

PROJECTE DE RECUPERACIÓ DE LES TERRES RARES **D'UN MÒBIL**

Aquest treball ha estat realitzat pels alumnes del segon curs del Cicle Formatiu de Grau Mitjà d'Operacions de Laboratori de l'Institut Miquel Biada (Mataró): Lucia Aguilar, Abril Amador, Jordi Cortez, Aitor Hernández, Adrián Montilla i Maria Roig. La supervisió s'ha dut a terme pel Departament de Química de l'Institut Miquel Biada de Mataró. Curs 2024-2025

Abstract

The global demand for rare earth elements (REEs), has risen significantly, largely driven by the high demand of mobile phones. Therefore developing effective methods for recovery of REEs from discarded devices is highly valuable. The most common method used to achieve this is leaching with aqua regia, an effective yet highly aggressive and hazardous method. In this study, a more sustainable, hazard-free and environmentally friendly method, -chlorinating roasting- is compared to conventional leaching. Additionally an extra step is introduced in the chlorinating roasting method by incorporating cationic ion Exchange resins to enhance REE recovery. Mechanical disassembly and chemical treatments were conducted under lab conditions. Aqua regia yielded the highest REE concentrations but produced hazardous waste, while ion exchange showed the most sustainable profile. Overall, ion exchange emerges as a promising method for environmentally friendly REE recovery. It is concluded that, although aqua regia is highly efficient, the most sustainable and industrially applicable method is cationic resin with sodium chloride, as it reduces environmental impact and paves the way for a more cost-effective and eco-friendly recovery of rare earth elements.

1.-Introducció

En l'era digital actual, l'ús del telèfon mòbil s'ha estès de manera gairebé universal, convertint-se en una eina imprescindible en la vida quotidiana de la major part de la població. Malgrat aquesta omnipresència, es coneix poc sobre la composició dels dispositius mòbils i el destí dels seus components un cop deixen de funcionar. Aquests aparells estan constituïts per una gran varietat de materials, entre els quals destaquen les terres rares, un conjunt d'elements químics que, pel seu comportament singular i propietats fisicoquímiques excepcionals, resulten essencials per al desenvolupament de tecnologies avançades.

Els telèfons mòbils contenen diversos elements de les terres rares amb aplicacions específiques i crítiques. Per exemple, el neodimi (Nd) s'utilitza en la fabricació d'imants potents presents en altaveus i sistemes de vibració; el lantani (La) forma part de les bateries recarregables; i el disprosi (Dy) contribueix a millorar l'eficiència tèrmica i la potència dels imants. A més, elements com l'itri (Y) i el terbi (Tb) es fan servir en pantalles LED per obtenir una qualitat d'imatge superior i colors més vius, mentre que el ceri (Ce) es fa servir com a compost polidor en la fabricació de pantalles, i l'europi (Eu) és fonamental per generar emissions de color vermell en pantalles fluorescents i dispositius LED.

La disponibilitat d'aquestes terres rares és limitada, ja que es troben en concentracions molt baixes a l'escorça terrestre i el seu procés d'extracció i refinament és complex, costós i sovint altament contaminant. A més, la major part de les reserves i la producció mundial es

concentren a la Xina, fet que incrementa la dependència geopolítica d'aquest país. Aquest fet planteja reptes ambientals, econòmics i geopolítics significatius, i reforça la necessitat d'analitzar-ne la presència, l'ús i la gestió en dispositius tecnològics d'ús massiu com els telèfons mòbils i en general els dispositius electrònics com ordinadors, tauletes i d'altres.

2.-Objectiu General

Cal un planteig sobre el reciclatge d'aquests materials i els procediments químics per tal de fer-ho possible. Aquest treball presenta una via alternativa al tractament tradicional per lixiviar aquests components de forma agressiva basat en la propietat d'utilitzar un eutèctic salí a una temperatura en la qual l'energia lliure de Gibbs permet la formació espontània de determinats clorurs de terres rares i aquests es puguin extreure per simple dissolució. A partir d'aquí, i de la quantitat d'elements tractats es podrà tenir una dissolució concentrada en terres rares susceptible de ser tractada econòmicament, per extreure de forma selectiva la terra rara d'interès.

