de la gestión de los RAEE en todo el territorio.
- Garantizar la competitividad del sector de los fabricantes de AEE y del sector de gestión de RAEE.
- Fomentar el eco diseño de AEE por parte de los fabricantes.
- Optimizar la gestión de los RAEE bajo responsabilidad ampliada del productor (RAP).

3.3. Generación de residuos electrónicos

En 2016 se generaron a nivel mundial alrededor de 44’7 millones de toneladas de residuos electrónicos, lo que equivale a 6’1 kg/habitante.

De estos 44’7 millones de toneladas generadas, únicamente constan como correctamente reciclados y recuperados el 20 %, mientras que no hay constancia del otro 80% (35’8 millones de toneladas). En la Tabla 2 se muestra como quedan repartidos estos 44’7 millones de toneladas por continentes, [13]:

Indicador	África	América	Asia	Europa	Oceanía
Nº de países de la región	53	35	49	40	13
Residuos generados (kg/hab.)	1.9	11.6	18.2	12.3	0.7
Residuos generados totales (Mt)	2.2	11.3	18.2	12.3	0.7
Índice de recogida	0 %	17 %	15 %	35 %	6 %

Tabla 2- Desglose de la cantidad de residuos generados por continentes

La acumulación de esta elevada cantidad de residuos electrónicos supone un alto impacto ambiental. Gracias al sistema de gestión de residuos y a la legislación vigente en nuestro país, gran parte de los residuos son tratados y no se llegan a apreciar las consecuencias que conllevaría una mala gestión de estos, sin embargo, en los países en vías

de desarrollo la situación es crítica, pudiendo observar en la ‘‘Tabla 2’’ que el índice de recogida y control de residuos electrónicos es nulo. En la Figura 1 se puede apreciar la acumulación de residuos electrónicos en un vertedero del continente africano.



Figura 1 – Situación crítica de países en vías de desarrollado

El problema ligado a la generación de residuos electrónicos no termina aquí, la tasa de crecimiento anual oscila entre el 3 y el 4 %, por lo que no solo se trata de un problema presente, sino que el impacto seguirá aumentando en un futuro. A continuación, en la Tabla 3, se puede observar la evolución e incremento de la generación de RAEE en los últimos años, [9]:

Evolución de la generación de RAEE			
Año	RAEE generados (Mt)	Población (billones)	(kg/hab.)
2012	37.8	6.9	5.4
2013	39.8	7.0	5.7
2014	41.8	7.1	5.9
2015	43.8	7.2	6.0
2016	44.7	7.3	6.1
2017	47.8	7.4	6.4
2018	49.8	7.4	6.7

Tabla 3 – Evolución generación de RAEE

3.3.1. Impacto ambiental causado

El impacto ambiental, generado por la cantidad de residuos electrónicos acumulados, se debe principalmente a la temprana obsolescencia de los equipos, al consumo, a los recursos necesarios para su fabricación y a la toxicidad y contaminación que provocan algunos compuestos químicos integrados en su estructura. Por tanto, el impacto causado se debe considerar en todo su ciclo (desde su fabricación hasta el proceso de reciclaje). En la Tabla 4 se muestran los principales impactos causados a lo largo de cada una de las fases del ciclo productivo, [14]:

Fase del ciclo productivo	Impacto causado
Obtención de materias primas	Destrucción de ecosistemas Impacto en aguas subterráneas Cambio en microclimas
Fabricación y venta	Emisiones a la atmosfera Efectos tóxicos Efluentes ácidos
Uso	Emisiones a la atmosfera Radiación Efluentes
Tratamiento de desechos	Emisiones Fugas
Vertido ilegal	Cambio climático Acidificación

Tabla 4 - Impacto ambiental durante el ciclo productivo de los RAEE

No obstante, los valores indicados sobre residuos electrónicos no sólo son pertinentes por su repercusión medioambiental, sino que también constituyen un importante componente económico. El valor total de todas las materias primas existentes en los residuos electrónicos se calcula que puede alcanzar los 55.000 millones de euros, [13].

Los equipos desechados aún poseen componentes de gran valor. El aprovechamiento de estos elementos al revalorizarlos, supondría una fuente de empleo y de ingresos por generación de nuevos negocios.

Con el propósito de volver a integrar los residuos en el ciclo productivo, de manera que se puedan obtener nuevas materias primas, a la vez que eliminamos el riesgo

medioambiental que supone su tratamiento inadecuado, surge el concepto ‘‘Urban Mining’’ o ‘‘Minería Urbana’’ cuya definición adaptada según diversos artículos se determina como, aprovechamiento de residuos eléctricos y electrónicos para la recuperación de materiales secundarios valiosos (tales como metales férricos y no férricos) con el fin de ser usados posteriormente en la fabricación de nuevos productos, [1].

3.3.2. *Contenido metálico de los residuos electrónicos*

En los residuos electrónicos (como móviles, ordenadores, televisores...) que se desechan, existen metales muy valiosos y escasos, la proporción de cada uno de estos materiales dependerá del tipo de residuo. Aquellos de naturaleza tecnológica pueden llegar a contener más de 60 elementos diferentes. El reciclaje de estos residuos nos permitiría obtener metales al mismo costo que en la minería tradicional, y a menor costo si se consideran los subsidios, por lo que está siendo considerado como una forma de minería alternativa, [4], [15].

Hay empresas de reciclaje españolas que separan los metales principales (hierro, estaño, cobre...) sin embargo, dejan otros aún más escasos como es el caso del oro, plata, paladio, iridio y tierras raras. A continuación, se muestran los principales metales que podemos encontrar en los residuos electrónicos, [4], [15] :

- | | |
|-----------------|--------------------------|
| ▪ Plomo (Pb) | ▪ Oro (Au) |
| ▪ Estaño (Sn) | ▪ Plata (Ag) |
| ▪ Cobre (Cu) | ▪ Tierras raras |
| ▪ Cadmio (Cd) | ▪ Mercurio (Hg) |
| ▪ Aluminio (Al) | ▪ Cobalto (Co) |
| ▪ Hierro (Fe) | ▪ Cromo (Cr) |
| ▪ Níquel (Ni) | ▪ Bario (Ba) |
| ▪ Litio (Li) | ▪ Oxido de Berilio (BeO) |
| ▪ Zinc (Zn) | ▪ Manganeseo (Mn) |

Estos metales pueden ser reciclados ya que sus propiedades no se ven modificadas, además, en algunos casos, como es el de las denominadas tierras raras, su escasez en la naturaleza y la dependencia de otros países (el 90 % del mercado de tierras raras está controlado por China), los hace críticos para Europa, en especial, para el desarrollo de tecnologías emergentes y tecnologías ‘‘verdes’’ (teléfonos inteligentes, energías renovables, LED, baterías de coches eléctricos...). Es por ello que la creación de una fuente de recursos

adicional a la tradicional (en especial para este tipo de elementos) como es la minería urbana, supondría un punto de inflexión en nuestro país desde la perspectiva económica y estratégica.

3.3.3. Ejemplo de la importancia estratégica de este tipo de elementos:

El 15 de mayo de 2019, el presidente de los EE. UU, Donald Trump declaró una orden ejecutiva que entrega competencias al Gobierno Federal para prohibir a empresas que contraten con proveedores extranjeros, acto que crea una barrera a la compañía china Huawei, [16].

En respuesta a este acontecimiento el 21 de mayo de 2019, China no tarda en contrarrestar este ataque amenazando con cortar sus exportaciones de tierras raras a EE. UU.

De manera casual, tras esta amenaza EE. UU decide retrasar tres meses las sanciones a Huawei, [17], [18].

Se puede apreciar de esta manera el importante papel que juega este tipo de elementos, siendo clave en la guerra comercial existente entre EE. UU y China. Además, no sería la primera vez que Pekín usa sus tierras raras como arma política; consciente de su valor, en 2010 redujo su cuota de exportación, pero la Organización Mundial del Comercio (OMC) le obligó a anular dichas restricciones en 2012 ante las quejas de EE.UU., la Unión Europea y Japón, [18].

3.4. Gestión de los residuos electrónicos

Dada la alta generación de residuos de aparatos electrónicos, así como la cantidad de componentes peligrosos que la gran mayoría poseen, se hace necesario su reciclaje y gestión en plantas de tratamientos homologadas y autorizadas para tal efecto.

En este tipo de plantas, los RAEE se procesan en diferentes etapas. En primer lugar, aquellos residuos que contengan elementos peligrosos, deberán ser descontaminados; posteriormente, se procederá al tratamiento de estos buscando en orden de prioridad, la reutilización, el reciclado, la valorización y la eliminación, [12].

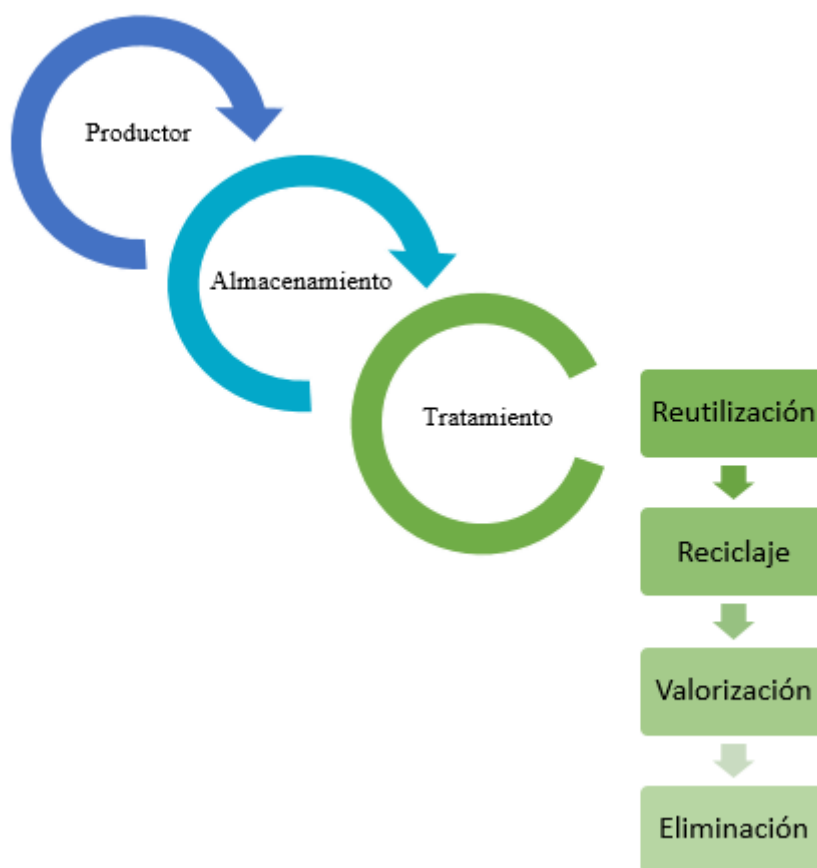


Figura 2 - Proceso de gestión de residuos electrónicos [Elaboración propia].

Sera necesario promover por parte de las comunidades autónomas la adopción de sistemas certificados de las actividades de gestión de residuos electrónicos. Además, la entrada o salida nacional de este tipo de residuos se debe ajustar a las normas sobre traslado establecidas en la Ley 10/1998 de 21 de abril, y en el reglamento (CEE) nº 259/93 del consejo, del 1 de febrero de 1993 (vigilancia y control de traslados de residuos en el interior) tal y como establece el Real Decreto, [12].

En este estudio experimental nos centraremos, dentro del proceso de tratamiento, en la fase de reciclado de los RAEE.

3.5. Reciclado de RAEE

El reciclado puede considerarse como la última etapa que contempla el aprovechamiento de los componentes metálicos contenidos en los equipos eléctricos y electrónicos al final de su vida útil.

Dentro del proceso de reciclado, se plantean distintas operaciones unitarias que deben cumplirse, a modo de pretratamiento, para lograr la clasificación de las distintas familias de materiales presentes en estos residuos. En la Figura 3 se muestra un esquema del procedimiento operacional a seguir, [19]:

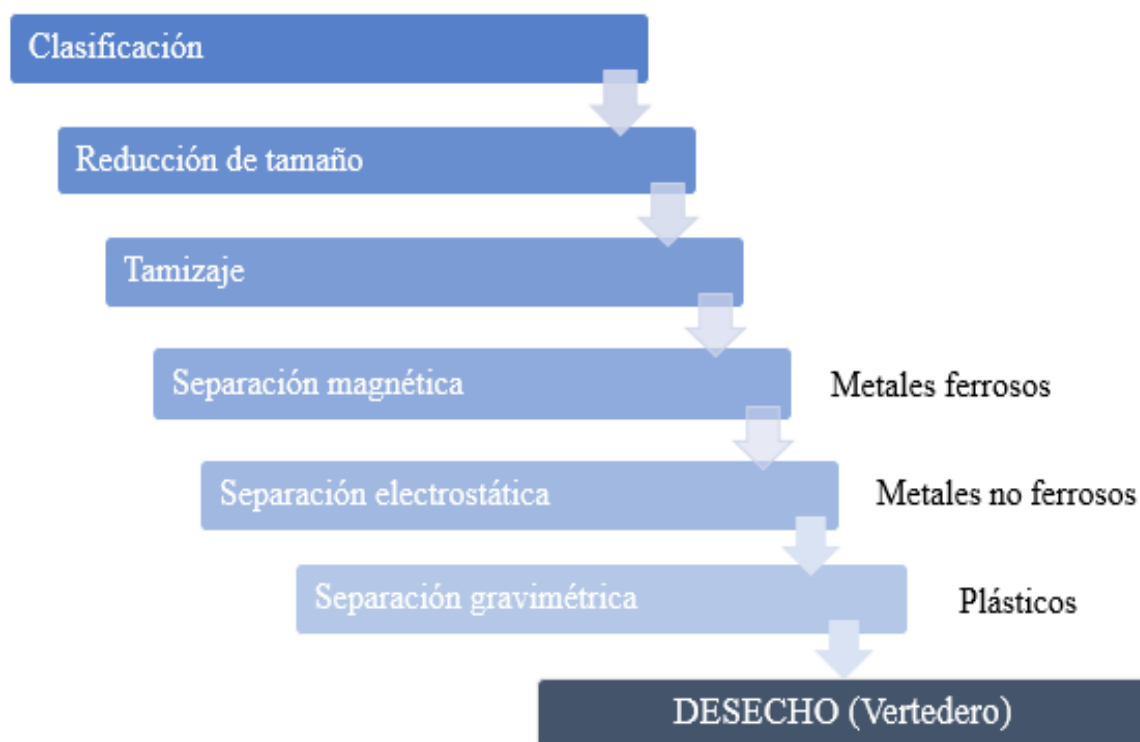


Figura 3 – Pretratamiento de reciclaje en RAEE, [19].

Tras el pretratamiento obtendremos la clasificación de las distintas fracciones de materiales. Posteriormente, estas fracciones deberán ser sometidas a un nuevo tratamiento para poder conseguir la recuperación de los distintos materiales presentes. En este estudio nos centraremos únicamente en aquellos tratamientos encargados de la separación metálica, considerándose los más adecuados y utilizados los que se desarrollan a continuación, [19] :

- Tratamiento Pirometalúrgico

Conforma la metodología más antigua, además de continuar siendo la más utilizada para recuperación de metales contenidos en RAEE.

El proceso consiste en la fundición de los residuos electrónicos pretratados dentro de un horno a temperaturas muy elevadas. Suelen utilizar una combinación de varios procesos

adicionales. Los métodos más empleados para la puesta en marcha de este proceso son: la fundición en hornos, incineración, combustión y pirólisis.

El proceso de fundición se realiza en diversas etapas, [20], [21] :

1. Tostación

Muchos de los metales no ferrosos se presentan en forma de sulfuros, es por ello que es necesaria esta primera fase para la transformación de los sulfuros en óxidos. Para ello, el mineral es puesto en contacto con aire, a una elevada temperatura (500-900 ° C), de esta manera, el oxígeno del aire se combina con el azufre del sulfuro formando SO₂ y con los metales formando óxidos metálicos.

2. Fusión

Esta etapa consiste en la liberación de los elementos metálicos, para ello se alimenta un horno de fundición a una temperatura de entre 1200 y 1400 ° C. Con este proceso, los metales se recuperan en forma líquida, las impurezas son depositadas formando un desecho denominado escoria y los gases y vapores generados, son conducidos a un sistema de limpieza de gases secundario.

3. Conversión

Consiste en la inyección de aire, oxígeno o aire enriquecido para la oxidación selectiva de manera que los elementos con mayor afinidad se puedan separar primero.

4. Refinación

Etapa final del proceso, en ella se separan y recuperan las impurezas de los procesos extractivos. Sus características dependerán del tipo de impurezas y cantidad.

Tras la etapa de conversión, el material es introducido en un horno de refinación con temperaturas de trabajo de entre 500 y 800 ° C. Dentro del horno se produce la oxidación (normalmente con SO₂) que permite eliminar el sulfuro contenido; posteriormente, se inyecta gas natural fraccionado con vapor de aire, lo que provoca la reducción del nivel de oxígeno y con ello, el metal anódico es extraído del horno de ánodos por una canaleta cubierta.

A pesar de ser el método más utilizado, el proceso pirometalúrgico presenta algunas limitaciones (Tabla 5), [21] :

Limitaciones del Tratamiento Pirometalúrgico
- No se pueden recuperar ciertos componentes como los chips o las tarjetas de fibra de vidrio.
- Emisiones generadas (causa de la fundición de PVC)
- No pueden ser recuperados metales como el aluminio o el hierro
- En presencia de materiales cerámicos en la alimentación, se disminuye la eficacia de recuperación de algunos metales

Tabla 5 – Limitaciones del tratamiento pirometalúrgico

En consecuencia, a estas limitaciones y en búsqueda de la separación del resto de metales, no recuperables en el proceso pirometalúrgico, se desarrolla el tratamiento hidrometalúrgico.

▪ Tratamiento Hidrometalúrgico

El tratamiento hidrometalúrgico se basa en la extracción de metales mediante operaciones fisicoquímicas. El proceso tiene lugar a través de reacciones en fase acuosa y a bajas temperaturas, [21], [22], [23].

A diferencia del tratamiento pirometalúrgico, este proceso se considera más exacto y fácil de controlar. Se pueden diferenciar distintas etapas de desarrollo:

1. Lixiviación [20], [22], [23].

Etapas del proceso hidrometalúrgico en que los residuos son sometidos a soluciones que pueden ser ácidas, básicas o neutras, con el objetivo de que los componentes solubles integrados en estos, sean extraídos. Las condiciones de trabajo pueden variar desde presiones en condiciones de vacío hasta 5.000 kPa y de temperaturas de 0 ° C hasta 250 ° C.

Normalmente las soluciones más utilizadas son las ácidas, no obstante, el tipo de solución dependerá del reactivo empleado, que a su vez dependerá del mineral que se desee extraer. A continuación (Tabla 6), se indican los agentes lixiviantes recomendables en función del metal a extraer:

Metal	Solución utilizada
Paladio	Ácido clorhídrico y clorato de sodio
Oro y Plata	Tiourea o cianuro
Cobre	Ácido sulfúrico o agua regia
Metales básicos	Ácido nítrico

Tabla 6 – Principales agentes lixiviantes utilizados [22].

2. Purificación [20], [22].

Etapla para eliminación de impurezas y concentración de los metales de valor de la mezcla obtenida tras la etapa de lixiviación. Puede ser llevada a cabo con distintos métodos:

- Métodos de precipitación
- Cementación
- Extracción con disolventes
- Separación con resinas de intercambio iónico

3. Recuperación [21].

Última etapa del proceso llevada a cabo para la obtención del metal de interés. Para el desarrollo de esta última etapa se pueden emplear técnicas de precipitación, electrodeposición o reducción química. El uso de una técnica u otra dependerá del tipo de metal con el que estemos trabajando, [24].

A pesar de que el tratamiento hidrometalúrgico es considerado más exacto y fácil de controlar que el tratamiento pirometalúrgico, también presenta una serie de limitaciones tal y como se muestra en la Tabla 7:

Limitaciones del Tratamiento Hidrometalúrgico
- Las reacciones son lentas
- Complejidad de uso, toxicidad y elevado costo de algunos agentes lixiviantes
- Puede verse reducida la recuperación de algunos metales

Tabla 7 – Limitaciones del tratamiento hidrometalúrgico

▪ Tratamiento Biometalúrgico

Tratamiento basado en la capacidad de los microorganismos para unirse a iones metálicos gracias a sus funciones celulares (sorci3n, reducci3n, oxidaci3n y precipitaci3n).

Existen 2 tipos de tratamiento Biometalúrgico:

1. Biolixiviaci3n

Consiste en el empleo de bacterias específcas para lixiviar, disolver o extraer, un metal de valor, de manera que producto final, será una soluci3n ácida que contiene el metal en forma soluble.

2. Biosorci3n

Consiste en el empleo de bacterias específcas para absorber o adsorber, un metal de valor dentro de las paredes celulares. Requiere por tanto microorganismos con gran área superficial (mayor a 100 m²/g), [25].

El tratamiento biometalúrgico, presenta algunas ventajas e inconvenientes sobre los métodos tradicionales (Tabla 8):

Ventajas	Inconvenientes
- Bajos costos de operaci3n	- Reacciones muy lentas
- Minimizaci3n de químicos empleados	- Presencia de metales pesados
- Alta eficiencia en los efluentes de desintoxicaci3n	-

Tabla 8 – Ventajas e inconvenientes tratamiento biometalúrgico

3.6. Aplicaci3n de hidrometalurgia para extracci3n de metales en RAEE.

En este estudio experimental nos centraremos en la aplicaci3n del tratamiento hidrometalúrgico para lograr la extracci3n de los metales contenidos en los residuos electrónicos, y con ello, su valorizaci3n. Para ello, se lleva a cabo una línea de investigaci3n bibliográfica, sobre el procedimiento de ensayo empleado por otros autores, con el fin de desarrollar una metodología de ensayo óptima.

Como bien hemos comentado en el apartado anterior, en el proceso hidrometalúrgico el residuo es sometido a lixiviaci3n, normalmente ácida, para lograr la recuperaci3n de los metales. La mayoría de los estudios se enfocan en el uso de cianuro y agua regia como

agentes lixiviantes, no obstante, queda demostrado en otros artículos que la eficiencia en el uso de un agente lixiviante u otro va en función del material que se desea recuperar.

El artículo ***“Process development for recovery of copper and precious metals from waste printed circuit boards with emphasize on palladium and gold leaching and precipitation; Ali Behnamfard, Mohammad Mehdi Salarirad, Francesco Veglio; (2013)”*** enfoca su estudio a la aplicación del proceso hidrometalúrgico para extracción de cobre en residuos electrónicos. En el artículo se propone la reducción de tamaño del desecho en una trituradora de martillo seguida de pulverización hasta tamaños de partículas de 300 μm ; el polvo obtenido se lixivia en una solución de ácido sulfúrico en presencia de peróxido de hidrógeno durante 3 h, a 200 rpm y temperatura ambiente. Como resultado, se logra la extracción de hasta 85.76% en peso de cobre. Se determina además que el cobre restante también podría ser recuperado a través de lixiviaciones repetidas, [26], [27].

En el artículo, ***“Recovery of high purity precious metals from printed circuit boards; Young Jun Park, Derek J. Fray; (2009)”*** se proponen metodologías basadas en la recuperación de metales empleando agua regia como agente lixiviante, siendo el propósito principal de su estudio la recuperación de los denominados metales preciosos. Como resultado logran una recuperación del 98% de plata y 93% de paladio. Para la recuperación del oro se requiere un método adicional con tolueno, alcanzando un 97% de recuperación, [24], [28].

A pesar de que en la mayoría de los estudios se recurre al empleo de agua regia como agente lixiviante, en el artículo ***“Recovery of copper from printed circuit boards scraps by mechanical processing and electrometallurgy; Hugo Marcelo Veit , Andréa Moura Bernardes, Jane Zoppas Ferreira , Jorge Alberto Soares Tenório, Célia de Fraga Malfatti; (2006)”*** se determina que en muestras disueltas con ácido sulfúrico la disminución del cobre en la solución ocurre en rangos de tiempo más cortos, resultado de la presencia del ion NO_3 en agua. Además, el uso de agua regia como agente lixiviante puede reducir la eficiencia del proceso posterior de electrodeposición, [29].

En otras investigaciones ***“Process for the Recovery of Precious Metals from Electronic Scrap by Hydrometallurgical Technique. Int. Patent WO/2006/013568; Kogan, Vladimir; (2006)”***, el procedimiento de ensayo es extendido al tratamiento primario con ácido sulfúrico y clorhídrico para la recuperación de metales base como el cobre, y posteriormente, a partir del residuo sólido restante del primer tratamiento, llevan a cabo una segunda lixiviación con ácido nítrico o bromhídrico para obtener metales preciosos y del grupo de las tierras raras. Para la recuperación con ácido sulfúrico, se llevan a cabo

disoluciones con concentraciones de 50 g/l de H_2SO_4 y 200 g/l de MgCl_2 , a temperaturas de 80° C y durante aproximadamente 2'5 horas; como resultado, más de 96% del cobre y 98% del níquel son recuperados. El residuo sólido sobrante es sometido a lavado y a una disolución de concentraciones 30 g/l HCl y 180 g/l iones bromuro; como resultado, el 98% de oro, 84% de plata, 96 % de paladio y 92 % de platino se logra recuperar, [30].

Un aspecto común de todos los autores es el control de las variables de velocidad de agitación, molaridad del ácido empleado, temperatura y tiempo, siendo determinantes a la hora de alcanzar la máxima eficiencia del procedimiento. Se recomiendan aproximadamente concentraciones 50 g/l, a temperatura ambiente y en periodos de residencia de 3 horas, [24], [29], [30].

Respecto a la caracterización de las especies metálicas presentes en los residuos electrónicos, las fuentes bibliográficas reportan que, en las etapas de reducción de tamaño, lixiviación, electrodeposición y biolixiviación, son útiles las técnicas SEM, EDS y DRX para caracterizar las especies metálicas presentes en los desechos electrónicos; resaltando la técnica DRX, [31].

En base a las investigaciones realizadas, se desarrolla a escala de laboratorio una metodología inspirada en el tratamiento hidrometalúrgico, mediante la cual se busca determinar la composición de los RAEE, así como el porcentaje de metales a recuperar dentro de su estructura interna.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. MATERIALES

4.1.1. Residuo electrónico.

Como materia prima escogida para el desarrollo del presente proyecto, se seleccionaron aleatoriamente tarjetas de circuitos impresos de distintos tipos de residuos electrónicos (Figura 4), cada una de ellas con diferente funcionalidad. La mayoría de las tarjetas utilizadas para el estudio provienen de material informático obsoleto.



Figura 4 – Tarjetas electrónicas seleccionadas, [Elaboración propia].

4.1.2. Ácido sulfúrico

Para lograr la lixiviación de los elementos presentes en la estructura del residuo seleccionado, siguiendo la metodología propuesta en el tratamiento hidrometalúrgico, se llevaron a cabo soluciones ácidas.

Como agente lixivante se empleó para todas las soluciones, ácido sulfúrico (H_2SO_4) con las siguientes características:

Masa molar	98'08 g/mol
Densidad	1'84 g/ml
Fracción másica	96 %

4.1.3. Agua de análisis

El segundo componente de nuestra disolución, consiste en agua de análisis, obtenida mediante destilación y utilizada para diluir el ácido sulfúrico y provocar la reacción exotérmica que lixiviara nuestro residuo electrónico, obteniendo de esta manera los diferentes elementos que componen su estructura interna.

4.2. MÉTODOS

En el presente capítulo se desarrolla la metodología llevada a cabo en laboratorio para lograr la recuperación de metales en los residuos electrónicos.

En primer lugar, se hace referencia a la materia prima escogida para el desarrollo del proceso. Seguidamente se describen cada una de las etapas que conforman el procedimiento de recuperación llevado a cabo; etapas seguidas secuencialmente con el fin de alcanzar los objetivos expuestos en el presente proyecto:

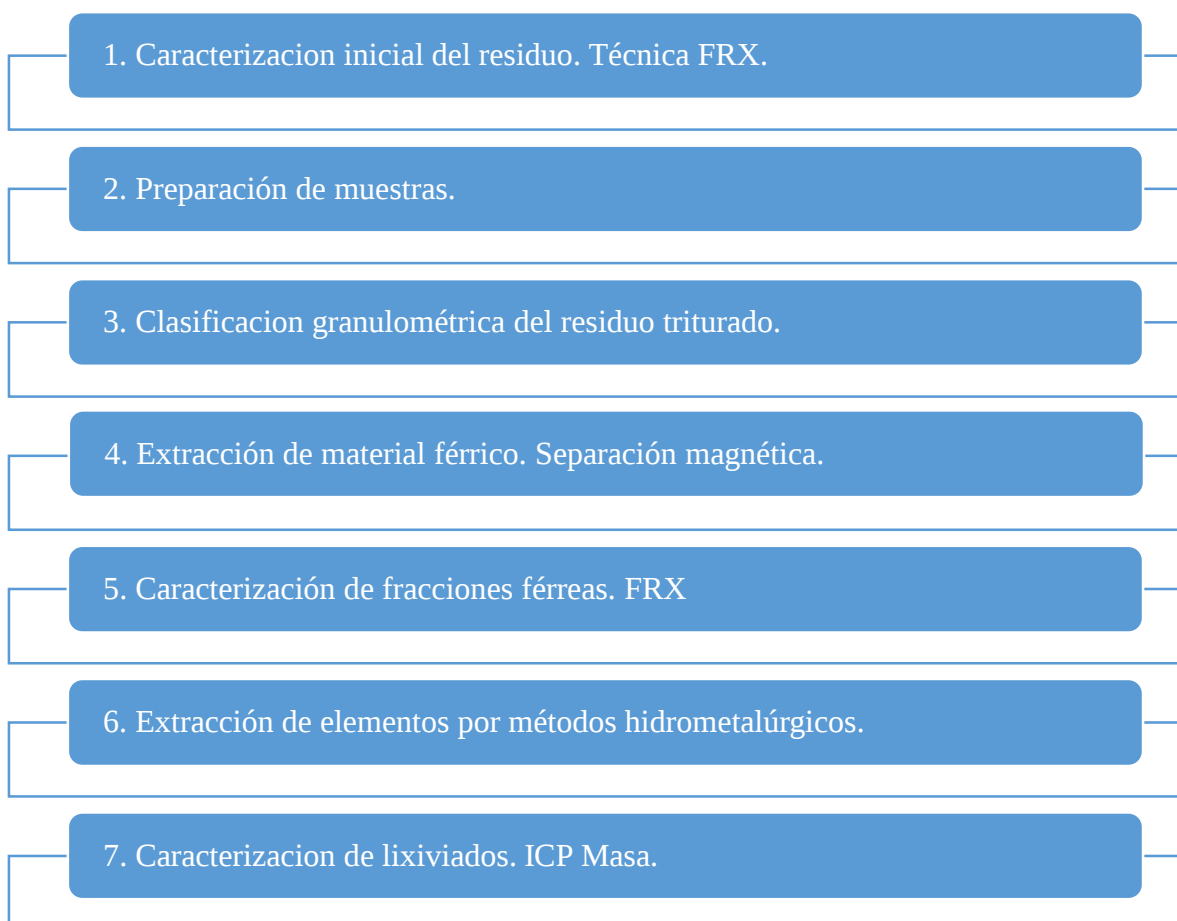


Figura 5 – Metodología desarrollada para recuperación de metales presentes en RAEE, [Elaboración propia].

4.2.1. Caracterización inicial de residuo utilizado.

Para caracterizar y determinar la composición metálica del residuo electrónico seleccionado, se lleva a cabo un estudio mediante la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX). No obstante, de manera previa al ensayo realizado, se realiza un pretratamiento, consistente en la trituration y caracterización granulométrica, a modo de preparación de muestras para el desarrollo de cada uno de los ensayos posteriores.

- Preparación de muestras

Nuestro objetivo principal es lograr la lixiviación de los principales metales integrados en la estructura de la materia prima objeto de estudio. Para ello fue necesaria la reducción de tamaño del residuo con el fin de alcanzar fracciones con granulometría inferior a los 2 mm y con ello poder desarrollar la lixiviación de los materiales eficientemente.

Para llevar a cabo la trituration del residuo se empleó un molino de martillos (Figura 6), modelo: GRUBBER, DUPLEX 94^a.



Figura 4 – Molino empleado para trituration de residuo, [Elaboración propia]

Tras llevar a cabo la trituración del residuo con molino de martillos se procedió al tamizado de la fracción obtenida con el propósito de clasificar el residuo a lixiviar en base a su granulometría y descartar aquellas fracciones con tamaño de partícula superior a 2 mm.

Se emplearon los tamices de 2 mm y 0'63 mm. En las Figuras 7 y 8 se puede observar, respectivamente, la reducción de tamaño lograda tras la primera etapa y las fracciones resultantes tras el tamizado.

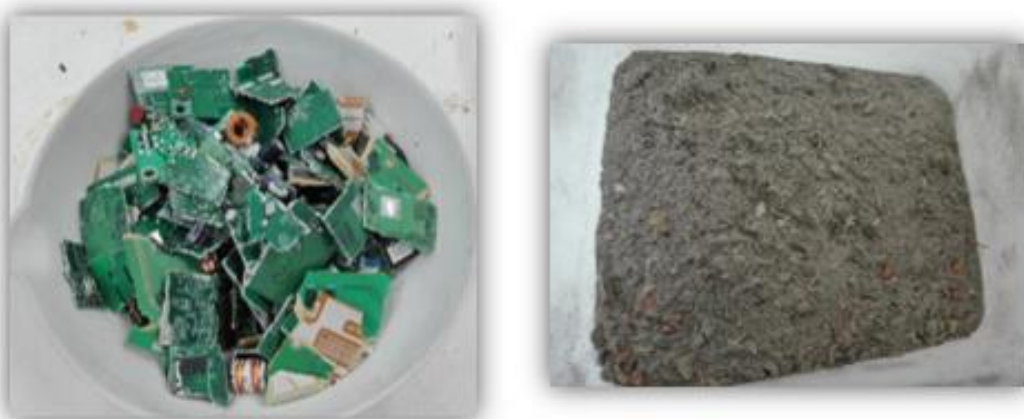


Figura 5 - Resultados tras trituración de residuo, [Elaboración propia].



Figura 6 - Fracciones resultantes tras el tamizado, [Elaboración propia].

Los resultados obtenidos tras la trituración y tamizado son los siguientes, Tabla 9:

Nombre	Tamaño	Peso Total
Fracción I	< 0'63 mm	0'1965 kg
Fracción II	(0'63 – 2) mm	0'1134 kg
Fracción III	> 2 mm	Fracción descartada

Tabla 9 – Resultados tras trituración de residuo.

Como podemos observar, obtenemos como resultado un total de tres fracciones de las cuales la tercera queda descartada por tener granulometría superior a 2 mm. A partir de este punto se trabaja diferenciando el residuo entre Fracción I y Fracción II, para realizar los ensayos y comprobar la eficacia del proceso en función de la granulometría de trabajo.

Por otra parte, para llevar a cabo la caracterización de la materia prima utilizada, se empleó la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX). Para el desempeño de esta técnica se necesitó reducir la materia prima inicial a un tamaño inferior a 0'63 mm.

Como podemos observar tras la etapa de trituración se distingue entre Fracción I y Fracción II ambas con distintas granulometrías, por lo que para el desarrollo de la técnica FRX se tuvo que llevar a cabo una segunda reducción de tamaño a partir de un molino mezclador (Figura 9), modelo: *RETSCH MM 200*.



Figura 7 – Molino mezclador RETSCH MM220, [32].

Los pesos de muestra seleccionados para caracterización FRX fueron de 9'174 g y 8'749 g, para las Fracciones I y II, respectivamente. Estas muestras de residuo fueron tomadas y sometidas a molino mezclador una vez realizada la etapa de separación magnética, desarrollada a continuación. Los resultados obtenidos quedan expuestos en el capítulo de ‘‘Resultados y Discusiones’’.

Una vez preparadas las muestras, se procede a caracterizar el residuo inicial.

- *Fluorescencia de rayos X (FRX)*

La técnica de Fluorescencia de Rayos X se basa en el estudio de las emisiones de fluorescencia generadas después de la excitación de una muestra mediante una fuente de rayos X. La radiación incide sobre la muestra excitando los átomos presentes en la misma, que emiten a su vez radiación característica denominada fluorescencia de rayos X, [33].

Mediante esta técnica lograremos medir la composición elemental de nuestro residuo de manera tanto cualitativa como cuantitativa a partir del estudio de muestras.

Los rayos X poseen una energía tal que al incidir sobre la muestra pueden ionizarla expulsando electrones de las capas más internas. Estos iones son altamente inestables y esas vacantes son ocupadas por electrones de capas superiores en cascada; podemos observar la representación gráfica en la Figura 5, [34].

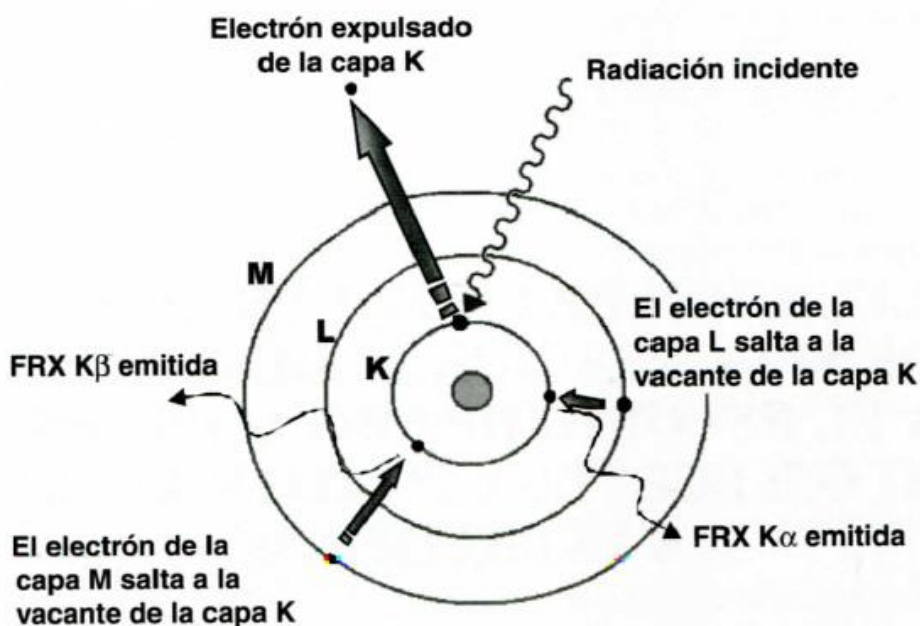


Figura 8 - Esquema de emisión de radiación en técnica FRX, [34].

Los saltos de electrones de un nivel de mayor energía a uno de menor desprenden una radiación característica que es la fluorescencia de rayos X. El conjunto de los saltos electrónicos entre capas de un elemento forma el espectro característico del elemento y es único, [33], [34], [35].

Los resultados obtenidos tras las técnicas de caracterización quedan expuestos en el capítulo de ‘‘Resultados y Discusiones’’.

4.2.2. Extracción de material férrico. Separación magnética.

Finalizada la etapa de reducción de tamaño y la clasificación granulométrica del residuo, el siguiente paso llevado a cabo consistió en la separación magnética de los materiales férricos contenidos tanto en la Fracción I como en la Fracción II. El principal objetivo de esta etapa consiste en separar el máximo contenido de hierro posible para evitar que, en el proceso de lixiviación, la reacción se sature como consecuencia de la formación de sulfato de hierro.

La separación magnética de los metales ferrosos se realizó manualmente mediante empleo de imanes, en la Figura 11, Figura 12 y Figura 13 queda reflejado visualmente el procedimiento.



Figura 111 – Separación magnética con imán



Figura 92 – Residuo Fracción I



Figura 103 – Materiales ferrosos extraídos

Gracias a esta separación conseguimos obtener la gran mayoría de los materiales ferrosos contenidos en nuestro residuo. Como resultado logramos la separación de 22'347 g para la Fracción I y de 30'581 g de la Fracción II, lo que corresponde respectivamente al 11'45 % y 26'967 % del peso total de residuo.

Nombre	Peso total	Material Ferroso Separado	Muestra para FRX
Fracción I	0'1965 kg	22'347 g (11'45 %)	8'749 g
Fracción II	0'1134 kg	30'581 g (26'967 %)	9'174 g

Tabla 10 – Resumen peso fracciones obtenidas.

Con el objetivo de fundir el material y elaborar una probeta para caracterizar el contenido férrico de nuestro residuo, el material separado de cada fracción fue llevado a horno a temperaturas superiores a los 1500°C.

Para caracterizar la probeta realizada se empleó la técnica de microfluorescencia de rayos X (μ FRX), ya que nos permite analizar elementalmente, muestras más heterogéneas o irregulares, [36].

- Microfluorescencia de rayos X (μ FRX)

Consiste en una técnica empleada para análisis elemental, permitiéndonos examinar áreas de muestras pequeñas y localizadas. La principal diferencia con respecto a la técnica de fluorescencia de rayos X se basa en el enfoque reducido a un punto concreto de la superficie estudiada, permitiéndonos de esta manera, analizar muestras más heterogéneas o irregulares, [36].

Los resultados obtenidos para a caracterización férrica de nuestro residuo quedan expuestos en el capítulo de “Resultados y Discusiones”.

4.2.3. Extracción de elementos mediante métodos hidrometalúrgicos

Para lograr la lixiviación de los materiales contenidos en la estructura del residuo seleccionado, siguiendo la metodología propuesta en el tratamiento hidrometalúrgico, se llevaron a cabo soluciones ácidas con distintas concentraciones con el objetivo de evaluar la extracción de los componentes integrados en función de la concentración molar de nuestra solución.

Se realizaron tanto para la Fracción I como para la Fracción II de residuo, un total de 4 disoluciones de 300 ml (agua de análisis + H₂SO₄), correspondientes a las concentraciones

molares: 2M, 4M, 6M y 8M. Como agente lixivante se empleó para todas las soluciones, ácido sulfúrico (H_2SO_4).

Para cada disolución se someten a lixiviación 5 gramos de muestra de residuo, durante un total de 3 horas y en agitación a una velocidad de 900 rpm. Las proporciones calculadas para cada una de las disoluciones en base a la concentración empleada quedan reflejadas, a continuación, en la Tabla 11:

	2M	4M	6M	8M
ml H_2SO_4	30'70 ml	61'40 ml	92'10 ml	122'81 ml
ml Agua análisis	269'30 ml	238'60 ml	207'89 ml	177'18 ml
Peso residuo lixiviado (Fracción I)	5'039 g	5'06 g	5'049 g	5'030 g
Peso residuo lixiviado (Fracción II)	5'037 g	5'023 g	5'028 g	5'086 g

Tabla 11 – Concentraciones empleadas para lixiviación.

Una vez iniciado el ensayo se realizaron tomas de muestras cada 30 minutos hasta completar la duración total del ensayo (3 horas). Posteriormente, se dejó el residuo en agitación con la disolución durante 24 horas para tomar una última muestra que reflejase la concentración máxima lixiviada. En la Figura 15 se muestra el proceso de lixiviación del residuo.



Figura 14 – Proceso lixiviación



Figura 125 – Precipitación de residuo

Como podemos observar, en la Figura 14, a la hora de realizar la toma de muestras cada 30 minutos, se tuvo que dejar precipitar el residuo en suspensión durante unos minutos para no obtener fracciones sólidas en las muestras y evitar con ello, errores en la caracterización del lixiviado.

Tras transcurrir el periodo de lixiviación se procede al filtrado de las disoluciones, con el fin de separar los materiales sólidos no lixiviados. El residuo sólido sobrante, corresponde a polímeros que se llevaron a estufa y quedan guardados para estudios futuros planteando como propuesta su revalorización en adición a materiales cerámicos, aumentando su aislamiento y disminuyendo la densidad de estos.

Por otro lado, para caracterizar las muestras tomadas durante todo el proceso de lixiviación, se propuso el empleo de la técnica de espectrometría de masas de plasmas (ICP Masa) para determinar y cuantificar todos los elementos que se logran lixiviar.

La técnica ICP Masa, no permite el análisis de muestras con altas concentraciones ácidas, por lo que, dadas las condiciones de ensayo empleadas en nuestras disoluciones, se determinó necesario la dilución con agua de análisis de las muestras hasta alcanzar concentraciones molares óptimas para el desarrollo de la técnica.

Para la dilución de las muestras, se tomaron 0'2 ml de muestra lixiviada y se diluyeron en 14 ml de agua para análisis. Como resultado, en la Tabla 12 se muestran las concentraciones molares obtenidas:

Concentración molar inicial	Concentración molar tras diluir muestra
2 M	0'0253 M
4 M	0'0519 M
6 M	0'0778 M
8 M	0'1038 M

Tabla 12 – Concentraciones molares de muestras diluidas



Figura 13 – Muestras tomadas durante proceso de lixiviación, [Elaboración propia].

- *Espectrometría de masa de plasma (ICP MASA).*

El plasma de acoplamiento inductivo (ICP) es una fuente de ionización a presión atmosférica que junto a un espectrómetro de masas (MS) a vacío, constituye el equipo de ICP-MS. [37]

La espectrometría de masa por plasma acoplado inductivamente es una técnica de análisis instrumental, multielemental, con amplio intervalo lineal y gran sensibilidad, capaz de detectar y determinar cuantitativamente la gran mayoría de los elementos comprendidos en el sistema periódico que tengan un potencial de ionización menor que el potencial de ionización del argón a concentraciones muy bajas. [38]

Normalmente, la muestra líquida es vaporizada e ionizada gracias a un plasma de argón. Una vez que se forman los iones, pasan al espectrómetro de masas donde son detectados y separados mediante un analizador. En la Figura 16 se representa de manera esquemática el proceso y los principales componentes encontrados en un ICP Masa clásico, [39]:

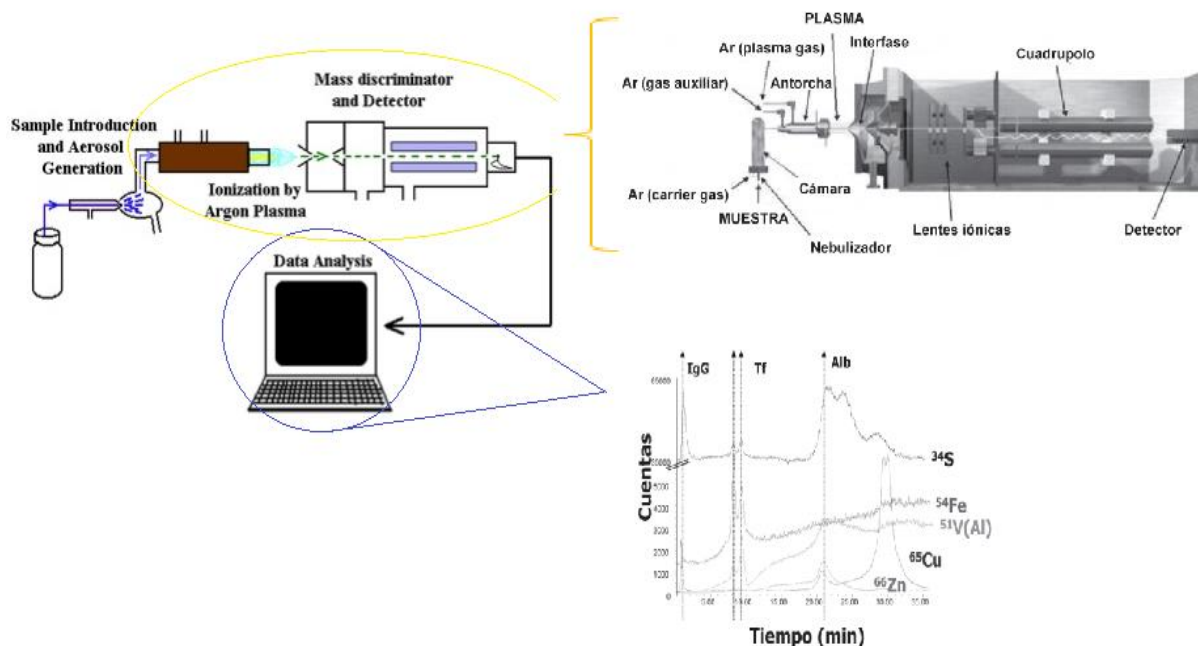


Figura 14 – Proceso técnica ICP Masa y principales componentes, [40], [41].

El sistema de inyección de la muestra líquida se realiza mediante el sistema nebulizador. La antorcha donde se genera el plasma consiste en tres tubos concéntricos de cuarzo, donde a los dos tubos más externos les llega Ar, mientras que al más interno le llega un flujo laminar, [42].

Los resultados de concentración de los elementos contenidos en el lixiviado fueron implementados gráficamente con respecto al tiempo de ensayo transcurrido. A partir de esta representación gráfica se pretende comprobar la variación de la concentración metálica lixiviada en función del tiempo y de la concentración ácida de la disolución, permitiéndonos a su vez comprobar el tiempo necesario para lograr la máxima lixiviación de los elementos.

Los resultados obtenidos tras el análisis de las muestras de residuo lixiviado mediante la técnica de espectrometría de masa de plasma, así como las representaciones gráficas de la concentración másica de los elementos en función del tiempo de lixiviación, quedan expuestos en el capítulo de “Resultados y Discusiones”

5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este capítulo se abordan los resultados principales obtenidos en los ensayos de laboratorio llevados a cabo. Los resultados serán contrastados con los obtenidos en otras publicaciones.

5.1. Caracterización inicial del residuo. Técnica FRX.

Como se ha expuesto anteriormente, de manera previa al tratamiento propuesto, se llevó a cabo la caracterización del residuo de estudio mediante la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX), para determinar los principales elementos que componen su estructura interna. Como resultado, a continuación, se reflejan los resultados de algunos de los principales elementos identificados y el porcentaje másico que suponen con respecto al total de residuo analizado:

Caracterización de residuo con técnica FRX	
<i>Fracción de residuo < 0'63 mm</i>	
Metal identificado	%w
Au	0,0079
Al	4,78
Cu	6,74
Sn	1,95
Fe	1,34
Ti	0,30
Mg	0,434
Pb	0,399
Zn	0,0942
Mn	0,0591
Ag	0,0657
Co	0,0017
Ga	0,011

Tabla 13 - Resultados FRX. Fracción < 0'63 mm

Caracterización de residuo con técnica FRX	
<i>Fracción de residuo 0'63-2 mm</i>	
Metal identificado	%w
Au	0,0228
Al	11,41
Cu	8,88
Sn	3,1

Fe	0,87
Ti	0,682
Mg	0,666
Pb	0,924
Zn	0,209
Ni	0,133
Ag	0,0987
Co	0,0022

Tabla 14 – Resultados FRX. Fracción 0'63-2 mm

Como podemos observar en las tablas 13 y 14, tras este primer ensayo de caracterización encontramos una amplia variedad de metales de interés, como es el caso del cobre o el aluminio, llegando a alcanzar valores de hasta un 8'88 % y 11'41 % respectivamente.

No obstante, esta técnica nos aporta un análisis semicuantitativo de las muestras analizadas en base seca. Un análisis por vía húmeda, como el ensayo realizado tras lixiviación de muestras mediante la técnica ICP de masa, nos ofrecerá valores de composición más precisos y a su vez lograremos identificar nuevos elementos, que están presentes en la estructura interna de nuestro residuo, pero que mediante la técnica FRX no se logran identificar.

En este apartado se reflejan únicamente los principales elementos identificados tras el ensayo. En el Anejo I, se exponen los resultados originales del análisis donde se pueden apreciar todos los elementos que se lograron identificar.

5.2. Caracterización material férrico. Técnica μ FRX

Como se explica en anteriores apartados, la fracción separada magnéticamente, es sometida a temperaturas de 1500°C para elaborar una probeta y poder caracterizar la muestra mediante micro fluorescencia de rayos X.

A continuación, se muestran los resultados de caracterización μ FRX obtenidos, resultado del ensayo de las probetas de material ferroso separadas de la Fracción I y Fracción II de residuo:

- **Resultados Micro fluorescencia del material ferroso separado de la Fracción I.**

Caracterización de residuo ferroso con técnica FRX	
Fracción de residuo <0'63 mm	
Elemento identificado	%w
Si	15,92685
S	0,245509
Ca	11,23005
Ti	0,442394
Cr	0,032573
Mn	2,263092
Fe	44,72012
Ni	1,174644
Cu	6,384956
Zn	1,327076
Br	12,94238
Sr	0,177466
Sn	2,126926
Ba	0,696899
Pb	0,309065

Tabla 15 – Resultado FRX muestras magnéticas separadas de fracción < 0'63 mm

Como podemos apreciar en la tabla 15, el objetivo que perseguíamos de separar los materiales ferrosos se logra, adquiriendo valores del 44'720 % en Fe del peso total de la muestra analizada.

- **Resultados Micro fluorescencia del material ferroso separado de la Fracción II.**

En la Fracción II de residuo, correspondiente a aquella con valor granulométrico de 0'63 – 2 mm, los materiales no se distribuyen de manera proporcional (como si pasaba en la fracción > 0'63 mm) dado que el tamaño de partícula es superior, por tanto, se deciden analizar 3 puntos diferentes de la probeta para poder obtener un resultado medio genérico del porcentaje en material ferroso presente en nuestra muestra. A continuación, se muestran los puntos de referencia tomados en la probeta, y las altas variaciones de composición de cada uno de los materiales, en función del punto de referencia tomado:

- **Análisis FRX punto I:**

Caracterización de residuo ferroso con técnica FRX	
<i>Fracción de residuo 0'63-2 mm</i>	
Elemento identificado	%w
Si	0,516909
Ca	0,120621
Ti	0
Cr	0,090632
Mn	0,221304
Fe	57,25547
Ni	7,577204
Cu	4,547327
Zn	20,06386
Br	0,057617
Sr	0,000952
Sn	0,033901
Ba	0,106742
Pb	0,019830
Mg	0,001371
Al	0,696048
Sr	0,000952

Tabla 16 – Resultados obtenidos en punto I de análisis



Figura 15 – Punto I de referencia de probeta. , [Elaboración propia].