3.Context i justificació del projecte

La dependència creixent de dispositius electrònics, com ara els telèfons intel·ligents, ha accentuat la demanda de terres rares a escala global. Aquest conjunt de disset elements químics, que inclouen els lantànids juntament amb l'escandi (Sc) i l'itri (Y), és crític per a la fabricació de components tecnològics per les seves propietats magnètiques, òptiques i catalítiques. Tot i que són anomenades "rares", aquestes substàncies no són escasses en termes absoluts, però rarament es troben en forma concentrada, cosa que dificulta la seva explotació econòmica i sostenible.

La seva extracció comporta un elevat impacte ambiental: l'ús intensiu d'àcids forts, l'emissió de gasos tòxics i la generació de residus perillosos són pràctiques habituals en els processos convencionals de separació i purificació. A això cal afegir-hi el component geopolític: més del 90% de la producció mundial de terres rares està controlada per un nombre reduït de països, especialment la Xina, fet que genera una elevada vulnerabilitat en la cadena de subministrament global.

En aquest context, l'aprofitament dels residus electrònics —i en particular dels telèfons mòbils en desús— emergeix com una alternativa viable per recuperar terres rares i altres metalls valuosos. Aquest enfocament no només contribueix a minimitzar l'extracció primària, sinó que també permet reduir l'impacte ambiental associat a la mineria i al tractament convencional de minerals. Així mateix, el desenvolupament de metodologies més sostenibles i eficients per a la recuperació d'aquests elements, adaptades a l'àmbit de laboratori i amb possibilitats d'escalabilitat industrial, representa una línia de recerca d'elevada rellevància científica i tecnològica.

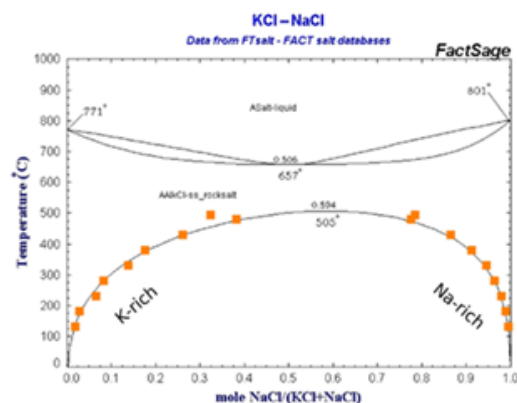
4. Objectius Didàctics

Aquest projecte té com a finalitat principal la recuperació de terres rares contingudes en telèfons mòbils mitjançant diversos tractaments químics, avaluant-ne l'eficiència, la selectivitat i la sostenibilitat de cadascun. Els objectius específics són els següents:

- Establir una relació directa entre els continguts curriculars de química i les problemàtiques ambientals derivades de la gestió inadequada dels residus electrònics.
- Motivar els alumnes del cicle mig de química amb projectes que tinguin relació amb problemes ambientals i de reciclatge. Afavorir contactes amb empreses del sector. Utilitzar els telèfons mòbils com a material potencial per analitzar els metalls pesants, treballar amb els alumnes diferents tècniques analítiques (reïnes, absorció atòmica, Espectrofotometria; UV-Visible).
- Analitzar la viabilitat de processos alternatius als procediments de lixiviació tradicionals com el tractament amb aigua règia, utilització d'àcids forts, generació de gasos (NO_2 , SO_2 ...).
Aquesta via alternativa proposa un tractament tèrmic amb mescla eutèctica de clorurs i la posterior utilització de reïnes catòniques.
- Determinar qualitativament i quantitativament la presència de terres rares i altres metalls mitjançant tècniques analítiques apropiades. Introduir a l'alumnat amb el coneixement de tècniques específiques com la fluorescència de RX. Preparació de les mostres. Interpretació dels resultats.
- Comparar el rendiment dels diferents processos en termes d'eficiència extractiva i impacte ambiental.
- Contribuir, a través d'aquest treball, a la divulgació i la conscienciació sobre la necessitat d'una gestió més racional i circular dels materials tecnològics.