- **Análisis FRX punto II:**

Caracterización de residuo ferroso con técnica FRX	
<i>Fracción de residuo 0'63-2 mm</i>	
Elemento identificado	%w
Si	1,019650
Ca	0,221892
Ti	0
Cr	0,045402
Mn	0,234296
Fe	96,557247
Ni	0,0124853
Cu	0,136296
Zn	0,000095
Br	0,167935
Sr	0,010594
Sn	0
Ba	0,161266
Pb	0,032446
Mg	0,001578
Al	1,137858
Sr	0,010594

Tabla 17 - Resultados obtenidos en punto II de análisis



Figura 16 - Punto II de referencia de probeta, [Elaboración propia].

- **Análisis FRX punto III:**

Caracterización de residuo ferroso con técnica FRX	
<i>Fracción de residuo 0'63-2 mm</i>	
Elemento identificado	%w
Si	1,787230
Ca	1,341467
Ti	1,070877
Cr	0,078424
Mn	0,349618
Fe	52,846617
Ni	5,638656
Cu	14,347606
Zn	6,749307
Br	0,294375
Sr	0,055317
Sn	2,915855
Ba	2,811776
Pb	1,226327
Mg	0,199916
Al	3,623805
Sr	0,055317

Tabla 18 - Resultados obtenidos en punto III de análisis



Figura 17 - Punto III de referencia de probeta, [Elaboración propia].

Como observamos en los resultados obtenidos en las Tablas 17, 18, en función del punto de enfoque de análisis obtenemos diferentes concentraciones de los elementos. No obstante, estos valores no son representativos ya que dependiendo del fragmento de análisis obtendremos diferentes concentraciones. Por tanto, se decide analizar un área de mayor amplitud (Figura 20) para obtener los valores medios de las concentraciones elementales.

Como resultado obtenemos (Tabla 18) una composición del 52,846617 % de Fe, pudiendo confirmar la separación mayoritaria de los materiales ferrosos integrados en la estructura de nuestro residuo. Por otro lado, podemos observar también, que hemos logrado separar un 14,347606 % de Cu, siendo estos valores muy representativos y pudiendo comprobar la eficacia del proceso (valores en mena por encima del 2% ya se consideran satisfactorios en minería tradicional).

5.3. Resultados extracción de elementos mediante métodos hidrometalúrgicos. ICP masa

Para lograr la lixiviación de los materiales contenidos en la estructura de nuestro residuo se realizaron tanto para la Fracción I como para la Fracción II de residuo, un total de 4 disoluciones de 300 ml (agua de análisis + H_2SO_4), con concentraciones molares: 2M, 4M, 6M y 8M.

Para cada concentración molar se tomaron muestras cada 30 minutos hasta completar la duración total del ensayo (3 horas). Posteriormente, se dejó el residuo en agitación con la disolución durante 24 horas para tomar una última muestra que reflejase la concentración máxima lixiviada. Cada una de las muestras tomadas, fueron analizadas mediante la técnica de espectrometría de masas de plasmas (ICP Masa) para determinar y cuantificar todos los elementos que se logran lixiviar. A continuación, se exponen los resultados obtenidos para los principales elementos de interés encontrados, no obstante, en el Anejo II, se adjuntan los resultados de todos los elementos que se han logrado identificar.

Los resultados de concentración elemental obtenidos de la técnica ICP masa vienen expresados en ppb. Para cada uno de los ensayos realizados se toma como valor de referencia una muestra inicial, correspondiente al blanco de disolución (antes de añadir el residuo), con el objetivo de eliminar la concentración inicial en el resto de muestras analizadas.

Por otro lado, en los resultados obtenidos, tenemos que tener en cuenta la proporción equivalente en la muestra real, ya que las muestras analizadas han sido diluidas. La

proporción equivalente utilizada es de 70 partes de H₂O por cada parte de lixiviación. Es decir, las concentraciones obtenidas en el ICP equivalen únicamente al 1'408 % y, por tanto, tenemos que realizar la equivalencia al 100 % para cada uno de los resultados.

Una vez realizada la proporción equivalente podemos obtener el tanto por ciento de cada material sobre el total de residuo.

- Ejemplo resultado ICP para concentración 2M en análisis de Mg.

Al 71/1000			
Concentración ICP (ppb)		Proporción (ppm)	%
6,902158796	0	0	0
527,8076645	520,905506	36,9842909	0,22027571
798,7785673	791,876409	56,223225	0,33486138
984,287321	977,385162	69,39434651	0,4133076
1051,32081	1044,41865	74,15372424	0,44165411
1228,783759	1221,8816	86,75359364	0,516698
1311,481368	1304,57921	92,62512385	0,5516684
4318,077033	4311,17487	306,0934161	1,82306978

Resultados ICP Diferencia concentración blanco (ppm elemento / ppm inicial total) * 100

Muestra 2M (mg)	5037
Disolución (l)	0,3

PPM INICIAL	16790
-------------	-------

Figura 18 – Desarrollo cálculo de concentraciones de elementos, [Elaboración propia]

Una vez obtenidas las concentraciones de cada elemento, se representan gráficamente para comprobar el desarrollo de la reacción. En el siguiente apartado se reflejan los resultados obtenidos para cada elemento así como su representación gráfica:

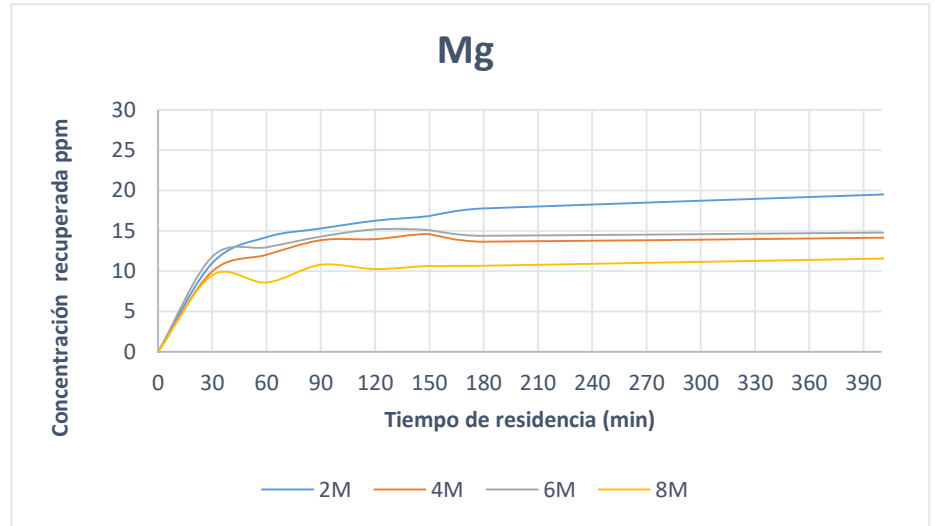
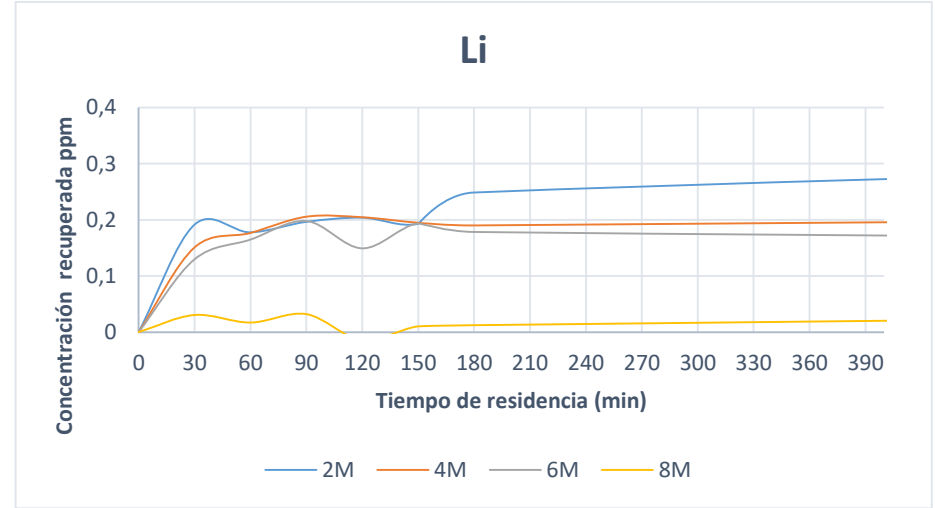
5.3.1. Resultados ICP masa fracción < 0'63 mm [ANALISIS CUANTITATIVO]

Li (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0	0	0	0
30	0,1915	0,1507	0,1296	0,0304
60	0,1779	0,1765	0,1648	0,0169
90	0,1965	0,2055	0,1978	0,0320
120	0,2040	0,2046	0,1492	0
150	0,1931	0,1948	0,1938	0,0102
180	0,2488	0,1900	0,1783	0,0122
1440	0,3647	0,2249	0,1475	0,0573

Tabla 19 – Concentración de Li en residuo (<0'63 mm)

Mg (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0	0	0	0
30	11,0141	9,9875	11,7781	9,5069
60	14,2170	12,0450	12,9398	8,6064
90	15,2885	13,8483	14,2685	10,7982
120	16,2539	13,9821	15,1555	10,2666
150	16,8315	14,6049	15,0696	10,6527
180	17,7763	13,6683	14,3625	10,6786
1440	27,3764	16,8380	16,9193	15,7646

Tabla 20 - Concentración de Mg en residuo (<0'63 mm)

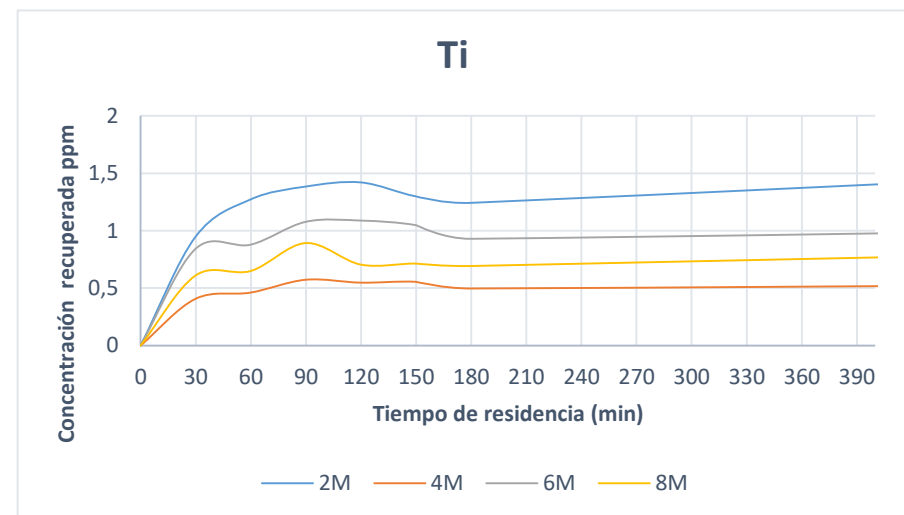
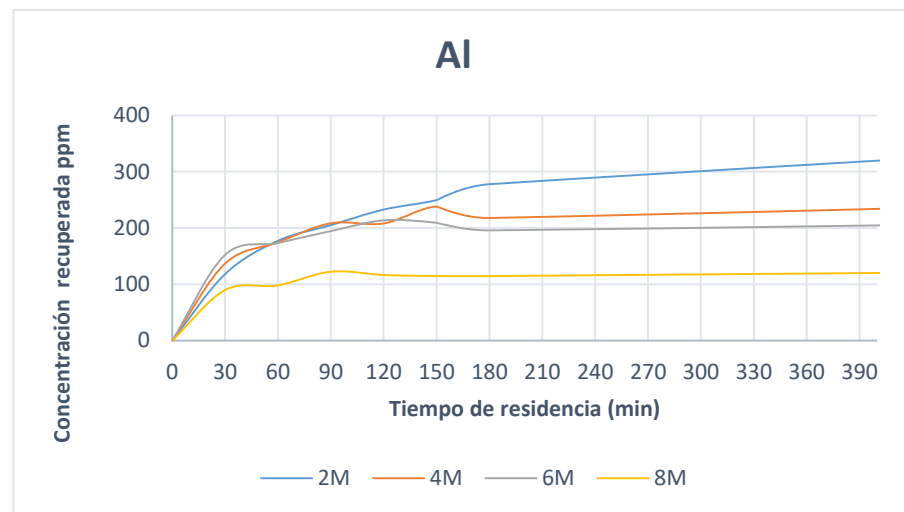


Al (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0	0	0	0
30	118,1768	136,785	152,1303	90,0137
60	177,3324	174,5170	173,2379	98,3943
90	205,1866	208,2986	194,3654	122,5919
120	232,7976	207,9034	213,4831	116,7432
150	249,5833	237,9673	209,1185	114,907
180	277,8771	217,5947	195,5908	114,7769
1440	508,4320	318,7349	251,6757	146,3735

Tabla 21 - Concentración de Al en residuo (<0'63 mm)

Ti (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0	0	0	0
30	0,9490	0,4068	0,8436	0,6101
60	1,2733	0,4605	0,8795	0,6492
90	1,3852	0,5718	1,0786	0,8921
120	1,4211	0,5466	1,0893	0,7046
150	1,2994	0,5538	1,0492	0,7138
180	1,2432	0,4959	0,9305	0,6925
1440	2,1882	0,6338	1,2465	1,1334

Tabla 22 - Concentración de Ti en residuo (<0'63 mm)

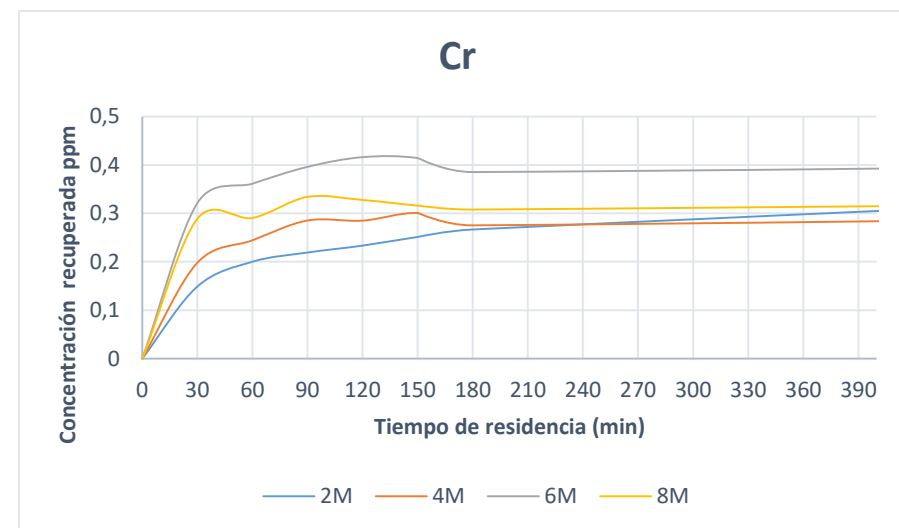
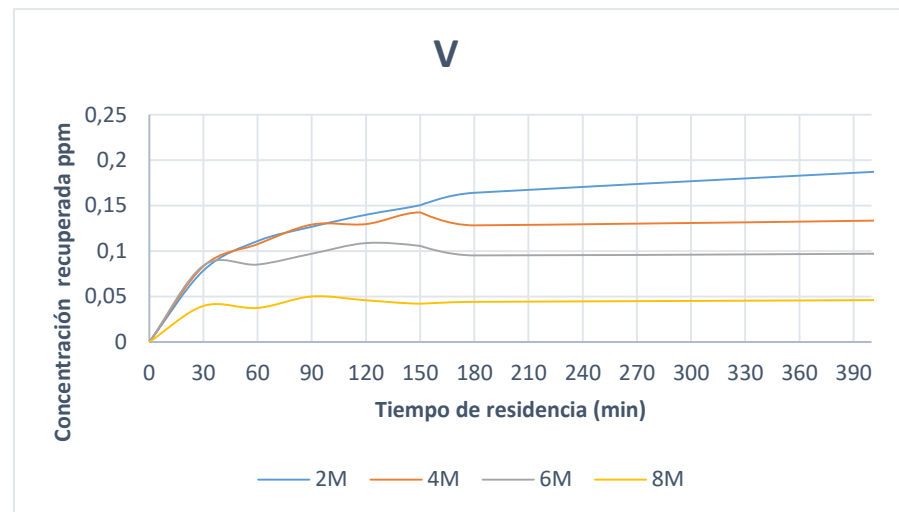


Tiempo (min)	V (ppm)			
	2M	4M	6M	8M
0	0	0	0	0
30	0,07873	0,0832	0,0839	0,0396
60	0,1110	0,1075	0,0849	0,0373
90	0,1267	0,1290	0,0968	0,0499
120	0,1399	0,1295	0,1085	0,0457
150	0,1504	0,1423	0,1053	0,0419
180	0,1641	0,1281	0,0950	0,0440
1440	0,2915	0,1635	0,1094	0,0544

Tabla 23 - Concentración de Ti en residuo (<0'63 mm)

Tiempo (min)	Cr (ppm)			
	2M	4M	6M	8M
0	0	0	0	0
30	0,1488	0,1980	0,3211	0,2887
60	0,2000	0,2443	0,3611	0,2903
90	0,2190	0,2852	0,3958	0,3338
120	0,2333	0,2849	0,4158	0,3274
150	0,2512	0,3006	0,4139	0,3159
180	0,2665	0,2751	0,3850	0,3076
1440	0,4817	0,3338	0,4373	0,3508

Tabla 24 - Concentración de Cr en residuo (<0'63 mm)

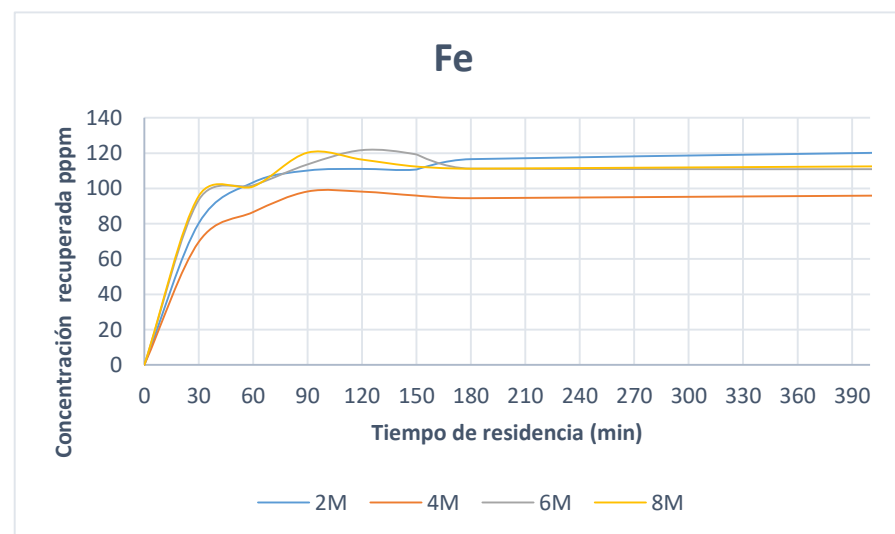
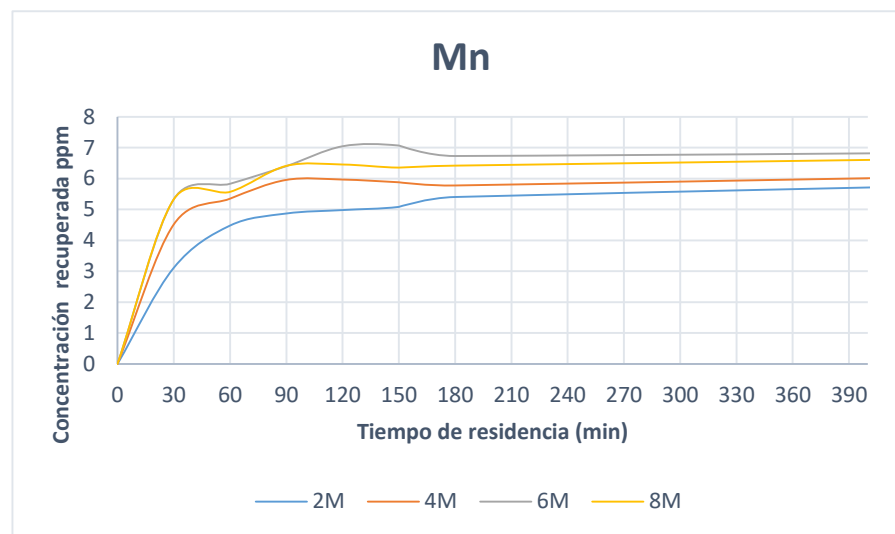


Mn (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0	0	0	0
30	3,1106	4,5157	5,3245	5,3254
60	4,4791	5,3512	5,8282	5,5698
90	4,8701	5,9591	6,3988	6,4112
120	4,9817	5,9707	7,0424	6,4558
150	5,0841	5,8822	7,0667	6,3556
180	5,4042	5,7786	6,7281	6,4191
1440	7,0655	7,1709	7,3516	7,4693

Tabla 25 - Concentración de Mn en residuo (<0'63 mm)

Fe (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0	0	0	0
30	80,2594	69,6786	93,5066	95,7226
60	103,3964	86,5672	101,7754	101,1009
90	110,0926	98,2191	113,6679	120,3274
120	111,0097	98,1238	121,7574	116,3631
150	110,6821	95,8897	119,2988	112,4017
180	116,5471	94,4182	111,2679	111,2310
1440	134,9364	103,011	112,5382	118,8871

Tabla 26 - Concentración de Fe en residuo (<0'63 mm)

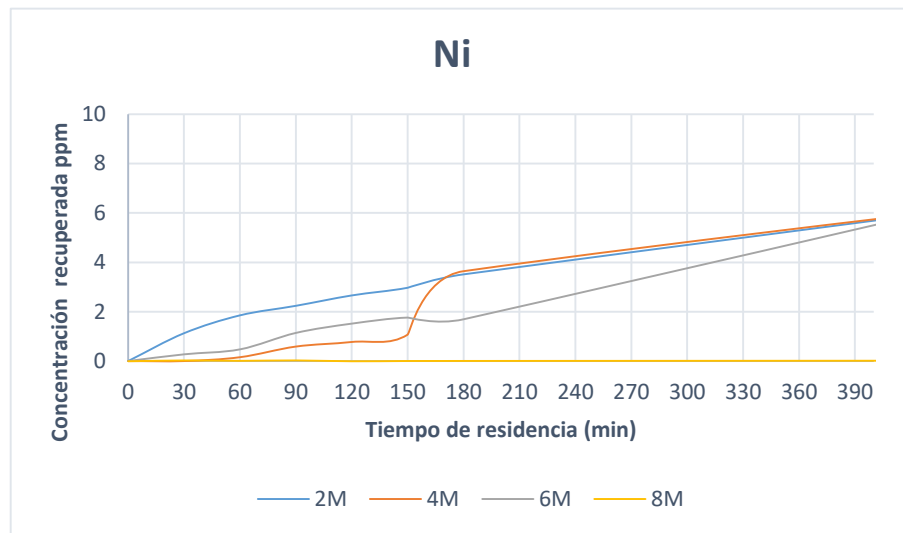
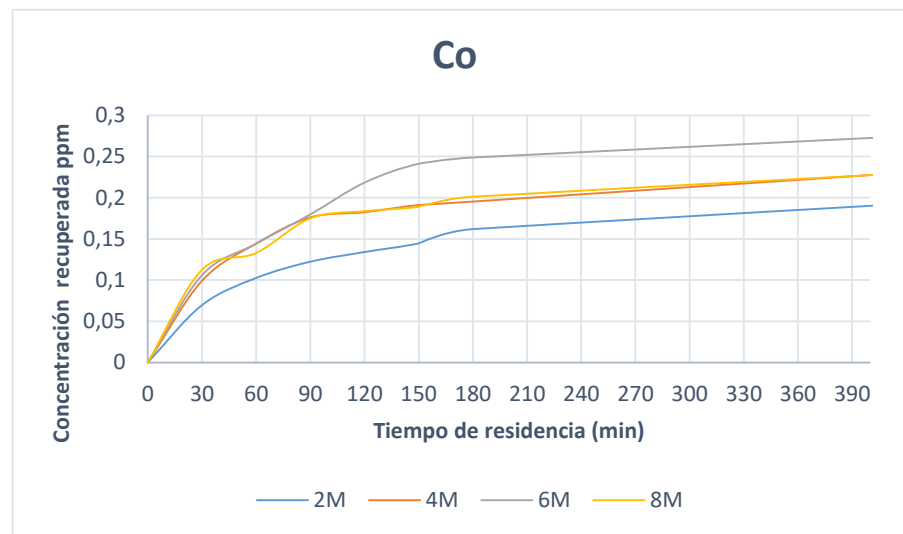


Co (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0	0	0	0
30	0,0695	0,0991	0,1059	0,1125
60	0,1025	0,1444	0,1442	0,1330
90	0,1223	0,1762	0,1797	0,1751
120	0,1341	0,1825	0,2183	0,1839
150	0,1446	0,1913	0,2413	0,1891
180	0,1619	0,1955	0,2488	0,2014
1440	0,3185	0,3797	0,3827	0,3483

Tabla 27 - Concentración de Fe en residuo (<0'63 mm)

Ni (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0	0	0	0
30	1,1269	-	0,2725	0,0304
60	1,8500	0,1559	0,4726	0,0169
90	2,2366	0,5870	1,1390	0,0320
120	2,6564	0,7726	1,5146	-
150	2,9677	1,0719	1,7603	0,0102
180	3,5088	3,6400	1,69143	0,0122
1440	15,8596	14,7526	23,7165	0,0573

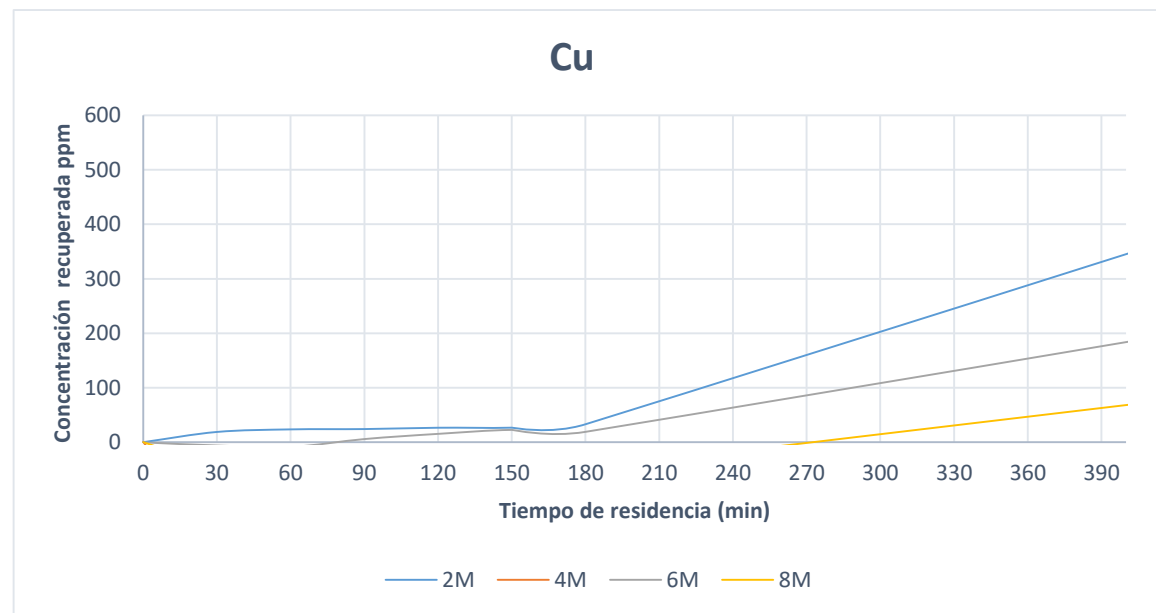
Tabla 28 - Concentración de Fe en residuo (<0'63 mm)



Tiempo (min)	Cu (ppm)			
	2M	4M	6M	8M
0	0	0	0	0
30	18,7516	0	0	0
60	23,4303	0	0	0
90	24,0346	6,0479	0	0
120	26,4897	15,5630	0	0
150	26,5774	22,8817	0	0
180	32,9140	19,2769	0	0
1440	1834,5380	972,3287	625,6187	10,5260

Tabla 29 - Concentración de Cu en residuo (<0'63 mm)

Podemos comprobar, que a la hora analizar la concentración en Cu de la muestra, nos aparecen valores de concentración muy representativos, no obstante, podemos determinar que la capacidad de lixiviación de este elemento es más efectiva a bajas concentraciones molares. Observamos también, que el cobre tiene una velocidad de lixiviación más lenta, por lo que, en estudios futuros, sería aconsejable utilizar periodos de reacción más prolongados.

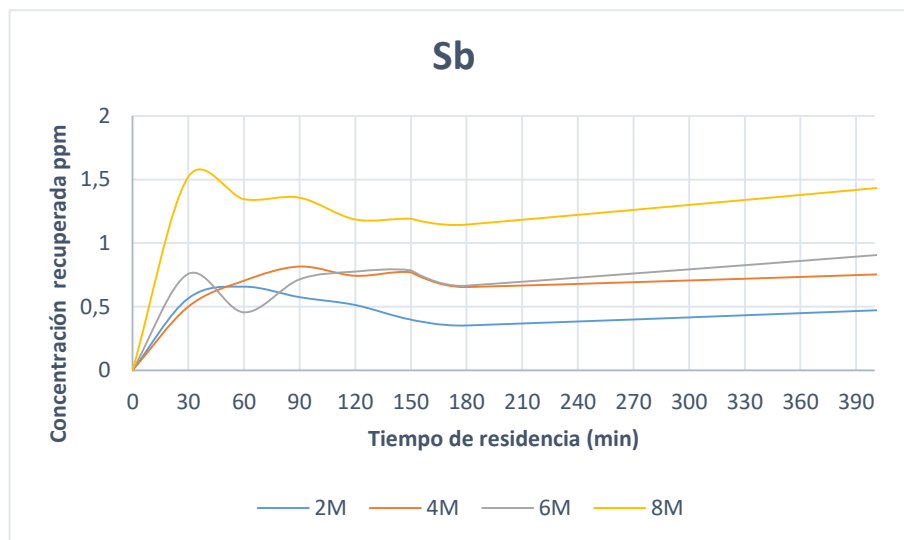
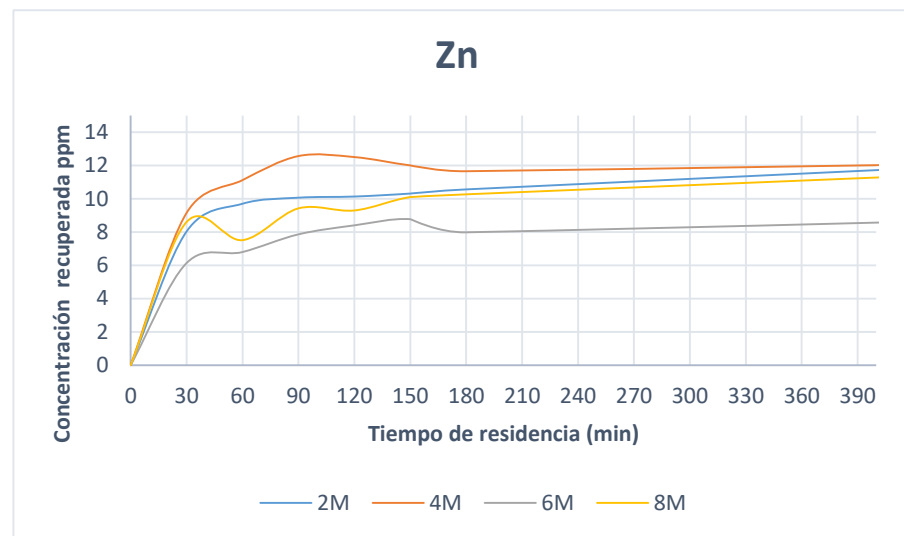


Zn (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0	0	0	0
30	8,0286	9,1479	6,1323	8,605
60	9,6988	11,1200	6,79803	7,5175
90	10,0641	12,5659	7,8602	9,4261
120	10,1315	12,5068	8,4011	9,3010
150	10,3116	12,0070	8,7730	10,1052
180	10,5618	11,6557	7,9832	10,2706
1440	17,1691	13,8856	11,6500	16,0440

Tabla 30 - Concentración de Zn en residuo (<0'63 mm)

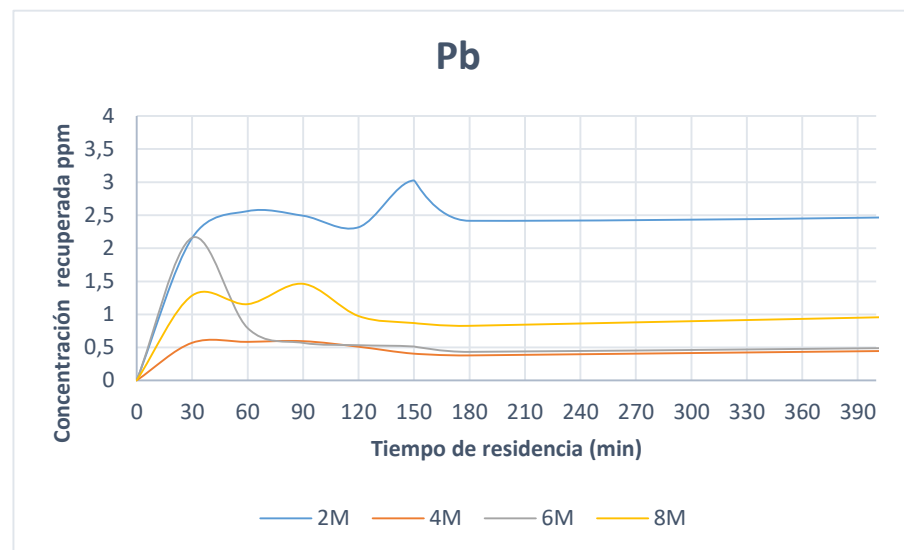
Sb (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0	0	0	0
30	0,5657	0,5000	0,7574	1,5184
60	0,6581	0,7041	0,4558	1,3448
90	0,5756	0,8160	0,7144	1,3563
120	0,5139	0,7436	0,7760	1,1856
150	0,3992	0,7710	0,7857	1,1908
180	0,3528	0,6547	0,6650	1,1450
1440	1,0569	1,27039	2,0941	2,8130

Tabla 31 - Concentración de Sb en residuo (<0'63 mm)



Tiempo (min)	Pb (ppm)			
	2M	4M	6M	8M
0	0	0	0	0
30	2,1553	0,5702	2,1592	1,2868
60	2,56080	0,5840	0,7915	1,1559
90	2,4916	0,5946	0,5674	1,4642
120	2,3171	0,5102	0,5323	0,9758
150	3,0257	0,4049	0,5125	0,8697
180	2,4149	0,37878	0,4314	0,8276
1440	2,9377	0,76193	0,7834	1,5921

Tabla 32 - Concentración de Pb en residuo (<0'63 mm)

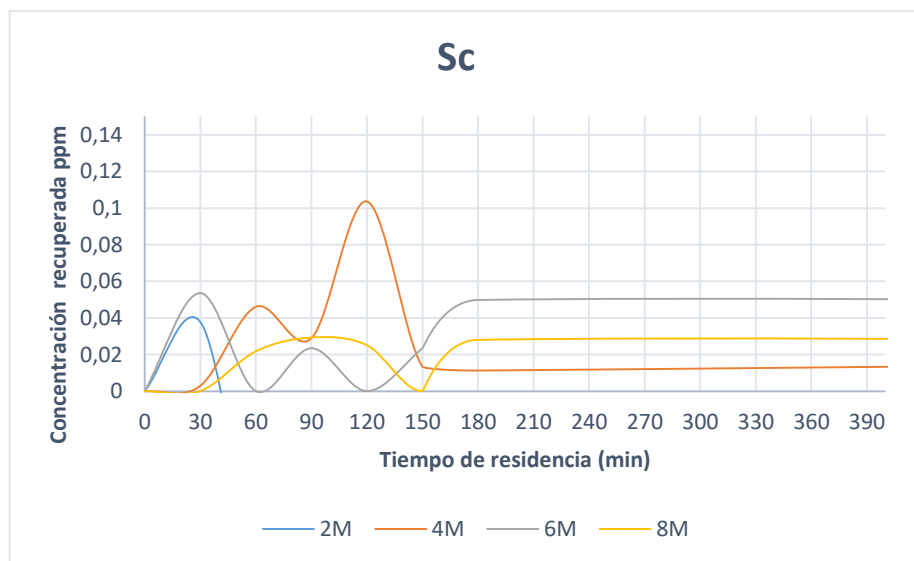


5.3.2. Resultados ICP masa fracción < 0'63 mm [ANÁLISIS SEMICUANTITATIVO]

En el siguiente epígrafe se representan los resultados obtenidos tras el análisis semicuantitativo, de las muestras de lixiviados, mediante la técnica ICP masa. Los elementos analizados en este tipo de ensayo, son aquellos cuyas concentraciones se encuentran en menor proporción, lo que conlleva que, en algunos casos, como resultado de la baja concentración identificada, se provoque la saturación del equipo técnico empleado.

Tiempo (min)	Sc (ppm)			
	2M	4M	6M	8M
0	0	0	0	0
30	0,0377	0,0029	0,0536	0
60	0	0,0460	0	0,0217
90	0	0,0289	0,0234	0,0293
120	0	0,1035	0	0,0251
150	0	0,0134	0,0234	0
180	0	0,0113	0,0498	0,0280
1440	0	0,0238	0,0419	0,0201

Tabla 33 - Concentración de Sc en residuo (<0'63 mm)

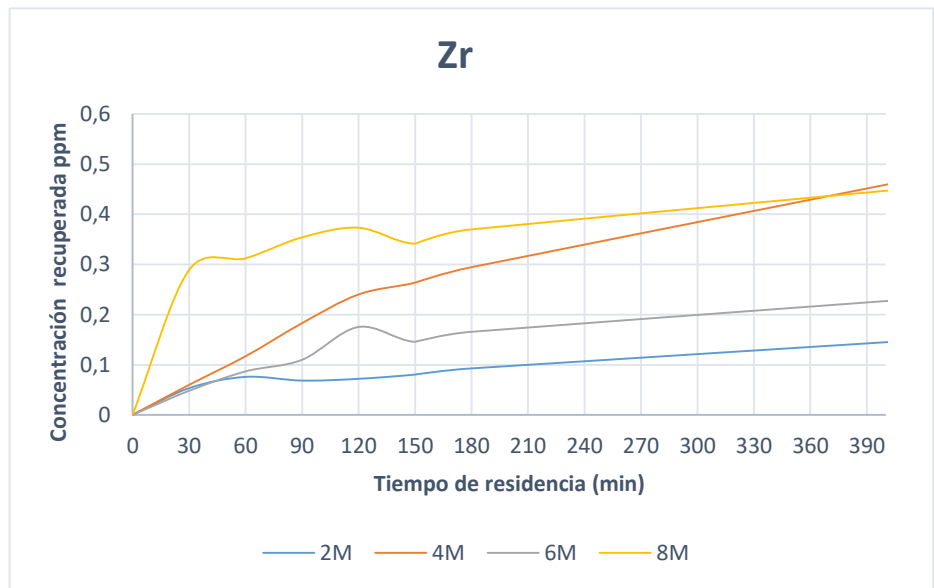
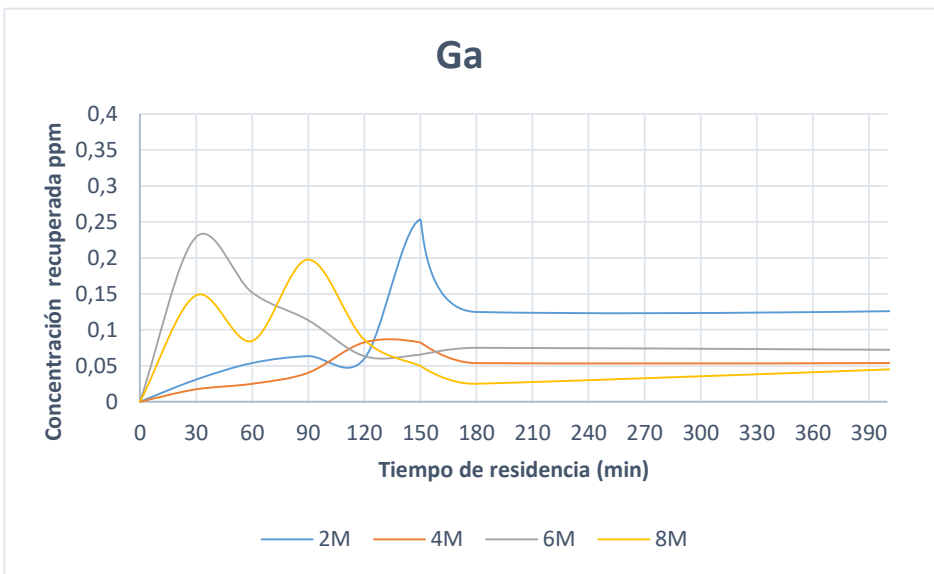


Ga (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0	0	0	0
30	0,0307	0,0172	0,2286	0,1479
60	0,0537	0,0249	0,1517	0,0845
90	0,0633	0,0403	0,1133	0,1978
120	0,0595	0,0825	0,0633	0,0864
150	0,2535	0,0825	0,0652	0,0499
180	0,1248	0,0537	0,0748	0,0249
1440	0,1824	0,0652	0,0556	0,1498

Tabla 34 – Concentración Ga en residuo (<0'63 mm)

Zr (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0	0	0	0
30	0,0531	0,0597	0,0479	0,2885
60	0,0757	0,1167	0,0866	0,3120
90	0,0683	0,1827	0,1097	0,3537
120	0,0718	0,2399	0,1753	0,3729
150	0,0803	0,2633	0,1457	0,3412
180	0,0926	0,2943	0,1656	0,3697
1440	0,3905	1,2324	0,5126	0,8032

Tabla 35 – Concentración Zr en residuo (<0'63 mm)

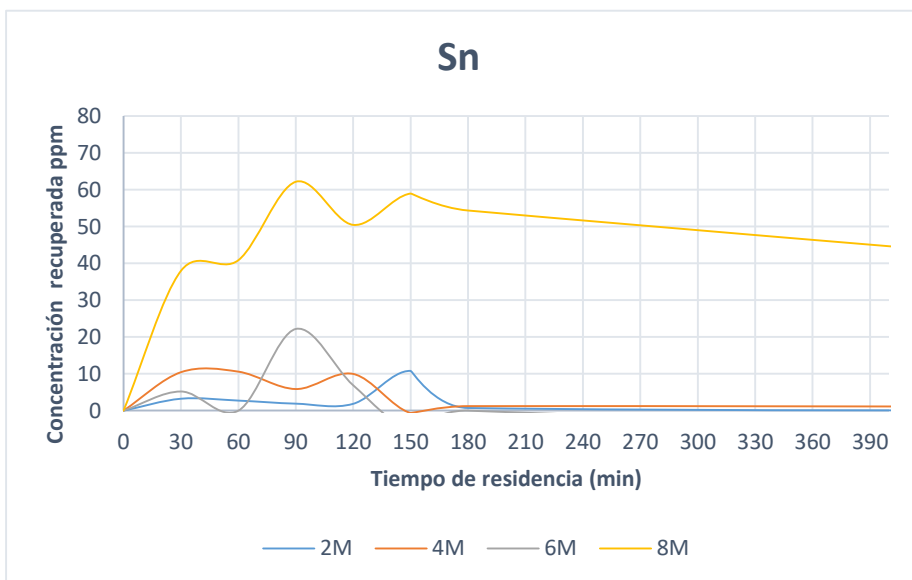
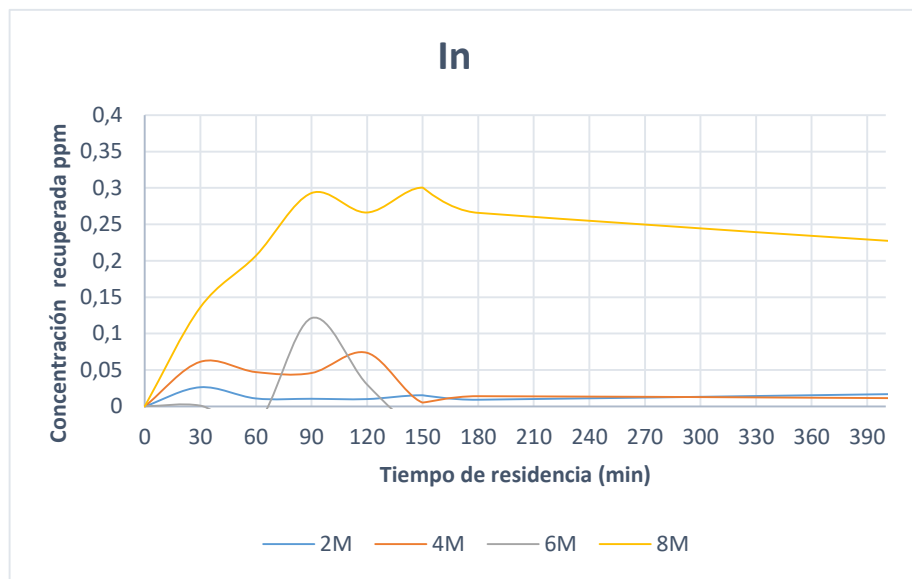


In (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0	0	0	0
30	0,0263	0,0611	0,0008	0,1361
60	0,0164	0,0470	0	0,2069
90	0,0105	0,0457	0,1211	0,2930
120	0,0101	0,0734	0,0300	0,2664
150	0,0153	0,0052	0	0,3006
180	0,0092	0,0140	0	0,2660
1440	0,0553	0	0	0,0582

Tabla 36 - Concentración In en residuo (<0'63 mm)

Sn (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0	0	0	0
30	3,2366	10,4706	5,1920	37,9937
60	2,7337	10,6168	0	40,893
90	1,8963	5,8750	22,1596	62,2107
120	1,8598	9,9912	6,8642	50,4819
150	10,8017	0	0	59,0062
180	0,7236	1,2221	0	54,3934
1440	0,9425	0	0	0

Tabla 37 - Concentración Sn en residuo (<0'63 mm)

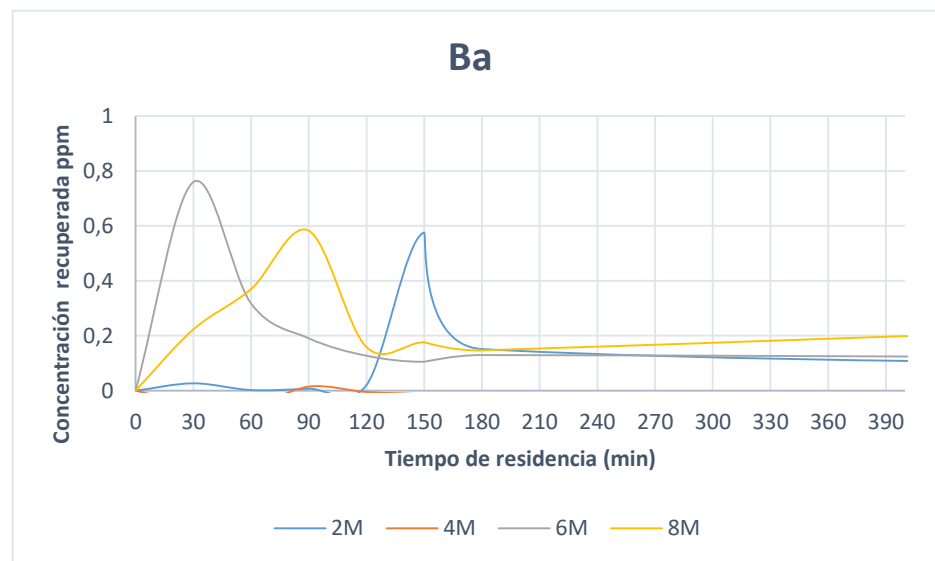
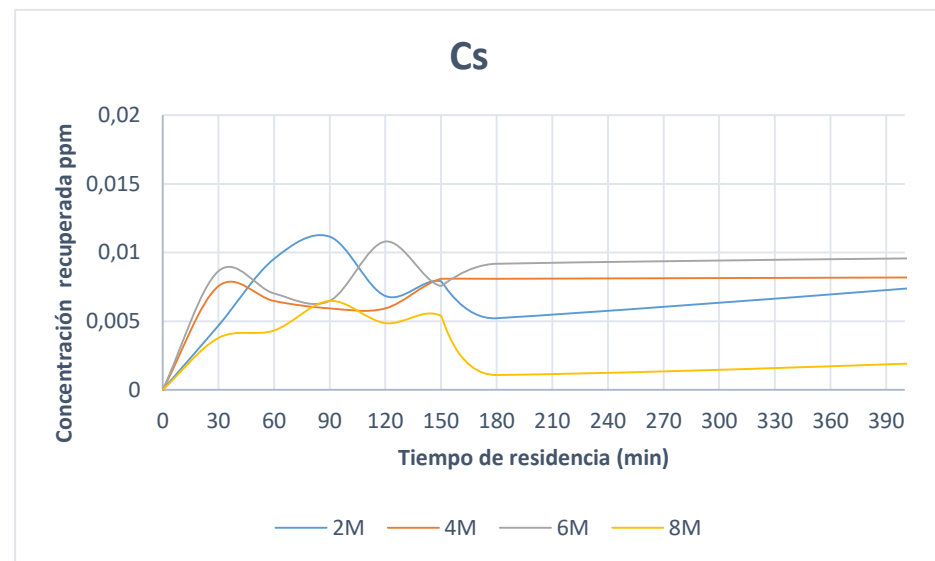


Tiempo (min)	Cs (ppm)			
	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0047	0,0076	0,0086	0,0038
60	0,0095	0,0065	0,0070	0,0043
90	0,0112	0,0059	0,0065	0,0065
120	0,0068	0,0059	0,0108	0,0049
150	0,0079	0,0081	0,0076	0,0054
180	0,0052	0,0081	0,0092	0,0011
1440	0,0187	0,0086	0,0108	0,0076

Tabla 38 - Concentración Cs en residuo (<0'63 mm)

Tiempo (min)	Ba (ppm)			
	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0269	0	0,7598	0,2228
60	0,0024	0	0,3183	0,3698
90	0,0073	0,0147	0,1909	0,5832
120	0,0196	0	0,1273	0,1591
150	0,5757	0	0,1052	0,1763
180	0,1518	0	0,1297	0,1469
1440	0,0710	0	0,0906	0,4581

Tabla 39 - Concentración Ba en residuo (<0'63 mm)

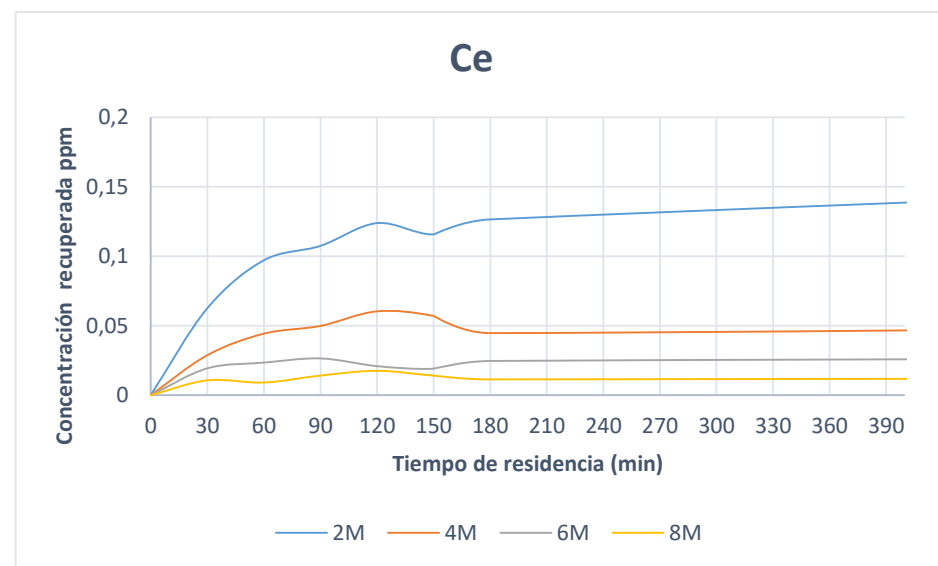
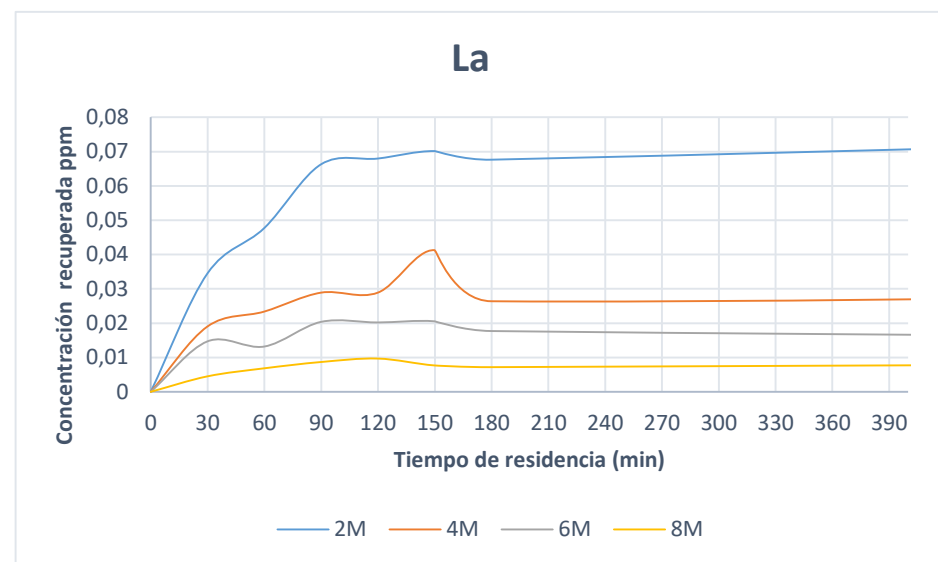