5.-Desenvolupament teòric

Les terres rares estan presents en els nostres mòbils bàsicament com a òxids i en alguns casos com a metalls. A banda de les terres rares no hem d'oblidar elements com el coure i el titani d'alt valor comercial. Tenint en compte les dades termodinàmiques present en l'article que porta per nom "**Linear correlations of Gibbs free energy for rare earth element oxide,hydroxide, chloride, fluoride, carbonate, and ferrite minerals and crystalline solids. Autors;** Ruiguang Pana,, Chen Zhua (Department of Earth and Atmospheric Sciences, Indiana University Bloomington, IN 47405, USA), es possible calcular el valors d'energia lliure de Gibbs pel conjunt de les terres rares i s'observa els valors espontanis per a temperatures properes a 657°C. Per quin motiu es important aquesta temperatura?. En aquesta temperatura es forma l'eutèctic entre en KCl i el NaCl.



La hipòtesi bàsica d'aquest treball és que si es combina el circuit electrònic d'un mòbil, convenientment triturat, amb aquesta composició eutèctica a 657°C, un temps determinat, es formaran els clorurs corresponents a les terres rares. La justificació d'aquesta formació la proporciona el càlcul de l'energia de Gibbs i la confirmació dels seus valors negatius, que corresponen per tant a un procediment espontani. Aquesta taula i aquests valors s'extreuen de l'article abans mencionat.

	Crystal Structure	ΔG°_f kJ mol ⁻¹	ΔH°_f kJ mol ⁻¹	S° J K ⁻¹ mol ⁻¹	V° cm ³ mol ⁻¹	$C_p = a + bT + c/T^2 + d/T^{0.5}$				Temperature range K
						a	$b \cdot 100$	c	d	
LaCl ₃	UCl ₃	-995.89	-1071.52	137.57	63.90	74.9288	5.1654	684520	-	1133
CeCl ₃	UCl ₃	-983.61	-1059.02	151.42	62.52	90.9772	3.5812	-271530	-	1090
PrCl ₃	UCl ₃	-982.72	-1058.77	153.30	61.40	85.6511	3.9524	134650	-	1060
NdCl ₃	UCl ₃	-965.56	-1041.18	153.43	60.47	87.2834	3.8586	40210	-	1032
PmCl ₃	UCl ₃	-955.47	-	-	-	-	-	-	-	-
SmCl ₃	UCl ₃	-949.55	-1025.32	150.12	59.12	95.3748	3.3444	-516135	-	950
EuCl ₃	UCl ₃	-855.39	-935.41	144.06	58.50	100.9736	3.0092	-263620	-	894
GdCl ₃	UCl ₃	-943.28	-1018.20	151.42	58.03	88.7959	3.1444	-34750	-	875
TbCl ₃	PuBr ₃	-1010.60	-1085.74	154.85	-	86.292	3.8598	-	-	783
DyCl ₃	AlCl ₃	-923.34	-994.02	175.40	74.38	-34.7111	8.714	-1978460	2265.502	924
HoCl ₃	AlCl ₃	-928.29	-997.68	177.10	74.80	100.382	0.5091	-	-	993
ErCl ₃	AlCl ₃	-925.02	-994.81	175.10	75.21	-28.255	8.272	-2055060	2177.088	1049
TmCl ₃	AlCl ₃	-926.20	-996.09	173.50	75.59	-38.3601	8.67	-2308450	2382.415	1095
YbCl ₃	AlCl ₃	-892.36	-959.51	169.30	76.04	-55.7145	9.322	-2731060	2752.211	1138
LuCl ₃	AlCl ₃	-917.76	-987.12	153.00	76.31	-74.5384	10.439	-3070270	3000.228	1198

A partir del valor de la funció de C_p , dels coeficients corresponents a,b,c i de la temperatura de l'eutèctic, podem calcular els valors de la funció de Gibbs per la formació sòlida dels clorurs de terres rares corresponents. Es constata fent aquest càlcul que la funció de Gibbs adopta valors negatius per la formació del clorur sòlid corresponent a la temperatura de 657°C. Per fer aquest càlcul utilitzarem les funcions termodinàmiques de la entalpia i l'entropia així com la seva variació respecte la temperatura a pressió constant. S'expressa en la següent taula;

$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ En condicions de pressió i temperatura constant	
$\Delta S = \int_{T_1}^{T_f} \frac{C_{p,s,mol}}{T} dT + \frac{\Delta H_f}{T_f} + \int_{T_f}^{T_v} \frac{C_{p,l,mol}}{T} dT + \frac{\Delta H_v}{T_v} + \int_{T_v}^{T_2} \frac{C_{p,v,mol}}{T} dT$	$\Delta H = \int_{T_1}^{T_2} \left(a + bT + \frac{c}{T^2} \right) dT$ $\Delta H = \left[aT + \frac{b}{2}T^2 - \frac{c}{T} \right]_{T_1}^{T_2} = a(T_2 - T_1) + \frac{b}{2}(T_2^2 - T_1^2) - c \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$

El procediment experimental utilitzarà dues vies de tractament. Dos mòbils de la mateixa marca. En el primer, després d'extreure la pantalla, la carcassa i la bateria del mòbil es procedirà a triturar el circuit electrònic. El material convenientment triturat es mesclarà amb una mescla sòlida de KCl+NaCl. Tot això en un cresol de porcellana. La mescla es portarà 8 hores a una temperatura de 657 °C. La composició eutèctica correspon a una fracció molar de la mescla KCl+NaCl de 0,506. Del material extret de la mufla i que s'ha sotmès a 657°C, es tamisa de manera que es separa la sal sòlida d'altres elements estructurals del circuit electrònic com l'acer, els transistors de silici i de material que no ha reaccionat. El producte de la tamisació es separa en dues parts. Una s'analitza per fluorescència de RX i l'altre es tracta amb una dissolució de HCl 0,1M, de manera que procedim a dissoldre la majoria de clorurs i d'altres òxid metàl·lics. D'aquesta manera es podrà avaluar si la mescla salina pot extreure les terres rares en forma de clorurs i per altra banda es prossegueix amb el tractament de la mostra salina. Posteriorment aquesta dissolució es fa passar per una columna de reïnes catióniques. L'objectiu és que la majoria de cations amb elevat estat d'oxidació, siguin retinguts en primera opció per la reïna, i les terres rares participen majoritàriament de l'estat (+3), en comparació a coure i níquel que participen amb estats (+2). S'elueix la columna amb HCl 2M i posteriorment la dissolució obtinguda, es precipitada amb NaOH fins a pH de 12 i posteriorment s'asseca i es calcina per tal de determinar, en forma d'òxid, per fluorescència RX, el contingut de terres rares. Per tal d'establir una comparativa amb el procediment clàssic, s'ha tractat un segon mòbil separant la carcassa de polímer de la pantalla i extraient el circuit electrònic. Aquest circuit, s'ha trossejat i s'ha tractat amb aigua règia, a 60°C, durant 24 hores. Posteriorment, s'ha filtrat i precipitat el contingut amb NaOH fins a pH 12. El material precipitat, s'ha assecat i calcinat a la mufla per tal de determinar per fluorescència de RX els contingut de Terres Rares.

6. Metodologia experimental

En el projecte varen participar dos grups d'alumnes. Tots dos varen seguir la mateixa línia de treball;

1.-Dissoldre el circuit electrònic d'un mòbil de referència en aigua règia (3HCl:1HNO₃), a 60°C durant 24 hores. Filtrar el contingut i precipitar amb NaOH. Finalment assecat el precipitat i calcinar per obtenir els òxids corresponents. D'aquesta manera facilitem la determinació per fluorescència de RX.