La (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0345	0,0190	0,0147	0,0045
60	0,0477	0,0234	0,0132	0,0068
90	0,0663	0,0289	0,0204	0,0087
120	0,0680	0,0289	0,0202	0,0097
150	0,0701	0,0413	0,0205	0,0077
180	0,0676	0,0264	0,0177	0,0072
1440	0,0859	0,0354	0,0125	0,0103

Tabla 40 – Concentración La en residuo (<0'63 mm)

Ce (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0626	0,0288	0,0193	0,0107
60	0,0971	0,0444	0,0234	0,0091
90	0,1075	0,0499	0,0265	0,0142
120	0,1239	0,0605	0,0209	0,0176
150	0,1158	0,0571	0,0191	0,0142
180	0,1266	0,0448	0,0246	0,0114
1440	0,1923	0,0607	0,0295	0,0152

Tabla 41 - Concentración Ce en residuo (<0'63 mm)

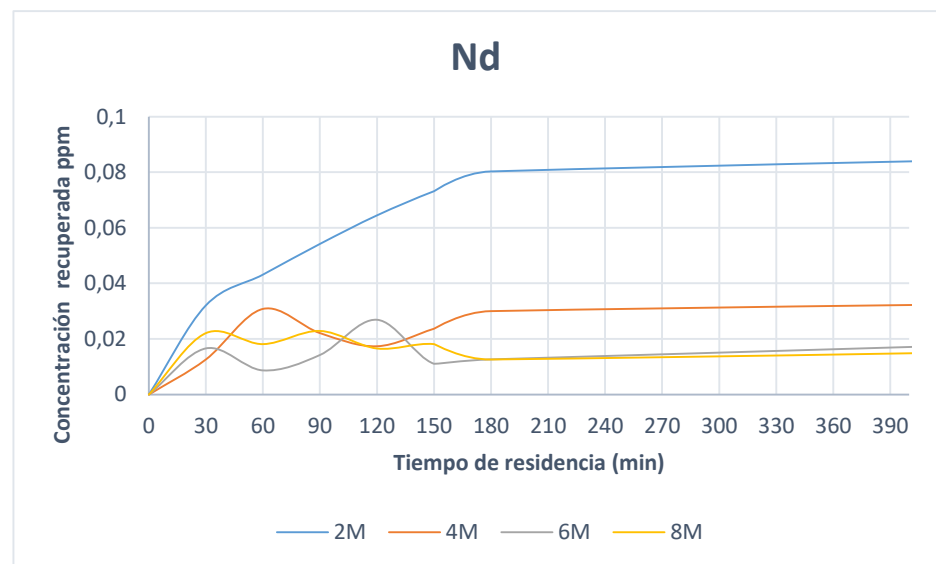
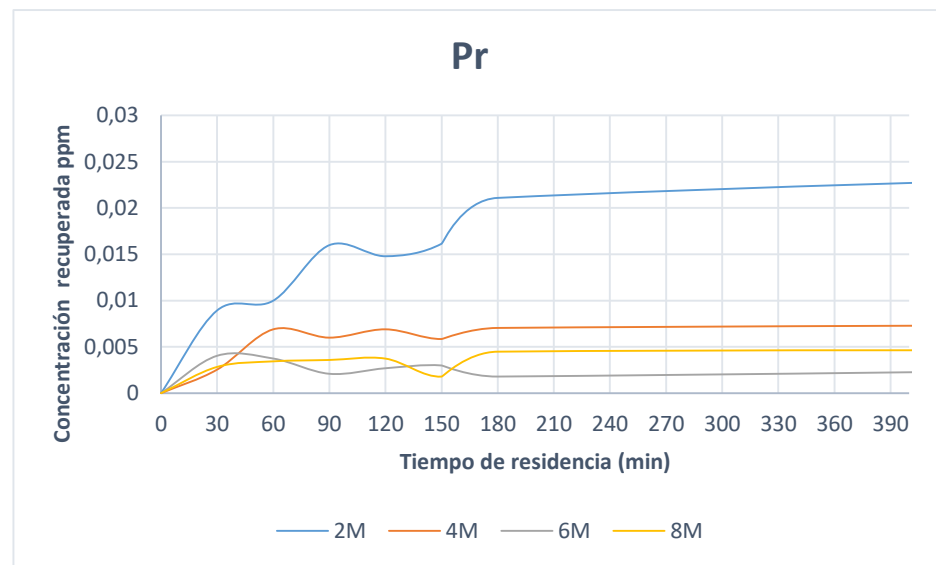


Pr (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0089	0,0025	0,0040	0,0028
60	0,0100	0,0069	0,0037	0,0034
90	0,0160	0,0060	0,0021	0,0036
120	0,0148	0,0069	0,0027	0,0037
150	0,0161	0,0058	0,0030	0,0018
180	0,0211	0,0070	0,0018	0,0045
1440	0,0285	0,0079	0,0049	0,0043

Tabla 42 – Concentración Pr en residuo (<0'63 mm)

Nd (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0321	0,0126	0,0166	0,0221
60	0,0432	0,0308	0,0087	0,0182
90	0,0542	0,0221	0,0142	0,0229
120	0,0645	0,0174	0,0269	0,0166
150	0,0732	0,0237	0,0111	0,0182
180	0,0803	0,0300	0,0126	0,0126
1440	0,0985	0,0403	0,0379	0,0276

Tabla 43 - Concentración Nd en residuo (<0'63 mm)

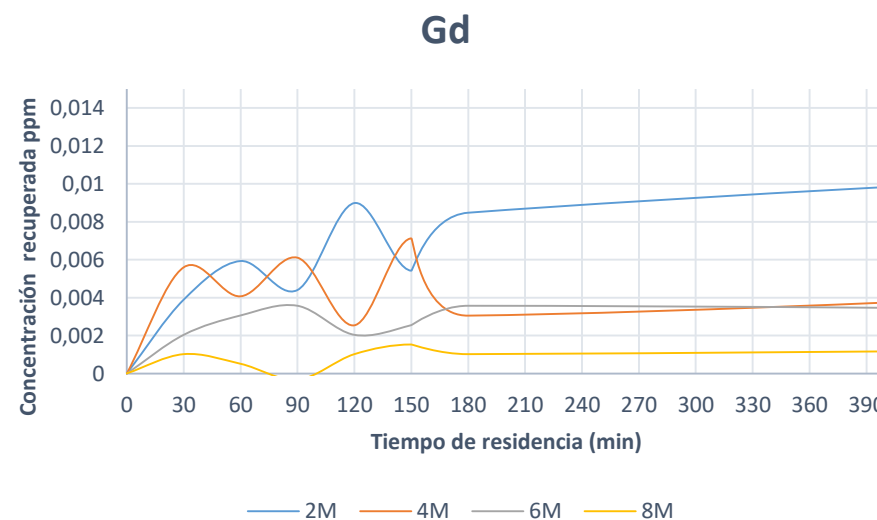
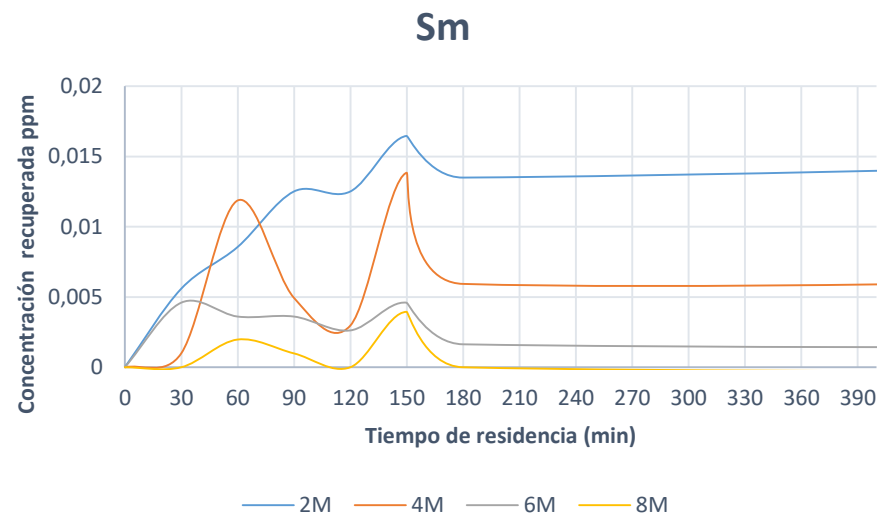


Sm (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0056	0,0010	0,0046	-
60	0,0086	0,0119	0,0036	0,0020
90	0,0125	0,0049	0,0036	0,0010
120	0,0125	0,0030	0,0026	0,0000
150	0,0165	0,0139	0,0046	0,0040
180	0,0135	0,0059	0,0016	0,0000
1440	0,0175	0,0089	0,0016	0,0000

Tabla 44 – Concentración Sm en residuo (<0'63 mm)

Gd (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0039	0,0056	0,0020	0,0010
60	0,0059	0,0041	0,0031	0,0005
90	0,0044	0,0061	0,0036	0,0000
120	0,0090	0,0025	0,0020	0,0010
150	0,0054	0,0071	0,0025	0,0015
180	0,0085	0,0031	0,0036	0,0010
1440	0,0151	0,0087	0,0025	0,0020

Tabla 45 - Concentración Gd en residuo (<0'63 mm)

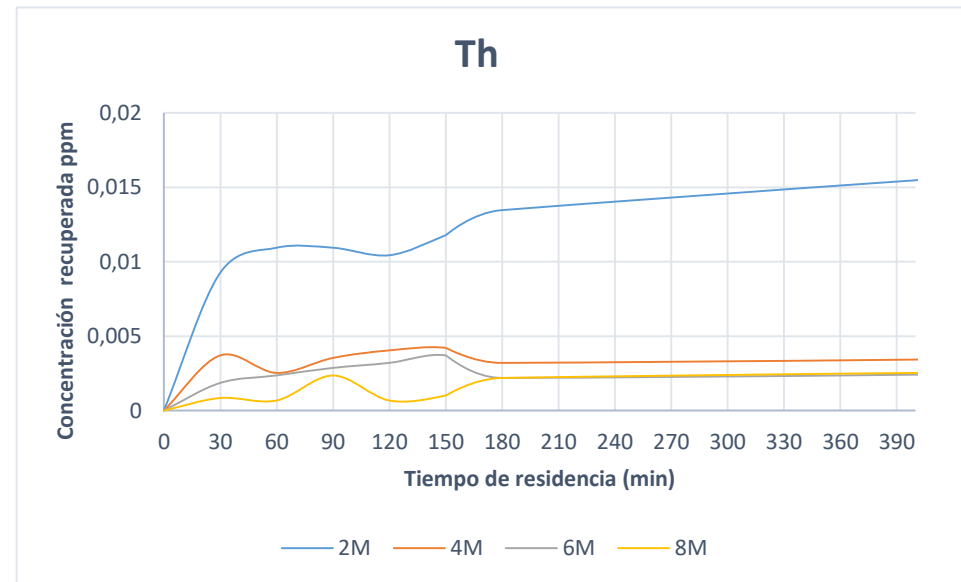
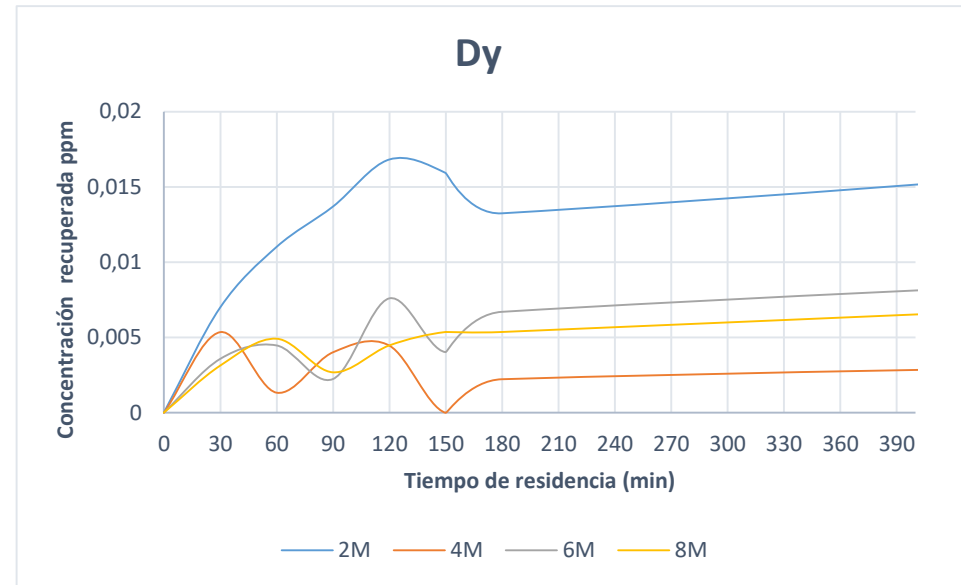


Dy (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0070	0,0054	0,0036	0,0031
60	0,0110	0,0013	0,0045	0,0049
90	0,0137	0,0040	0,0022	0,0027
120	0,0168	0,0045	0,0076	0,0045
150	0,0159	-	0,0040	0,0054
180	0,0132	0,0022	0,0067	0,0054
1440	0,0253	0,0049	0,0138	0,0121

Tabla 46 – Concentración Dy en residuo (<0'63 mm)o

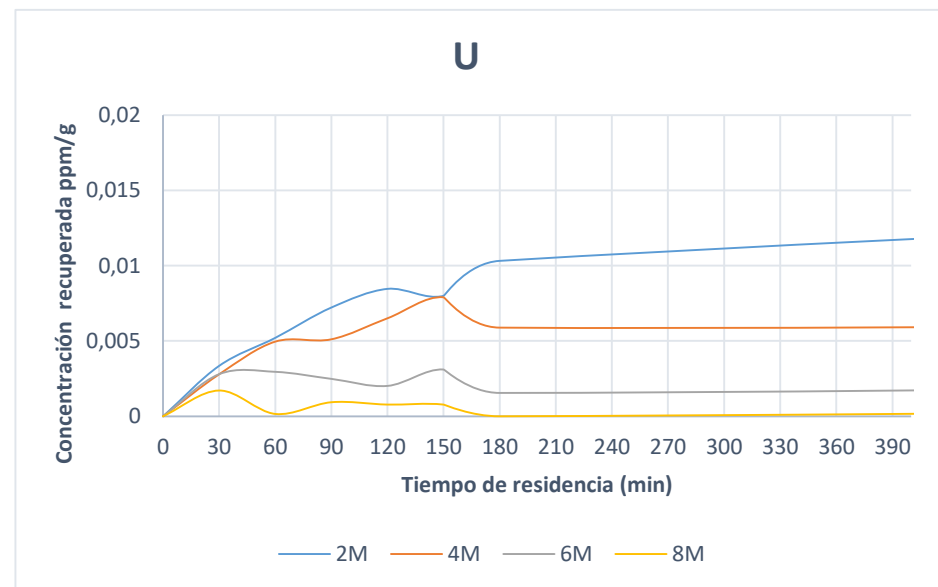
Th (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0093	0,0037	0,0019	0,0008
60	0,0109	0,0025	0,0024	0,0007
90	0,0109	0,0035	0,0029	0,0024
120	0,0104	0,0040	0,0032	0,0007
150	0,0118	0,0042	0,0037	0,0010
180	0,0135	0,0032	0,0022	0,0022
1440	0,0244	0,0049	0,0040	0,0037

Tabla 47 - Concentración Th en residuo (<0'63 mm)



Tiempo (min)	U (ppm)			
	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0034	0,0028	0,0028	0,0017
60	0,0052	0,0050	0,0029	0,0002
90	0,0072	0,0051	0,0025	0,0009
120	0,0085	0,0065	0,0020	0,0008
150	0,0080	0,0079	0,0031	0,0008
180	0,0103	0,0059	0,0015	0,0000
1440	0,0178	0,0068	0,0031	0,0012

Tabla 48 – Concentración U en residuo (<0'63 mm)



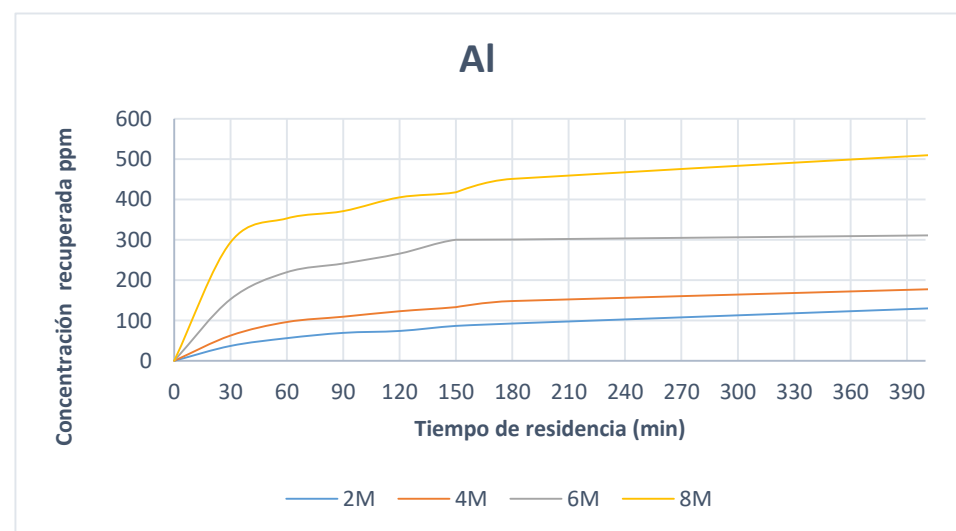
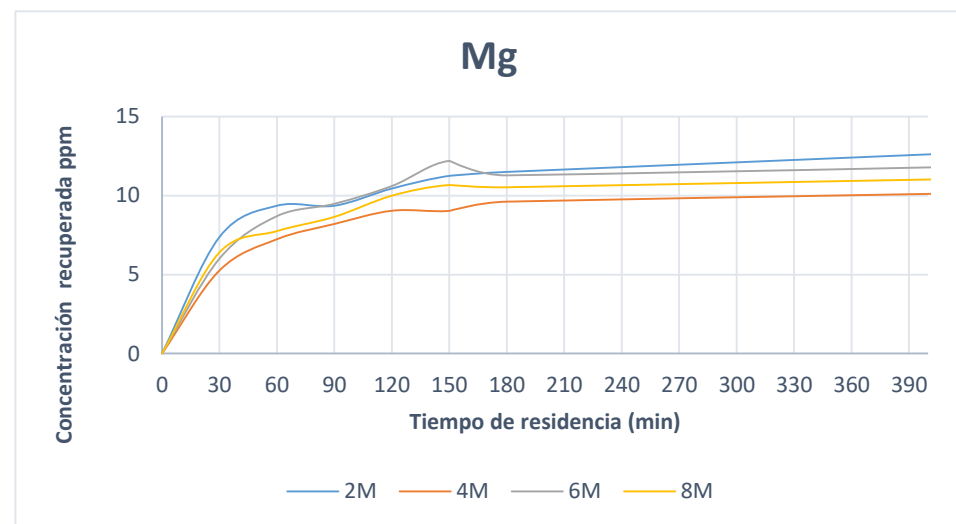
5.3.3. Resultados ICP masa fracción 0'63 – 2 mm [ANALISIS CUANTITATIVO]

Mg (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	7,3742	5,2552	6,0119	6,4042
60	9,3534	7,2318	8,6992	7,7522
90	9,3551	8,1972	9,4808	8,6528
120	10,4437	9,0335	10,6061	9,9946
150	11,2457	9,0248	12,1966	10,6709
180	11,4962	9,6085	11,2818	10,5269
1440	17,8370	12,2378	14,5388	13,4428

Tabla 49 – Concentración Mg en residuo (0'63 – 2 mm)

Al (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	36,9843	62,6657	152,7923	294,0069
60	56,2232	96,2021	219,7243	353,1710
90	69,3943	109,3913	241,2938	371,1619
120	74,1537	122,9196	265,7855	405,3675
150	86,7536	133,1436	300,1355	417,9842
180	92,6251	148,2094	300,6672	451,1179
1440	306,0934	310,4500	359,5495	776,3134

Tabla 50 – Concentración Al en residuo (0'63 – 2 mm)

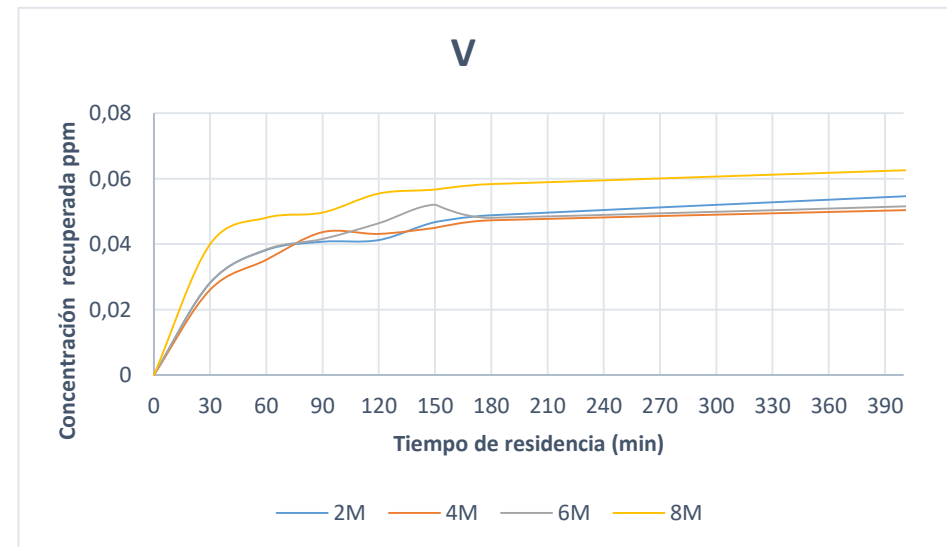
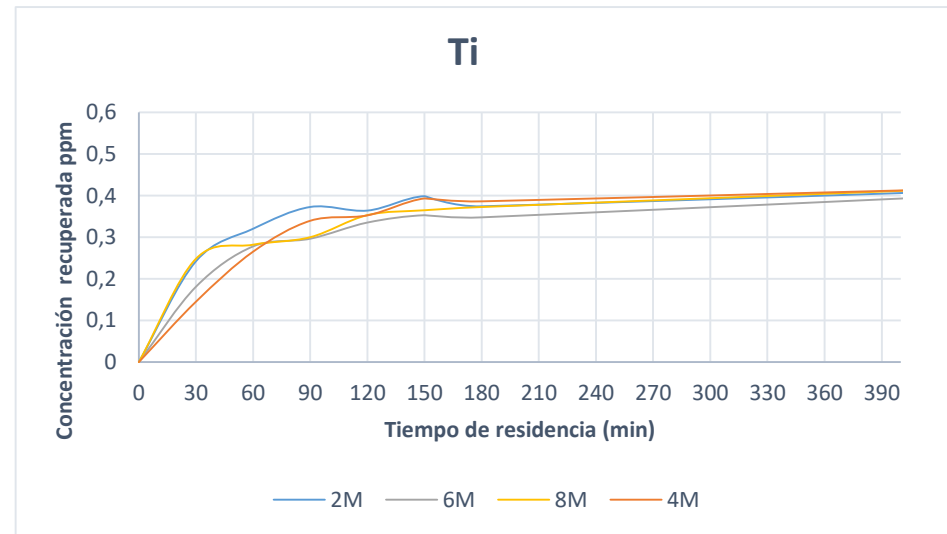


Ti (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,2423	0,1453	0,1811	0,2486
60	0,3204	0,2656	0,2780	0,2823
90	0,3727	0,3398	0,2964	0,3004
120	0,3640	0,3528	0,3352	0,3535
150	0,3986	0,3936	0,3529	0,3651
180	0,3743	0,3865	0,3477	0,3730
1440	0,5678	0,5405	0,6108	0,5953

Tabla 52 – Concentración Ti en residuo (0'63 – 2 mm)

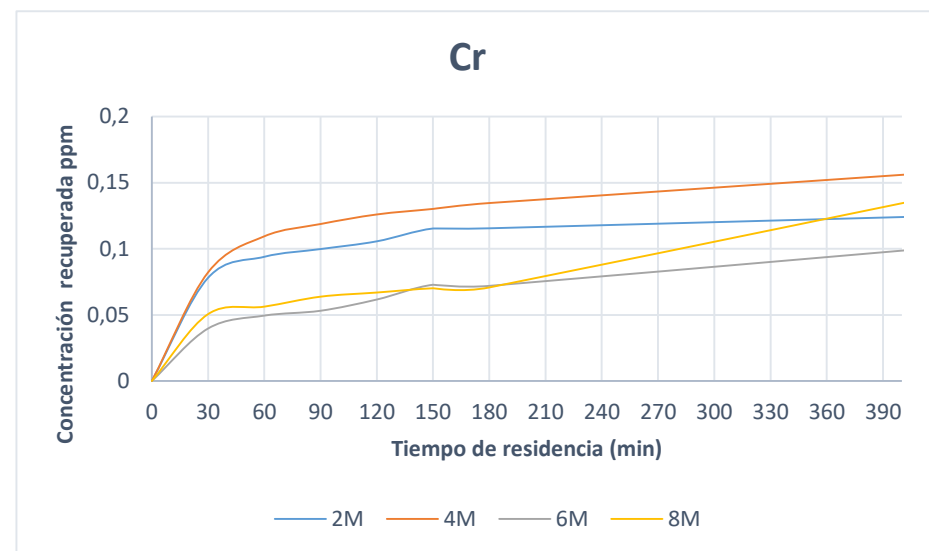
V (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0282	0,0261	0,0281	0,0400
60	0,0382	0,0352	0,0383	0,0480
90	0,0407	0,0437	0,0415	0,0496
120	0,0412	0,0431	0,0464	0,0554
150	0,0467	0,0450	0,0520	0,0566
180	0,0488	0,0473	0,0480	0,0583
1440	0,0814	0,0643	0,0697	0,0818