2.- Extreure el circuit electrònic del mòbil (mateix tipus i marca que el del punt 1), trossejar físicament el circuit i mesclar-ho amb la mescla eutèctica de sal (KCl i NaCl), en un gresol. Es

deposita el gresol a la mufla a 657°C durant 8h. Posteriorment es tamisa el contingut, i es separa la sal per tal d'analitzar el contingut amb fluorescència de RX. Voldríem observar si havia evidència de la possible formació dels clorurs de terres rares.

En la segona fase, es tracta íntegrament un mòbil mitjançant la tractament tèrmic amb mescla eutèctica de clorurs, però un del grups solubilitza amb HCl 0,1 M la sal i ho precipita amb NaOH, per obtenir els òxids. L'altre grup, solubilitza la mescla salina sortida de la mufla i la passa per una columna de reïnes catióniques. Posteriorment elueix amb HCl 2M i precipita en forma d'òxids,

3.- Tractar el circuit electrònic d'un mòbil mitjançant un tractament tèrmic amb mescla eutèctica de clorurs. Es tamisa la sal i es guarda una mostra de control, per observar si es retenen les terres rares.

4.- Hi ha dues opcions;

4.a El primer grup solubilitza els clorurs amb una dissolució d'HCl 0,1M i posteriorment precipita els hidròxids amb NaOH .Posteriorment s'asseca el precipitat i es calcina per determinació mitjançant fluorescència de RX de les terres rares.

4.b El segon grup solubilitza la mescla salina i la tracta per una columna de reïnes catióniques. Posteriorment , al passar una concentració d'HCl 2M, es recupera l'eluent i es precipiten els metalls en forma de hidròxid. S'asseca els precipitat i es calcina, per determinar mitjançant la fluorescència de RX les terres rares.

Les analítiques s'han realitzat per fluorescència de RX en la UPC de Manresa, sota la direcció tècnica del Dr. Arnau Martínez Alcalà i la Dra. Maria Pura Alfonso. Les mostres han estat facilitades en estat sòlid i tamisades.



7.-Resultats

Les terres rares detectades són el Praseodimi, Neodimi, Europi ,Terbi, Erbi, Yterbi i Luteci. A banda d'aquest metalls, el procediment analític també va detectar Titani, Crom, Níquel, Coure, Zinc, Rubidi, Estronci, Zircon i Estany, tant en el grup A com el grup B.

En el grup A s'extreuen terres rares a partir d'un tractament tèrmic amb mescla eutèctica de clorurs en tots els casos excepte en el Terbi. El percentatge és més eficaç en el cas que l'òxid de les terres rares s'obtingui a partir de la dissolució dels clorurs i que no passa per les reïnes. En el grup B, els clorurs procedents del tractament tèrmic amb mescla eutèctica de clorurs es

passen per reïnes per intentar seleccionar específicament les terres rares, i posteriorment eluir-les amb HCl 2M. Aquesta dissolució es tracta amb NaOH per tal de precipitar els hidròxids de les terres rares i procedir a la seva oxidació.

En tots el casos hi ha extracció de terres rares. En tots els casos, posteriorment al tractament de la mufla, s'ha fet un tamisat. Això vol dir, que s'ha seleccionat una mida determinada de partícula i s'ha exclòs una part de les sals.

GRUP A			
1	Tractament aigua règia circuit electrònic	Mòbil A	Confirmació d'extracció terres rares
2	Tractament Tèrmic amb mescla eutèctica de clorurs(3 h.)		
3	Tractament Tèrmic amb mescla eutèctica de clorurs(8h.)	Mòbil B	Optimització procés a 8 hores.
4	Obtenció d'òxids a partir de la dissolució clorurs precipitada amb NaOH		

TERRES RARES							
	Pr	Nd	Eu	Tb	Er	Yb	Lu
1	1700	9400	1030	757,7	3180	1030	105,8
2	264,8	1190	134,6		52,3	125,5	48,1
3	4410	15610	1170		458,2	1120	197,6
4	610	3180	1030				