Tabla 51 – Concentración V en residuo (0'63 – 2 mm)



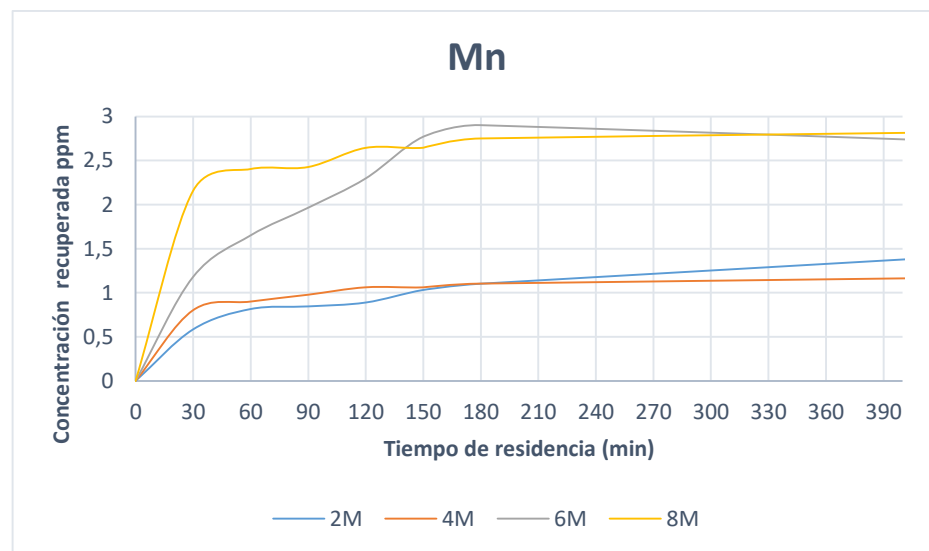
Cr (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0780	0,0822	0,0397	0,0505
60	0,0939	0,1094	0,0494	0,0562
90	0,0997	0,1187	0,0531	0,0637
120	0,1056	0,1260	0,0616	0,0669
150	0,1153	0,1302	0,0727	0,0701
180	0,1154	0,1346	0,0719	0,0707
1440	0,1643	0,2565	0,2261	0,4381

Tabla 53 – Concentración Cr en residuo (0'63 – 2 mm)



Mn (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,5846	0,8018	1,1797	2,1544
60	0,8159	0,9000	1,6514	2,4022
90	0,8459	0,9776	1,9646	2,4251
120	0,8895	1,0616	2,2973	2,6423
150	1,0321	1,0609	2,7702	2,6436
180	1,1031	1,1036	2,9016	2,7486
1440	2,6678	1,4254	1,9211	3,0765

Tabla 54 – Concentración Mn en residuo (0'63 – 2 mm)

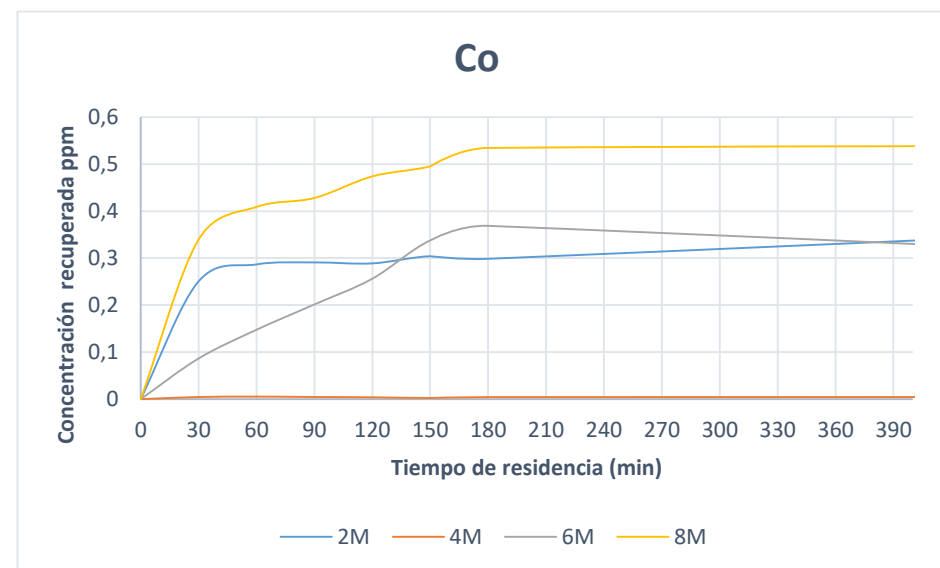
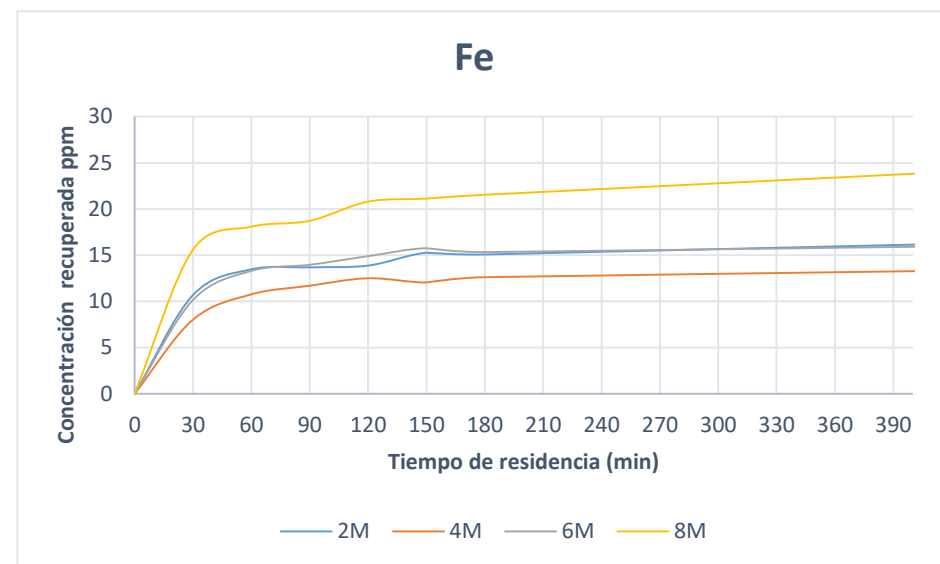


Fe (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	10,6859	8,0202	10,1436	15,6052
60	13,4790	10,7624	13,2951	18,0984
90	13,6931	11,6958	13,9562	18,7356
120	13,8814	12,5057	14,8895	20,8127
150	15,2773	12,0517	15,7547	21,1354
180	15,0885	12,6188	15,3288	21,5557
1440	21,3572	16,1840	18,8077	34,5678

Tabla 55 – Concentración Fe en residuo (0'63 – 2 mm)

Co (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,2505	0,0043	0,0866	0,3395
60	0,2867	0,0050	0,1476	0,4091
90	0,2909	0,0043	0,2016	0,4281
120	0,2889	0,0037	0,2562	0,4740
150	0,3041	0,0023	0,3377	0,4953
180	0,2986	0,0041	0,3688	0,5345
1440	0,5244	0,0044	0,1344	0,5411

Tabla 56 – Concentración Co en residuo (0'63 – 2 mm)

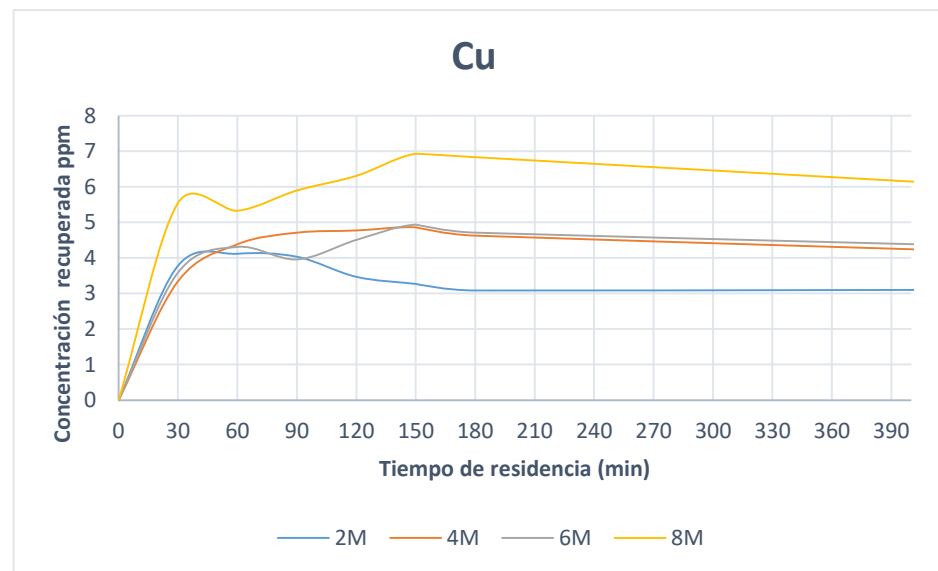
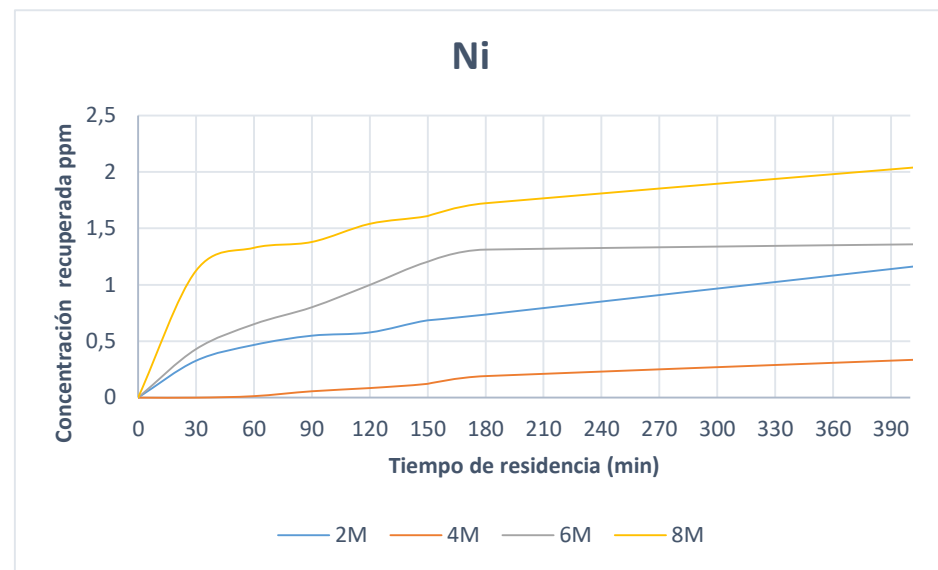


Ni (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,3267	-	0,4296	1,1248
60	0,4665	0,0132	0,6505	1,3280
90	0,5486	0,0565	0,8009	1,3797
120	0,5773	0,0849	0,9987	1,5406
150	0,6847	0,1226	1,2043	1,6094
180	0,7357	0,1911	1,3124	1,7232
1440	3,1586	0,9943	1,5386	3,4970

Tabla 57 – Concentración Ni en residuo (0'63 – 2 mm)

Cu (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	3,7780	3,3432	3,5894	5,5474
60	4,1130	4,3816	4,3091	5,3263
90	4,0291	4,7067	3,9578	5,8952
120	3,4650	4,7689	4,5057	6,3069
150	3,2665	4,8572	4,9352	6,9295
180	3,0828	4,6233	4,7095	6,8311
1440	3,2372	2,5018	2,9215	2,9105

Tabla 58 – Concentración Cu en residuo (0'63 – 2 mm)

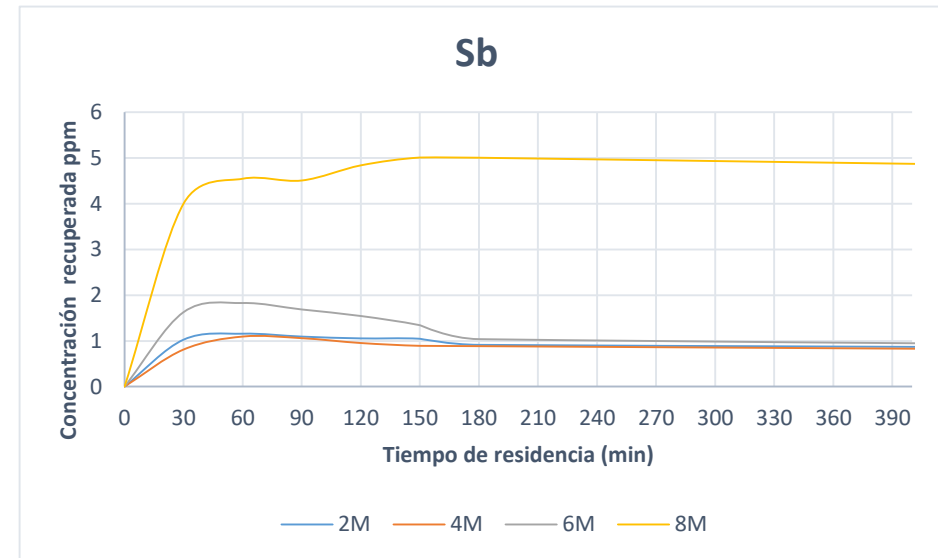
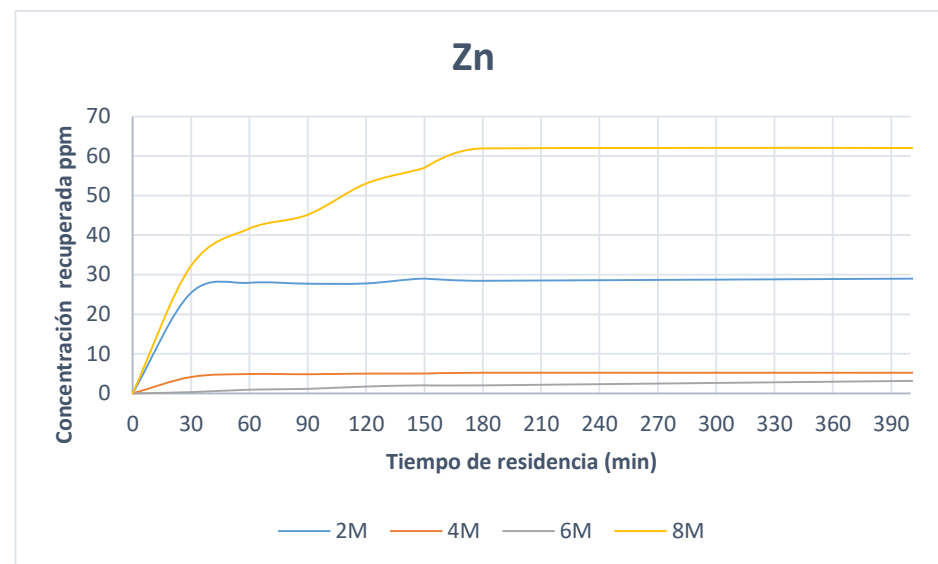


Zn (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	25,4006	4,1315	0,3329	32,1932
60	27,9772	4,8728	0,9478	41,6269
90	27,7484	4,8238	1,1596	45,1318
120	27,8153	4,9886	1,7398	52,9964
150	29,0407	5,0044	2,0439	56,9703
180	28,4840	5,2060	2,0309	61,8835
1440	31,7253	5,1393	8,5544	60,6188

Tabla 59 – Concentración Zn en residuo (0'63 – 2 mm)

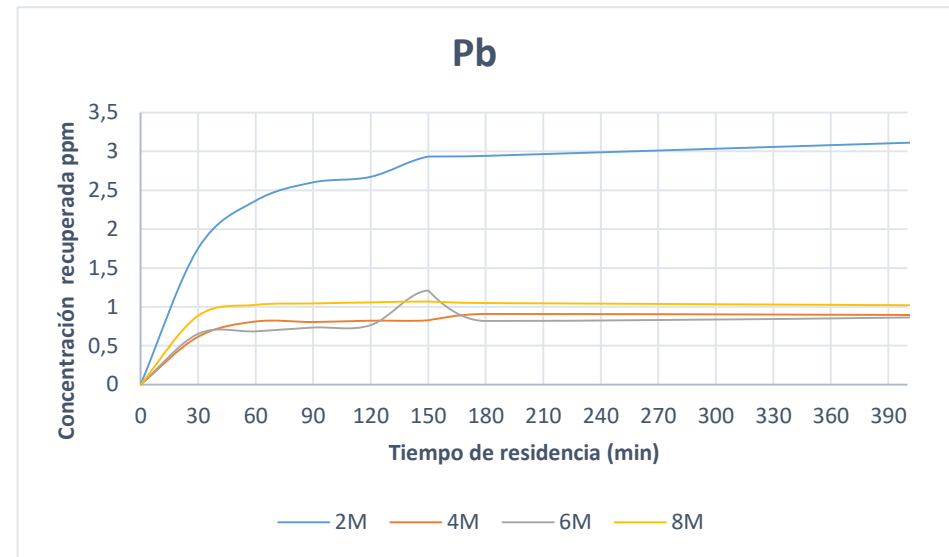
Sb (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	1,0301	0,8095	1,6322	4,0043
60	1,1601	1,0925	1,8306	4,5450
90	1,0965	1,0569	1,6894	4,5061
120	1,0568	0,9504	1,5459	4,8372
150	1,0488	0,8895	1,3442	5,0083
180	0,9154	0,8822	1,0391	5,0039
1440	0,7084	0,5631	0,6353	4,2381

Tabla 60 – Concentración Sb en residuo (0'63 – 2 mm)



Tiempo (min)	Pb (ppm)			
	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	1,7514	0,6158	0,6535	0,8862
60	2,3659	0,8123	0,6858	1,0269
90	2,6025	0,8060	0,7353	1,0452
120	2,6735	0,8231	0,7653	1,0588
150	2,9335	0,8270	1,2101	1,0698
180	2,9433	0,9098	0,8194	1,0502
1440	3,9124	0,8021	1,2319	0,8933

Tabla 61 – Concentración Pb en residuo (0'63 – 2 mm)

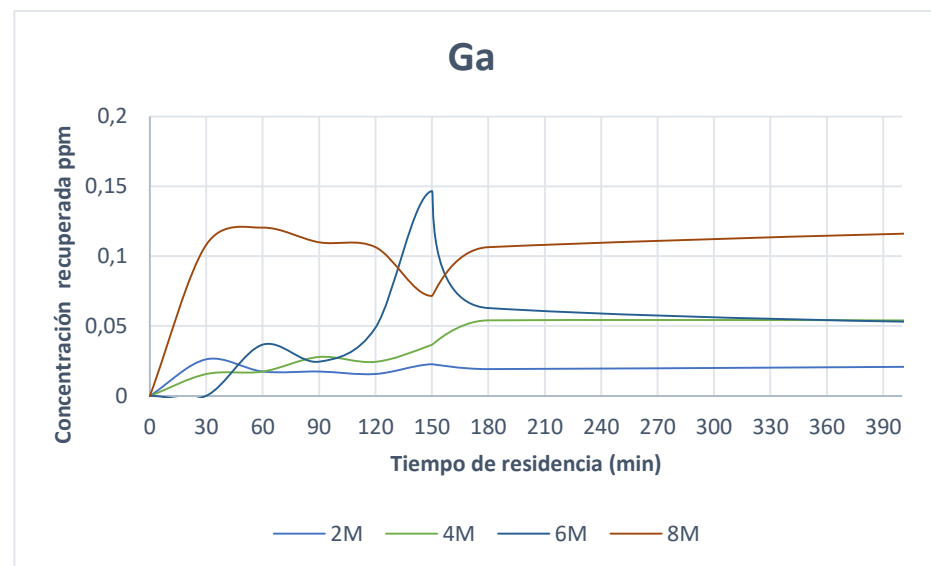


5.3.4. Resultados ICP masa fracción 0'63 - 2 mm [ANALISIS SEMICUANTITATIVO]

En el siguiente epígrafe se representan los resultados obtenidos tras el análisis semicuantitativo, de las muestras de lixiviados, mediante la técnica ICP masa. Los elementos analizados en este tipo de ensayo, son aquellos cuyas concentraciones se encuentran en menor proporción, lo que conlleva que, en algunos casos, como resultado de la baja concentración identificada, se provoque la saturación del equipo técnico empleado.

Tiempo (min)	Ga (ppm)			
	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0262	0,0157	-	0,1081
60	0,0174	0,0174	0,0366	0,1204
90	0,0174	0,0279	0,0244	0,1099
120	0,0157	0,0244	0,0488	0,1064
150	0,0227	0,0366	0,1465	0,0715
180	0,0192	0,0541	0,0628	0,1064
1440	0,0296	0,0471	0,0401	0,1483

Tabla 62 – Concentración Ga en residuo (0'63 – 2 mm)

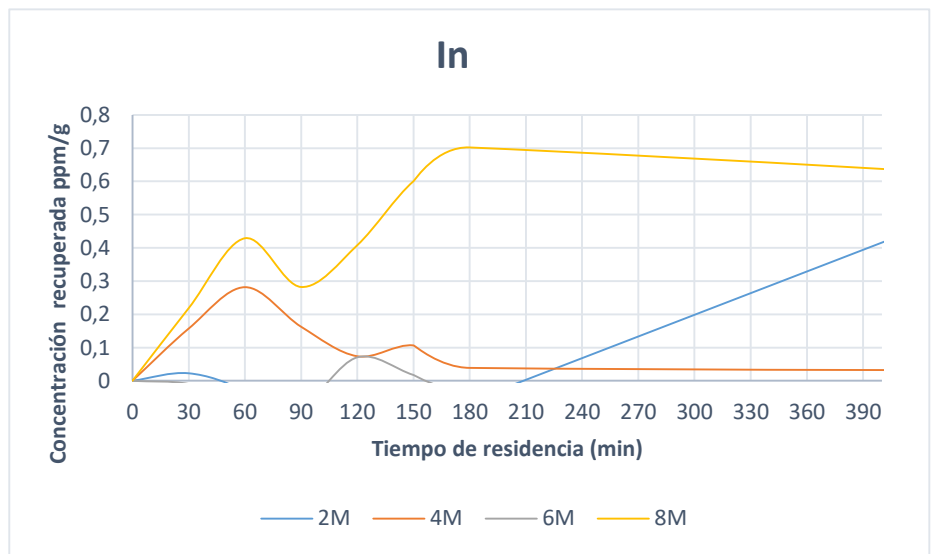
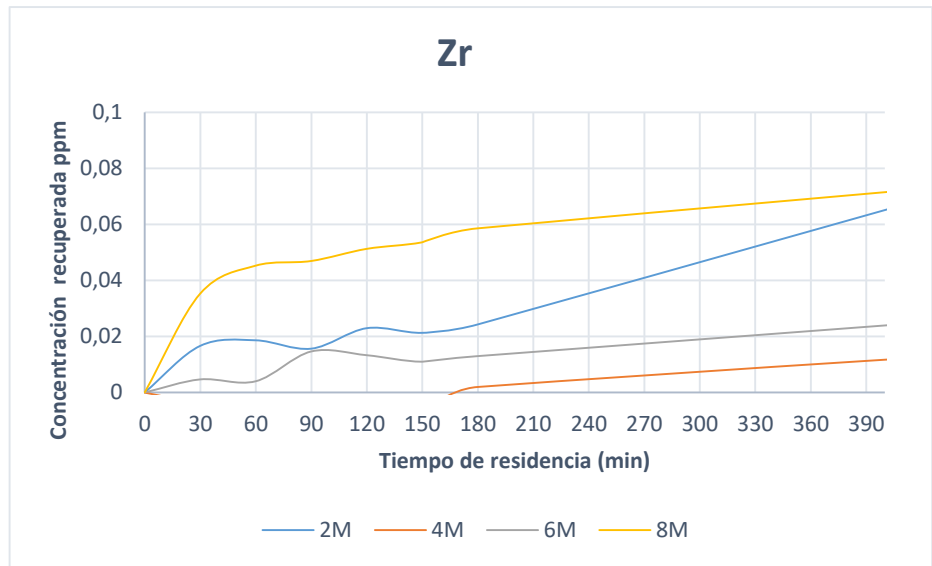


Zr (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0166	0	0,0047	0,0353
60	0,0186	0	0,0040	0,0452
90	0,0156	0	0,0146	0,0469
120	0,0229	0	0,0133	0,0512
150	0,0213	0	0,0110	0,0536
180	0,0243	0,0020	0,0130	0,0586
1440	0,2589	0,0546	0,0756	0,1313

Tabla 63 – Concentración Zr en residuo (0'63 – 2 mm)

In (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0224	0,1572	0	0,2184
60	0	0,2819	0	0,4288
90	0	0,1626	0	0,2821
120	0	0,0736	0,0709	0,4079
150	0	0,1064	0,0176	0,6006
180	0	0,0386	0	0,7022
1440	2,6744	0,0269	0	0,2884

Tabla 64 - Concentración In en residuo (0'63 – 2 mm)

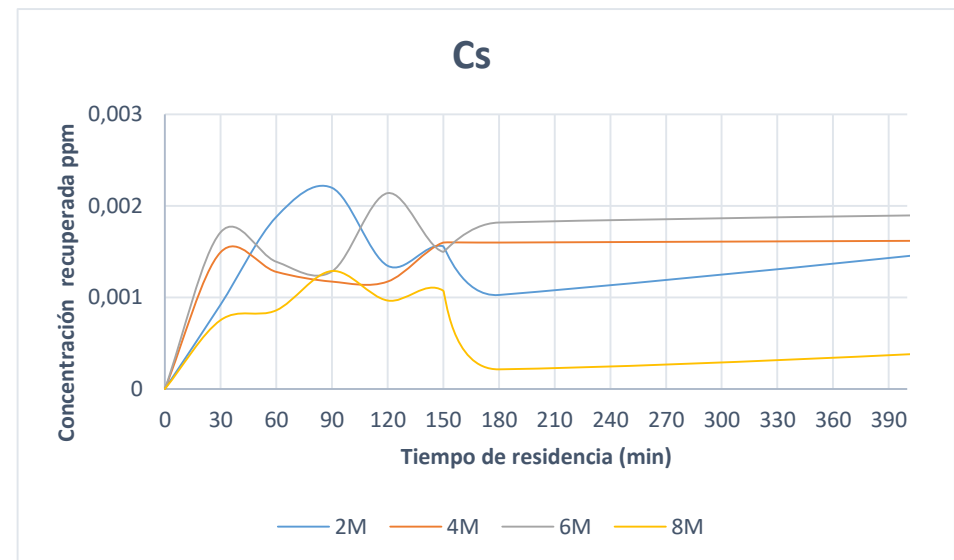
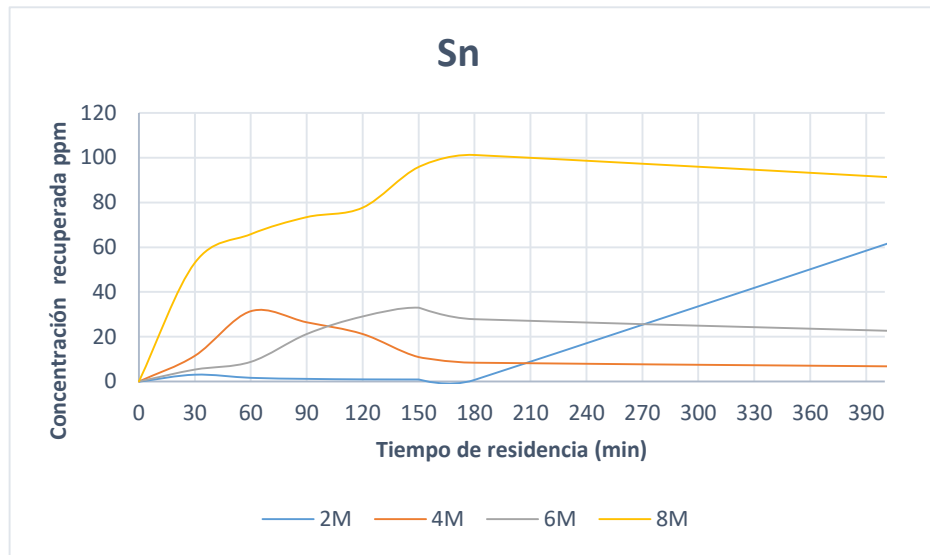


Sn (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	3,1168	11,4797	5,3163	53,0337
60	1,7158	31,4202	8,7610	65,7974
90	1,2492	26,4534	21,1751	73,4252
120	1,0221	21,2160	29,0172	77,6591
150	0,9793	10,9103	32,9353	95,8237
180	0,8020	8,3903	27,7938	101,1795
1440	350,3660	-	-	42,4518

Tabla 65 – Concentración Sn en residuo (0'63 – 2 mm)

Cs (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0009	-	0,0051	0,0055
60	0,0044	0,0023	0,0063	0,0032
90	0,0095	0,0000	0,0057	0,0032
120	0,0044	0,0029	0,0051	0,0061
150	0,0072	0,0040	0,0046	0,0038
180	0,0072	0,0011	0,0074	0,0084
1440	0,0124	0,0086	0,0103	0,0107

Tabla 66 – Concentración Cs en residuo (0'63 – 2 mm)

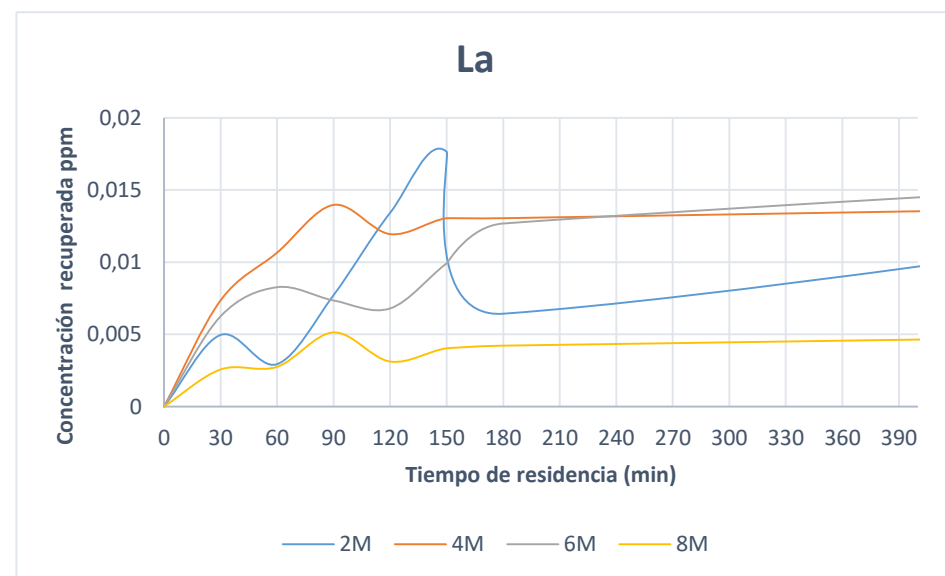
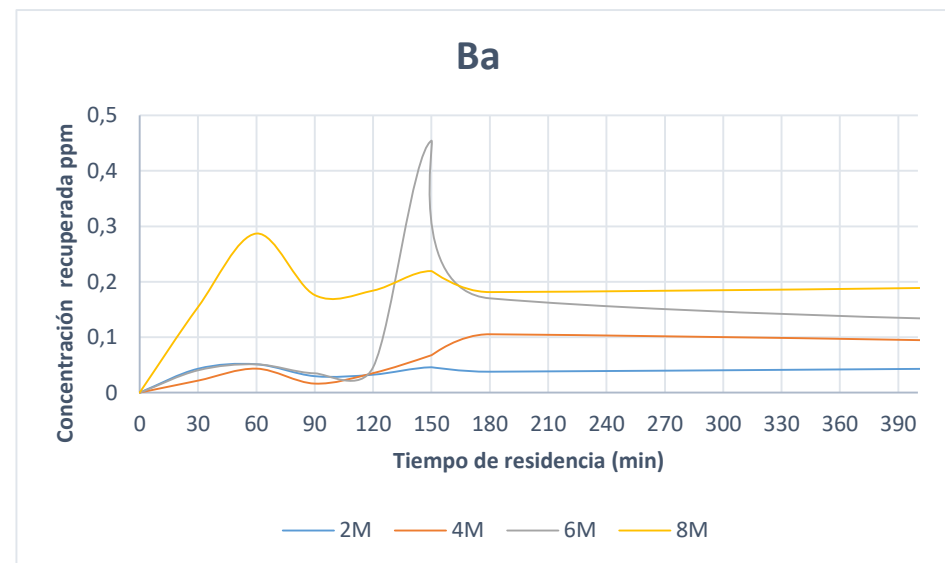


Ba (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0432	0,0216	0,0405	0,1541
60	0,0514	0,0432	0,0513	0,2866
90	0,0297	0,0162	0,0351	0,1757
120	0,0324	0,0351	0,0459	0,1838
150	0,0459	0,0676	0,4544	0,2190
180	0,0378	0,1054	0,1703	0,1811
1440	0,0703	0,0297	0,0757	0,2379

Tabla 67 – Concentración Ba en residuo (0'63 – 2 mm)

La (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0050	0,0073	0,0062	0,0026
60	0,0029	0,0107	0,0083	0,0028
90	0,0077	0,0140	0,0073	0,0051
120	0,0134	0,0119	0,0068	0,0031
150	0,0176	0,0130	0,0099	0,0040
180	0,0064	0,0130	0,0127	0,0042
1440	0,0298	0,0158	0,0221	0,0066

Tabla 68 – Concentración La en residuo (0'63 – 2 mm)

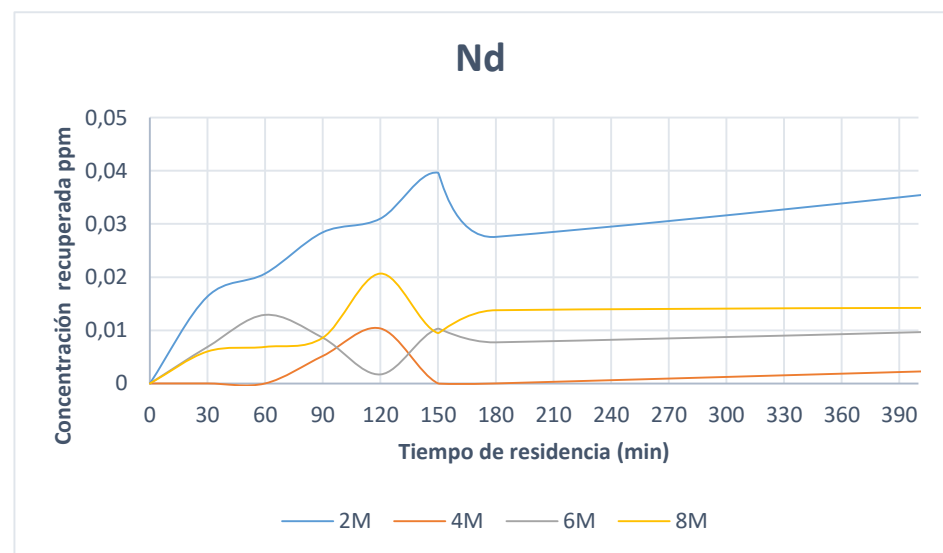
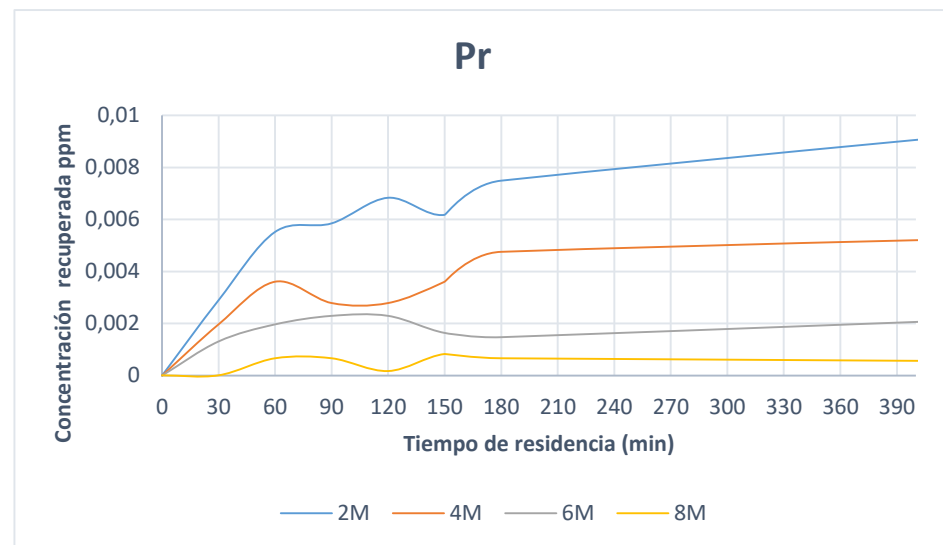


Pr (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0029	0,0020	0,0013	0,0000
60	0,0055	0,0036	0,0020	0,0007
90	0,0058	0,0028	0,0023	0,0007
120	0,0068	0,0028	0,0023	0,0002
150	0,0062	0,0036	0,0016	0,0008
180	0,0075	0,0048	0,0015	0,0007
1440	0,0160	0,0069	0,0049	0,0002

Tabla 69 – Concentración Pr en residuo (0'63 – 2 mm)

Nd (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0164	-	0,0069	0,0060
60	0,0207	0,0000	0,0129	0,0069
90	0,0284	0,0052	0,0086	0,0086
120	0,0310	0,0103	0,0017	0,0207
150	0,0396	0,0000	0,0103	0,0095
180	0,0276	-	0,0078	0,0138
1440	0,0776	0,0129	0,0198	0,0146

Tabla 70 – Concentración Nd en residuo (0'63 – 2 mm)

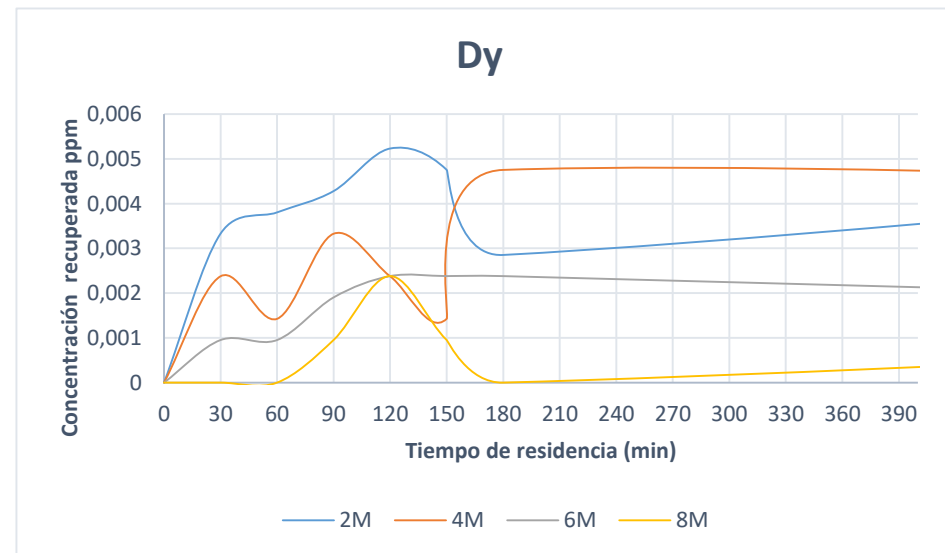
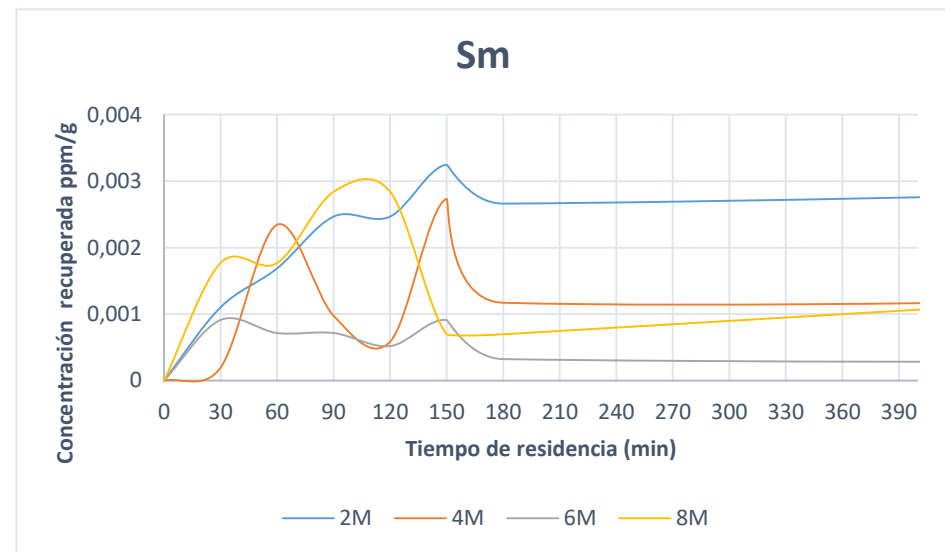


Sm (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0039	0,0000	0,0018	0,0018
60	0,0007	0,0011	0,0028	0,0018
90	0,0007	0,0032	0,0007	0,0028
120	0,0039	0,0021	0,0018	0,0028
150	0,0018	0,0043	0,0018	0,0007
180	0,0007	0,0086	0,0018	0,0007
1440	0,0050	0,0032	0,0050	0,0028

Tabla 71 – Concentración Sm en residuo (0'63 – 2 mm)

Dy (ppm)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0033	0,0024	0,0010	-
60	0,0038	0,0014	0,0010	-
90	0,0043	0,0033	0,0019	0,0010
120	0,0052	0,0024	0,0024	0,0024
150	0,0048	0,0014	0,0024	0,0010
180	0,0029	0,0048	0,0024	0,0000
1440	0,0076	0,0033	0,0010	0,0024

Tabla 72 – Concentración Dy en residuo (0'63 – 2 mm)

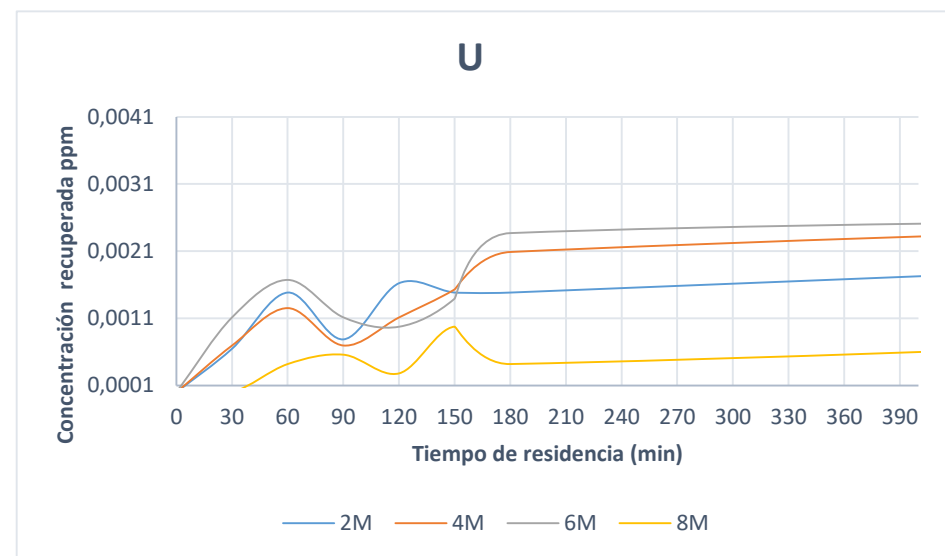
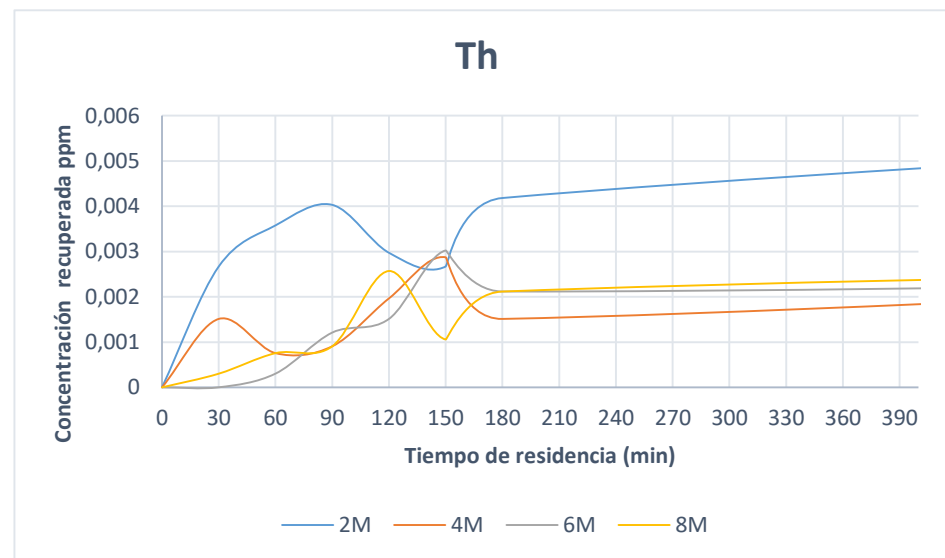


Th				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0027	0,0015	-	0,0003
60	0,0036	0,0008	0,0003	0,0008
90	0,0040	0,0009	0,0012	0,0009
120	0,0030	0,0020	0,0015	0,0026
150	0,0027	0,0029	0,0030	0,0011
180	0,0042	0,0015	0,0021	0,0021
1440	0,0074	0,0039	0,0029	0,0032

Tabla 73 – Concentración Th en residuo (0'63 – 2 mm)

U				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0006	0,0007	0,0011	0,0000
60	0,0015	0,0013	0,0017	0,0004
90	0,0008	0,0007	0,0011	0,0006
120	0,0016	0,0011	0,0010	0,0003
150	0,0015	0,0015	0,0014	0,0010
180	0,0015	0,0021	0,0024	0,0004
1440	0,0029	0,0032	0,0028	0,0017

Tabla 74 – Concentración U en residuo (0'63 – 2 mm)



Como podemos observar, en la mayoría de los resultados, la concentración de los elementos va aumentando de manera proporcional al tiempo de exposición, alcanzando en todos los casos, el valor máximo de lixiviación para la muestra tomada tras 24 horas de ensayo.

Por otro lado, con respecto a las concentraciones molares utilizadas, podemos comprobar que la velocidad de reacción es similar para todos los elementos y no depende de la molaridad de la disolución empleada, no obstante, este valor sí que influye en la capacidad de lixiviación, obteniendo los resultados más satisfactorios para la disolución con concentración molar 8M. Este factor es muy importante, pero no es determinante, ya que se puede comprobar que para algunos metales como es el caso del Pb, se obtienen mejores resultados cuando empleamos disoluciones con la molaridad más baja, 2M.

En la Figura 22 se pueden apreciar las diferencias obtenidas para metales como el Cu y el Pb, donde se comprueba que la velocidad de reacción es similar, pero los resultados más satisfactorios varían para cada material en función la concentración molar utilizada en la disolución:

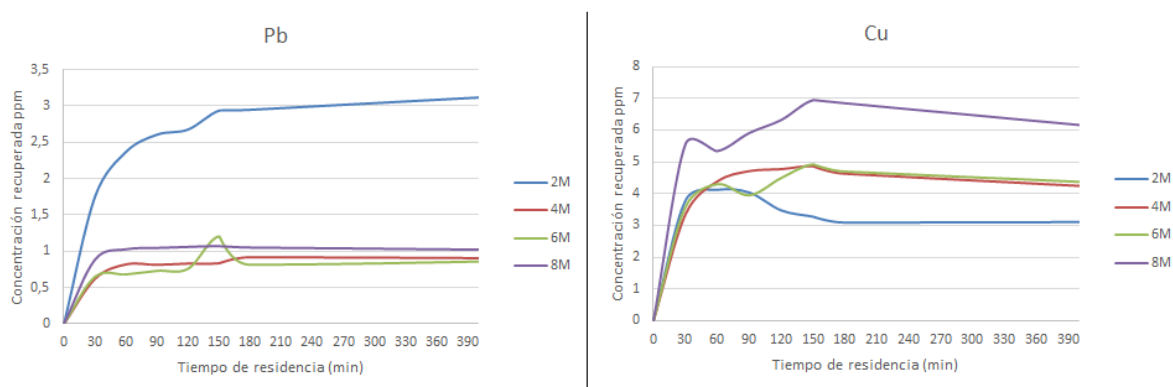


Figura 19 – Resultados comparativos entre Pb y Cu

Como hemos mencionado anteriormente, a partir de las concentraciones obtenidas en cada elemento, podemos determinar el porcentaje que supone cada material en relación a la cantidad de muestra de residuo que se somete a ensayo (aproximadamente 5 g de residuo en 300 ml de disolución). A continuación, se exponen los porcentajes obtenidos respecto a la muestra inicial para los elementos más representativos.

5.3.5. Principales porcentajes metálicos obtenidos en fracción < 0'63 mm respecto a muestra inicial.

Li %				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0011	0,0009	0,0008	0,0002
60	0,0011	0,0010	0,0010	0,0001
90	0,0012	0,0012	0,0012	0,0002
120	0,0012	0,0012	0,0009	-
150	0,0011	0,0012	0,0012	0,0001
180	0,0015	0,0011	0,0011	0,0001
1440	0,0022	0,0013	0,0009	0,0003

Tabla 75 - % Li en muestra inicial de residuo (<0'63 mm)

Mg (%)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0652	0,0592	0,0700	0,0567
60	0,0841	0,0714	0,0769	0,0513
90	0,0905	0,0821	0,0848	0,0644
120	0,0962	0,0829	0,0901	0,0612
150	0,0996	0,0866	0,0895	0,0635
180	0,1052	0,0810	0,0853	0,0637
1440	0,1620	0,0998	0,1005	0,0940

Tabla 76 - % Mg en muestra inicial de residuo (<0'63 mm)

Al (%)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,6994	0,8110	0,9039	0,5369
60	1,0495	1,0347	1,0293	0,5868
90	1,2144	1,2350	1,1549	0,7312
120	1,3778	1,2326	1,2685	0,6963
150	1,4771	1,4109	1,2425	0,6853
180	1,6446	1,2901	1,1622	0,6846
1440	3,0091	1,8897	1,4954	0,8730

Tabla 77 - % Al en muestra inicial de residuo (<0'63 mm)

Ti (%)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0056	0,0024	0,0050	0,0036
60	0,0075	0,0027	0,0052	0,0039
90	0,0082	0,0034	0,0064	0,0053
120	0,0084	0,0032	0,0065	0,0042
150	0,0077	0,0033	0,0062	0,0043
180	0,0074	0,0029	0,0055	0,0041
1440	0,0130	0,0038	0,0074	0,0068

Tabla 78 - % Ti en muestra inicial de residuo (<0'63 mm)

V (%)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0005	0,0005	0,0005	0,0002
60	0,0007	0,0006	0,0005	0,0002
90	0,0008	0,0008	0,0006	0,0003
120	0,0008	0,0008	0,0006	0,0003
150	0,0009	0,0008	0,0006	0,0003
180	0,0010	0,0008	0,0006	0,0003
1440	0,0017	0,0010	0,0007	0,0003

Tabla 79 - % V en muestra inicial de residuo (<0'63 mm)

Cr (%)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0009	0,0012	0,0019	0,0017
60	0,0012	0,0014	0,0021	0,0017
90	0,0013	0,0017	0,0024	0,0020
120	0,0014	0,0017	0,0025	0,0020
150	0,0015	0,0018	0,0025	0,0019
180	0,0016	0,0016	0,0023	0,0018
1440	0,0029	0,0020	0,0026	0,0021

Tabla 80 - % Cr en muestra inicial de residuo (<0'63 mm)

Mn (%)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0184	0,0268	0,0316	0,0318
60	0,0265	0,0317	0,0346	0,0332

90	0,0288	0,0353	0,0380	0,0382
120	0,0295	0,0354	0,0418	0,0385
150	0,0301	0,0349	0,0420	0,0379
180	0,0320	0,0343	0,0400	0,0383
1440	0,0418	0,0425	0,0437	0,0445

Tabla 81 - % Mn en muestra inicial de residuo (<0'63 mm)

Fe (%)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,4750	0,4131	0,5556	0,5709
60	0,6119	0,5132	0,6047	0,6030
90	0,6516	0,5823	0,6754	0,7177
120	0,6570	0,5818	0,7235	0,6940
150	0,6551	0,5685	0,7088	0,6704
180	0,6898	0,5598	0,6611	0,6634
1440	0,7986	0,6107	0,6687	0,7091

Tabla 82 - % Fe en muestra inicial de residuo (<0'63 mm)

Co (%)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0004	0,0006	0,0006	0,0007
60	0,0006	0,0009	0,0009	0,0008
90	0,0007	0,0010	0,0011	0,0010
120	0,0008	0,0011	0,0013	0,0011
150	0,0009	0,0011	0,0014	0,0011
180	0,0010	0,0012	0,0015	0,0012
1440	0,0019	0,0023	0,0023	0,0021

Tabla 83 - % Co en muestra inicial de residuo (<0'63 mm)

Ni (%)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0067	-	0,0016	0,0056
60	0,0109	0,0009	0,0028	0,0051
90	0,0132	0,0035	0,0068	0,0107
120	0,0157	0,0046	0,0090	0,0095
150	0,0176	0,0064	0,0105	0,0105
180	0,0208	0,0216	0,0101	0,0116
1440	0,0939	0,0875	0,1409	0,1499

Tabla 84 - % Ni en muestra inicial de residuo (<0'63 mm)

Cu (%)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,1110	0,0000	0,0000	0,0000
60	0,1387	0,0000	0,0000	0,0000
90	0,1422	0,0000	0,0359	0,0000
120	0,1568	0,0000	0,0925	0,0000
150	0,1573	0,0000	0,1360	0,0000
180	0,1948	0,0000	0,1145	0,0000
1440	10,8574	0,0624	5,7774	3,7313

Tabla 85 - % Cu en muestra inicial de residuo (<0'63 mm)

Zn (%)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0475	0,0542	0,0364	0,0513
60	0,0574	0,0659	0,0404	0,0448
90	0,0596	0,0745	0,0467	0,0562
120	0,0600	0,0742	0,0499	0,0555
150	0,0610	0,0712	0,0521	0,0603
180	0,0625	0,0691	0,0474	0,0613
1440	0,1016	0,0823	0,0692	0,0957

Tabla 86 - % Zn en muestra inicial de residuo (<0'63 mm)

Sb (%)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0033	0,0030	0,0045	0,0513
60	0,0039	0,0042	0,0027	0,0448
90	0,0034	0,0048	0,0042	0,0562
120	0,0030	0,0044	0,0046	0,0555
150	0,0024	0,0046	0,0047	0,0603
180	0,0021	0,0039	0,0040	0,0613
1440	0,0063	0,0075	0,0124	0,0957

Tabla 87 - % Sb en muestra inicial de residuo (<0'63 mm)

Pb (%)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0128	0,0034	0,0128	0,0077
60	0,0152	0,0035	0,0047	0,0069

90	0,0147	0,0035	0,0034	0,0087
120	0,0137	0,0030	0,0032	0,0058
150	0,0179	0,0024	0,0030	0,0052
180	0,0143	0,0022	0,0026	0,0049
1440	0,0174	0,0045	0,0047	0,0095

Tabla 88 - % Pb en muestra inicial de residuo (<0'63 mm)

Sn (%)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0192	0,0621	0,0308	0,2266
60	0,0162	0,0629	0,0000	0,2439
90	0,0112	0,0348	0,1317	0,3710
120	0,0110	0,0592	0,0408	0,3011
150	0,0639	-	0,0000	0,3519
180	0,0043	0,0072	0,0000	0,3244
1440	0,0056	-	0,0000	-

Tabla 89 - % Sn en muestra inicial de residuo (<0'63 mm)

5.3.6. *Principales porcentajes metálicos obtenidos en fracción 0'63 – 2 mm respecto a muestra inicial.*

Mg (%)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0439	0,0314	0,0359	0,0378
60	0,0557	0,0432	0,0519	0,0457
90	0,0557	0,0490	0,0566	0,0510
120	0,0622	0,0540	0,0633	0,0590
150	0,0670	0,0539	0,0728	0,0629
180	0,0685	0,0574	0,0673	0,0621
1440	0,1062	0,0731	0,0867	0,0793

Tabla 90 - % Mg en muestra inicial de residuo (0'63 – 2 mm)

Al (%)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,2203	0,3743	0,9116	1,7342
60	0,3349	0,5746	1,3110	2,0832

90	0,4133	0,6533	1,4397	2,1893
120	0,4417	0,7341	1,5858	2,3911
150	0,5167	0,7952	1,7908	2,4655
180	0,5517	0,8852	1,7940	2,6609
1440	1,8231	1,8542	2,1453	4,5791

Tabla 91 - % Al en muestra inicial de residuo (0'63 – 2 mm)

Ti (%)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0014	0,0009	0,0011	0,0015
60	0,0019	0,0016	0,0017	0,0017
90	0,0022	0,0020	0,0018	0,0018
120	0,0022	0,0021	0,0020	0,0021
150	0,0024	0,0024	0,0021	0,0022
180	0,0022	0,0023	0,0021	0,0022
1440	0,0034	0,0032	0,0036	0,0035

Tabla 92 - % Ti en muestra inicial de residuo (0'63 – 2 mm)

V (%)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
60	0,0002	0,0002	0,0002	0,0003
90	0,0002	0,0003	0,0002	0,0003
120	0,0002	0,0003	0,0003	0,0003
150	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003
180	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003
1440	0,0005	0,0004	0,0004	0,0005

Tabla 93 - % V en muestra inicial de residuo (0'63 – 2 mm)

Cr (%)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0005	0,0005	0,0002	0,0003
60	0,0006	0,0007	0,0003	0,0003
90	0,0006	0,0007	0,0003	0,0004
120	0,0006	0,0008	0,0004	0,0004
150	0,0007	0,0008	0,0004	0,0004
180	0,0007	0,0008	0,0004	0,0004
1440	0,0010	0,0015	0,0013	0,0026

Tabla 94 - % Cr en muestra inicial de residuo (0'63 – 2 mm)

Mn (%)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0035	0,0048	0,0070	0,0127
60	0,0049	0,0054	0,0099	0,0142
90	0,0050	0,0058	0,0117	0,0143
120	0,0053	0,0063	0,0137	0,0156
150	0,0061	0,0063	0,0165	0,0156
180	0,0066	0,0066	0,0173	0,0162
1440	0,0159	0,0085	0,0115	0,0181

Tabla 95 - % Mn en muestra inicial de residuo (0'63 – 2 mm)

Fe (%)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0636	0,0479	0,0605	0,0920
60	0,0803	0,0643	0,0793	0,1068
90	0,0816	0,0699	0,0833	0,1105
120	0,0827	0,0747	0,0888	0,1228
150	0,0910	0,0720	0,0940	0,1247
180	0,0899	0,0754	0,0915	0,1271
1440	0,1272	0,0967	0,1122	0,2039

Tabla 96 - % Fe en muestra inicial de residuo (0'63 – 2 mm)

Co (%)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0015	0,0000	0,0005	0,0020
60	0,0017	0,0000	0,0009	0,0024
90	0,0017	0,0000	0,0012	0,0025
120	0,0017	0,0000	0,0015	0,0028
150	0,0018	0,0000	0,0020	0,0029
180	0,0018	0,0000	0,0022	0,0032
1440	0,0031	0,0000	0,0008	0,0032

Tabla 97 - % Co en muestra inicial de residuo (0'63 – 2 mm)

Ni (%)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0019	0,0003	0,0026	0,0066

60	0,0028	0,0001	0,0039	0,0078
90	0,0033	0,0003	0,0048	0,0081
120	0,0034	0,0005	0,0060	0,0091
150	0,0041	0,0007	0,0072	0,0095
180	0,0044	0,0011	0,0078	0,0102
1440	0,0188	0,0059	0,0092	0,0206

Tabla 98 - % Ni en muestra inicial de residuo (0'63 – 2 mm)

Cu (%)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0225	0,0200	0,0214	0,0327
60	0,0245	0,0262	0,0257	0,0314
90	0,0240	0,0281	0,0236	0,0348
120	0,0206	0,0285	0,0269	0,0372
150	0,0195	0,0290	0,0294	0,0409
180	0,0184	0,0276	0,0281	0,0403
1440	0,0193	0,0149	0,0174	0,0172

Tabla 99 - % Cu en muestra inicial de residuo (0'63 – 2 mm)

Zn (%)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,1513	0,0247	0,0020	0,1899
60	0,1666	0,0291	0,0057	0,2455
90	0,1653	0,0288	0,0069	0,2662
120	0,1657	0,0298	0,0104	0,3126
150	0,1730	0,0299	0,0122	0,3360
180	0,1696	0,0311	0,0121	0,3650
1440	0,1890	0,0307	0,0510	0,3576

Tabla 100 - % Zn en muestra inicial de residuo (0'63 – 2 mm)

Sb (%)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0061	0,0048	0,0097	0,0236
60	0,0069	0,0065	0,0109	0,0268
90	0,0065	0,0063	0,0101	0,0266
120	0,0063	0,0057	0,0092	0,0285
150	0,0062	0,0053	0,0080	0,0295
180	0,0055	0,0053	0,0062	0,0295
1440	0,0042	0,0034	0,0038	0,0250

Tabla 101 - % Sb en muestra inicial de residuo (0'63 – 2 mm)

Pb (%)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0104	0,0037	0,0039	0,0052
60	0,0141	0,0049	0,0041	0,0061
90	0,0155	0,0048	0,0044	0,0062
120	0,0159	0,0049	0,0046	0,0062
150	0,0175	0,0049	0,0072	0,0063
180	0,0175	0,0054	0,0049	0,0062
1440	0,0233	0,0048	0,0074	0,0053

Tabla 102 - % Pb en muestra inicial de residuo (0'63 – 2 mm)

Sn (%)				
Tiempo (min)	2M	4M	6M	8M
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,0186	0,0686	0,0317	0,3128
60	0,0102	0,1877	0,0523	0,3881
90	0,0074	0,1580	0,1263	0,4331
120	0,0061	0,1267	0,1731	0,4581
150	0,0058	0,0652	0,1965	0,5652
180	0,0048	0,0501	0,1658	0,5968
1440	2,0868	0,0034	0,2189	0,2504

Tabla 103 - % Sn en muestra inicial de residuo (0'63 – 2 mm)

6. CONCLUSIONES

- El procedimiento experimental desarrollado nos permite estimar los elementos presentes en la estructura interna de los residuos electrónicos, logrando identificar un total de 34 metales diferentes.
- El cobre, hierro y aluminio son los principales metales encontrados en el residuo estudiado. Además, la mayoría de los materiales identificados suponen un altísimo riesgo ambiental si no son tratados correctamente (presencia de U, Pb, Cu y otros).
- La valorización de los residuos electrónicos supone una alternativa a la minería tradicional, teniendo a nuestra disposición una fuente de materia prima adicional de elementos muy valiosos tanto económica como estratégicamente.
- A pesar de encontrarse en muy bajas concentraciones, se identifican trazas de los elementos del grupo de los lantánidos (tierras raras). Elementos muy escasos en la corteza terrestre y que supondrían un punto clave en el desarrollo de la economía de nuestro país.

7. TRABAJOS Y LINEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

Respecto a trabajos y líneas de investigación futuras, se marca como principal propuesta el desarrollo de una etapa de electrolisis, de manera posterior a la última fase desarrollada en el presente proyecto, con el fin de lograr la separación y recuperación final de todos los elementos lixiviados e identificados en las muestras extraídas.

1) **Electrolisis:**

Proceso en el que el paso de la corriente eléctrica a través de una disolución, da como resultado una reacción de oxidación – reducción (redox), no espontánea, [43].

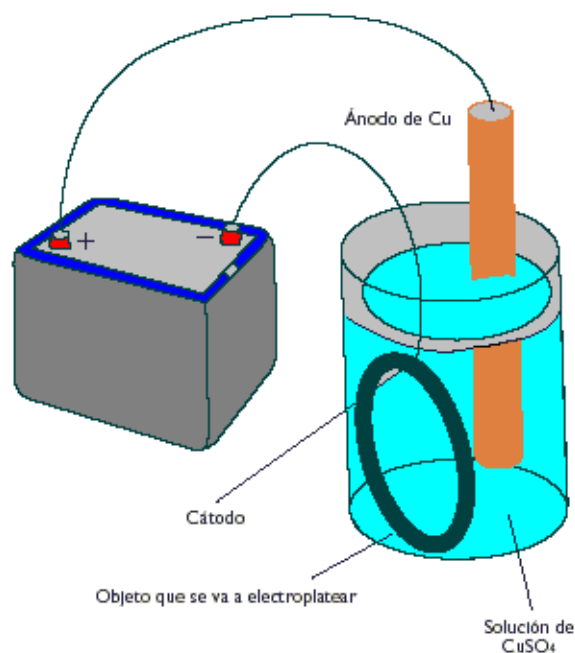


Figura 20 – Ejemplo electrolisis, [42].

De esta manera conseguiríamos a través de la inducción de distintas corrientes eléctricas, la separación y obtención de cada uno de los elementos identificados. Queda como propuesta para su desarrollo en futuros proyectos de investigación.

2) **Revalorización de polímeros residuales obtenidos.**

Otra alternativa planteada para estudios futuros consiste en la revalorización del residuo sólido (en su mayoría polímeros) obtenido tras la decantación y filtración de las disoluciones tras las 24 horas de ensayo. Este residuo obtenido, es llevado a estufa y guardado quedando como propuesta, su revalorización en adición a materiales cerámicos para conseguir aumentar su aislamiento, disminuyendo a la misma vez, su densidad.

Por otro lado, los polímeros residuales obtenidos son de muy buena calidad, por lo que también se deja como propuesta futura, su empleo como materia prima en la fabricación aditiva.

8. ANEXOS

8.1. ANEXO I.

Tabla de Contenido:

- Análisis Semicuantitativo. Técnica FRX en Fracción I: $< 0'63$ mm
- Análisis Semicuantitativo. Técnica FRX en Fracción II: $0'63$ mm – 2 mm

- FRX FRACCIÓN I: < 0'63 mm

UNIVERSIDAD DE MALAGA - ES

23/05/2019 9:59:58

2019_00313 - Residuo Electrónico +0,63 mm - NJOB.101

Calculated by UniQuant

Análisis Semicuantitativo. Elementos trazas presentan altos valores de Est. Error.

Thermo Fisher Scientific

ADXP Rh 60kV LiF200 PET AX03 LiF220

Measured on : 23/05/2019 9:25:26

Method : X_UQ-He

X-ray Path: : Helium

Kappa List : AnySample

Film Type : PP 4mu

Shapes & ImpFc : Teflon

Collimator Mask : 29 mm

Calculated as : Oxides

Viewed Diameter = 29,00 mm

Case Number : 0 = All known

Viewed Area = 660,52 mm²

Viewed Mass = 1820.99 mg

Reporting Level > 10 ppm and wt% > 2 Est.Err.

Sample Height = 3,00 mm

Compound	Wt%	Est.Error	Element	Wt%	Est.Error
SiO ₂	26,73	0,22	Si	12,49	0,10
CaO	11,44	0,16	Ca	8,18	0,11
Br	8,64	0,14	Br	8,64	0,14
CuO	8,44	0,14	Cu	6,74	0,11
Al ₂ O ₃	8,08	0,14	Al	4,28	0,07
SnO ₂	2,48	0,08	Sn	1,95	0,06
Fe ₂ O ₃	1,92	0,07	Fe	1,34	0,05
BaO	0,822	0,041	Ba	0,736	0,037
MgO	0,720	0,036	Mg	0,434	0,022
TiO ₂	0,501	0,025	Ti	0,300	0,015
PbO	0,430	0,021	Pb	0,399	0,020
K ₂ O	0,364	0,018	K	0,302	0,015
NiO	0,193	0,0096	Ni	0,151	0,0075
S	0,154	0,0077	S	0,154	0,0077
Cl	0,136	0,0068	Cl	0,136	0,0068
SrO	0,119	0,0059	Sr	0,100	0,0050
ZnO	0,117	0,0058	Zn	0,0942	0,0047
Sb ₂ O ₃	0,0785	0,0039	Sb	0,0656	0,0033
MnO	0,0763	0,0038	Mn	0,0591	0,0029
P	0,0747	0,0037	P	0,0747	0,0037
As ₂ O ₃	0,0739	0,0067	As	0,0560	0,0051
Ag ₂ O	0,0706	0,0035	Ag	0,0657	0,0033
ZrO ₂	0,0364	0,0018	Zr	0,0270	0,0013
Cr ₂ O ₃	0,0158	0,0012	Cr	0,0108	0,0008
Nd ₂ O ₃	0,0128	0,0025	Nd	0,0110	0,0021
Au	0,0079	0,0010	Au	0,0079	0,0010
V ₂ O ₅	0,0062	0,0013	V	0,0035	0,0007
Bi ₂ O ₃	0,0061	0,0012	Bi	0,0055	0,0010
Y ₂ O ₃	0,0027	0,0006	Y	0,0022	0,0004
Co ₃ O ₄	0,0023	0,0008	Co	0,0017	0,0006
Ga ₂ O ₃	0,0014	0,0006	Ga	0,0011	0,0005

Known Concentration = 28,26 LOI

Sum Weight% before normalization to 100% = 88,3 %

Total Weight% Oxygen = 24.92

- FRX FRACCIÓN II: 0'63 - 2 mm

UNIVERSIDAD DE MALAGA – ES

23/05/2019 9:57:11

2019_00313 - Residuo Electrónico 0,63-2 mm - NJOB.100

Calculated by UniQuant

Análisis Semicuantitativo. Elementos trazas presentan altos valores de Est. Error.

Thermo Fisher Scientific

ADXP Rh 60kV LiF200 PET AX03 LiF220

Measured on : 23/05/2019 9:11:07

Method : X_UQ-He

X-ray Path: : Helium

Kappa List : AnySample

Film Type : PP 4mu

Shapes & ImpFc : Teflon

Collimator Mask : 29 mm

Calculated as : Oxides

Viewed Diameter = 29,00 mm

Case Number : 0 = All known

Viewed Area = 660,52 mm2

Viewed Mass = 2138.03 mg

Reporting Level > 10 ppm and wt% > 2 Est.Err.

Sample Height = 3,00 mm

Compound	Wt%	Est.Error	Element	Wt%	Est.Error
SiO2	24,11	0,21	Si	11,27	0,10
Al2O3	21,57	0,21	Al	11,41	0,11
CuO	11,12	0,16	Cu	8,88	0,13
CaO	4,96	0,11	Ca	3,54	0,08
SnO2	3,94	0,10	Sn	3,10	0,08
Br	3,69	0,09	Br	3,69	0,09
Fe2O3	1,24	0,06	Fe	0,870	0,04
TiO2	1,14	0,05	Ti	0,682	0,03
MgO	1,10	0,05	Mg	0,666	0,03
PbO	0,995	0,049	Pb	0,924	0,046
BaO	0,730	0,036	Ba	0,654	0,033
K2O	0,585	0,029	K	0,486	0,024
Cl	0,373	0,019	Cl	0,373	0,019
ZnO	0,260	0,013	Zn	0,209	0,010
P	0,227	0,011	P	0,227	0,011
S	0,209	0,010	S	0,209	0,010
NiO	0,170	0,0085	Ni	0,133	0,0067
Sb2O3	0,161	0,0081	Sb	0,135	0,0067
Ag2O	0,106	0,0053	Ag	0,0987	0,0049
ZrO2	0,0777	0,0039	Zr	0,0575	0,0029
Cr2O3	0,0668	0,0033	Cr	0,0457	0,0023
SrO	0,0574	0,0029	Sr	0,0486	0,0024
MnO	0,0391	0,0020	Mn	0,0303	0,0015
As2O3	0,0339	0,0042	As	0,0257	0,0032
Au	0,0228	0,0012	Au	0,0228	0,0012
Nd2O3	0,0213	0,0024	Nd	0,0182	0,0021
Bi2O3	0,0146	0,0011	Bi	0,0131	0,0010
V2O5	0,0062	0,0012	V	0,0035	0,0007
Y2O3	0,0051	0,0005	Y	0,0040	0,0004
Co3O4	0,0030	0,0007	Co	0,0022	0,0005
MoO3	0,0025	0,0010	Mo	0,0017	0,0007

Known Concentration = 22,97 LOI

Sum Weight% before normalization to 100% = 90,4 %

Total Weight% Oxygen = 29.19

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] I. Puig-ventosa, “MINERÍA URBANA :,” no. March, 2016.
- [2] M. D. E. Agricultura, “Boletín oficial del estado,” 2015.
- [3] E. L. P. Europeo, E. L. Consejo, and D. E. L. A. Uni, “L 197/38,” pp. 38–71, 2012.
- [4] [www.miteco.gob.es](https://www.miteco.gob.es/en/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/aparatos-electr/electricos-y-electronicos-que-categorias-aee-existen.aspx), “Electrical and electronic equipment.” [Online]. Available: <https://www.miteco.gob.es/en/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/aparatos-electr/electricos-y-electronicos-que-categorias-aee-existen.aspx>.
- [5] S. Ojeda-benitez, “La industria y los residuos electrónicos,” no. July, 2014.
- [6] M. Plata, “ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS,” 2017.
- [7] P.Moraga/V.Duran, “de los residuos electrónicos,” 2010.
- [8] O. P. Martínez, “Situación e Impacto de los residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) Caso de Estudio : los Ordenadores,” 2013.
- [9] E. Ambiental, “Recuperación de materias primas secundarias procedentes de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEES).”
- [10] E. L. P. Europeo, E. L. Consejo, and D. E. L. A. Uni, “DIRECTIVA 2002/96/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 27 de enero de 2003 sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE),” vol. 5, pp. 24–39, 2003.
- [11] E. L. P. Europeo, E. L. Consejo, D. E. L. A. Uni, D. O. Do, and D. O. Do, “L 174/88,” pp. 88–110, 2011.
- [12] J. C. R, “los fines de este real decreto. En el mismo plazo deberán elaborar los correspondientes planes de emergencia. Disposición adicional sexta.,” pp. 7112–7121, 2005.
- [13] P. Baldé, C. P., Forti, V., Gray, V., Kuehr, R., Stegmann, *The Global E-waste Monitor 2017*. 2017.
- [14] D. A. P. OSORIO, “MODELO PARA LA GESTIÓN DE RECICLAJE DE RESIDUOS ELECTRÓNICOS,” 2012.
- [15] [www.rezagos.com](http://www.rezagos.com/pages/raee), “RAEE,” 2019. [Online]. Available: <http://www.rezagos.com/pages/raee>.
- [16] <https://elpais.com/>, “Trump blindo las telecomunicaciones de EE UU contra Huawei, en una nueva ofensiva contra China,” 2019. [Online]. Available: https://elpais.com/internacional/2019/05/15/estados_unidos/1557957202_172429.html.

- [17] ABC Ciencia, “¿Qué son las tierras raras y por qué son claves en la guerra de China y EE.UU.?,” 2019. [Online]. Available: https://www.abc.es/ciencia/abci-huawei-tierras-raras-y-claves-guerra-china-y-eeuu-201905250123_noticia.html.
- [18] ABC Economía, “China planea cortar sus exportaciones de tierras raras a EE.UU.” [Online]. Available: https://www.abc.es/economia/abci-china-planea-cortar-exportaciones-tierras-raras-eeuu-201905210129_noticia.html.
- [19] H. Kang and J. M. Schoenung, “Electronic waste recycling : A review of U . S . infrastructure and technology options,” vol. 45, pp. 368–400, 2005.
- [20] V. Muñoz, “Recuperación de cobre a partir de los residuos de tarjetas de circuitos integrados de aparatos eléctricos y electrónicos,” pp. 1–98, 2017.
- [21] I. N. G. Pedro and O. Villavicencio, “T e s i n a,” 2015.
- [22] J. Namias, “THE FUTURE OF ELECTRONIC WASTE RECYCLING IN THE UNITED STATES : Obstacles and Domestic Solutions,” no. July, 2013.
- [23] M. J. Muñoz Portero, “Extracción de metales por hidrometalurgia : Procesamiento de cobre y cinc.”
- [24] A. Khaliq, M. A. Rhamdhani, G. Brooks, and S. Masood, “Metal Extraction Processes for Electronic Waste and Existing Industrial Routes: A Review and Australian Perspective,” no. February, 2014.
- [25] J. J. G. Rojas, “Conference Paper · August 2012,” no. August 2012, 2015.
- [26] R. Cayumil *et al.*, “High temperature investigations on optimising the recovery of copper from waste printed circuit boards,” *Waste Manag.*, vol. 73, pp. 556–565, 2018.
- [27] A. Behnamfard, M. Mehdi, and F. Veglio, “Process development for recovery of copper and precious metals from waste printed circuit boards with emphasize on palladium and gold leaching and precipitation,” *Waste Manag.*, vol. 33, no. 11, pp. 2354–2363, 2013.
- [28] Y. J. Park and D. J. Fray, “Recovery of high purity precious metals from printed circuit boards,” vol. 164, pp. 1152–1158, 2009.
- [29] H. Marcelo, J. Zoppas, J. Alberto, and S. Ten, “Recovery of copper from printed circuit boards scraps by mechanical processing and electrometallurgy,” vol. 137, pp. 1704–1709, 2006.
- [30] V. Kogan, “Process for the Recovery of Precious Metals from Electronic Scrap by Hydrometallurgical Technique.” 2006.
- [31] H. O. GÓMEZ, “METODOLOGÍA PARA RECUPERAR METALES PRECIOSOS: ORO, PLATA Y GRUPO DEL PLATINO, PRESENTES EN DESECHOS

- ELECTRÓNICOS,” *Univ. Nac. Colomb.*, 2011.
- [32] <https://www.retsch.es/>, “Molino mezclador MM 200.” [Online]. Available: <https://www.retsch.es/es/productos/molienda/molinos-de-bolas/molinos-mezclador-mm-200/funcionamiento-caracteristicas/>.
- [33] Salvador Azpeleta Izquierdo, “Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X.” [Online]. Available: <http://laboratoriotecnicasinstrumentales.es/analisis-quimicos/espectrometra-de-fluorescencia-de-rayos-x>.
- [34] V. Gutiérrez-Ginés, M.a J. y Ranz, “UTILIZACIÓN DE UN EQUIPO PORTÁTIL DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X PARA EL ESTUDIO DE METALES PESADOS EN SUELOS: PUESTA A PUNTO Y APLICACIÓN A VERTEDEROS,” no. figura 1.
- [35] http://www.uned.es/cristamine/mineral/minbas_mrc.htm, “ESPECTROMETRÍA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X.” [Online]. Available: http://www.usc.es/export9/sites/webinstitucional/gl/investigacion/riaidt/raiosx/descargas/UNED_Curso_Fluorescencia.pdf.
- [36] U. D’ALACANT, “Servicios Técnicos de Investigación. MICRO-FLUORESCENCIA DE RAYOS X.” [Online]. Available: <https://ssti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-rayos-x/micro-fluorescencia-de-rayos-x.html>.
- [37] L. de T. Instrumentales, “Espectroscopía de Plasma ICP-MS.” [Online]. Available: <http://laboratoriotecnicasinstrumentales.es/analisis-quimicos/espectroscopa-de-plasma-icp-ms>.
- [38] <http://www.incar.csic.es/icp-masas>, “ICP-Masas.” [Online]. Available: <http://www.incar.csic.es/icp-masas>.
- [39] Universidad de Burgos, “Fundamento Espectrometría de Masas de Plasma (ICP-MS).” .
- [40] Estacion Experimental de Zaidin, “<https://www2.eez.csic.es/?q=es/node/1187>.” .
- [41] A. Sanz-medel, “El plasma ICP para la ionización elemental en Espectrometría de Masas : su aplicación en Proteómica Cuantitativa ”,” pp. 47–51, 2008.
- [42] D. R. F. Ruiz, “LA TÉCNICAS DE PLASMA-MASAS (ICP-MS).” .
- [43] EcuRed, “Electrólisis @ www.ecured.cu.” [Online]. Available: <https://www.ecured.cu/Electrólisis>.