(valors expressats en ppm)

METALLS TRANSICIÓ I D'ALTRES									
	Ti	Cr	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Zr	Sn
1	1609	12880	29230	235910	27820	7,4	37	92,1	16220
2	169,6	766,8	517,5	14730	989,9		66,4	42,6	1470
3	7460	8660	6310	144490	11640	19,2	263,1	678,1	17800
4		3190	4390	3380	5180	10	200	30	3520

(valors expressats en ppm)

7.1 Anàlisi

Grup A

1.- El tractament tèrmic amb mescla eutèctica de clorurs extreu les terres rares i determinats metalls de transició, en tots els casos. La proporció de metall extret augmenta amb el temps que el circuit electrònic i la mescla salina estan en contacte.

2.- Les mesures per fluorescència de RX precisen que la mostra estigui en pols i compacte. En el cas de l'òxid és més senzill fer-ho. En el cas de la mescla salina es fa difícil que entre cristalls de la mostra hi quedin espais buits que redueixin el valor del resultat. De totes maneres, en tots els casos excepte el Terbi s'observa extracció de terres rares.

3.- En el cas del segon mòbil, obtenim valors d'extracció per terres rares i metalls de transició amb el tractament tèrmic amb mescla eutèctica de clorurs però l'Er, Yb i Lu en la determinació

d'òxids no dona senyal. Es possible que la precipitació i filtració de l'hidròxid no hagi estat efectiva.

4.- Pensem que es important l'extracció d'altres metalls valuosos com el Ti, el Ni i el Zr.

5.- S'obté un concentrat de metalls valuosos que posteriorment al tractament de més mòbils, permet tenir un material a partir del qual s'extreu de forma específica determinats metalls.

6.-Un cas especial és el coure metàl·lic. En acabar el procés del tractament tèrmic amb mescla eutèctica de clorurs, s'observa una massa salina, restes del circuit electrònic i restes de coure metàl·lic. En aquest sentit, pensem que a la temperatura en què es forma l'eutèctic, elements de polímers plàstic poden actuar com a reductors i en el cas de metalls nobles (Cu,Ag,Au) produir metall en estat pur, com el coure que es mostra en la fotografia.



7.-En el cas de l'estronci el valor d'extracció amb aigua règia es menor que l'extret per tractament tèrmic amb mescla eutèctica de clorurs, en un mateix mòbil. Pot ser degut a un error en l'atac per aigua règia. De totes maneres en el segon mòbil, tant l'extracció amb la mescla salina com l'obtenció de l'òxid confirmen una extracció positiva.

GRUP B			
1	Tractament aigua règia circuit electrònic	Mòbil C	Confirmació d'extracció terres rares
2	Tractament Tèrmic amb mescla eutèctica de clorurs (3 h.)		
3	Tractament Tèrmic amb mescla eutèctica de clorurs (8h.)	Mòbil D	Optimització procés a 8 hores.
4	Obtenció d'òxids a partir de la dissolució eluïda per la reïna		

TERRES RARES							
	Pr	Nd	Eu	Tb	Er	Yb	Lu

1	1310	6300	1100	757,7	4650	1030	105,8		
2			7,7		94,5	125,5	48,1		
3			31,4	205,8	427,4	1120	197,6		
4				24,5	125,8	304,2	55,2		
METALLS TRANSICIÓ I D'ALTRES									
	Ti	Cr	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Zr	Sn
1	3830	24270	33120	340280	11220	10,3	50,4		25760
2		381,6	286,4	20850	1450		105,9	8,8	870,9
3	218,2	1890	4070	54800	15950		34,5	536,5	3190
4		71,1	1650	23270	3220	13,5			755,3

(Valors expressats en ppm)

Grup B

1.-En aquest segon grup (B), es confirma també com passa en el primer grup la extracció de terres rares i determinats metalls de transició. La diferència amb el primer grup rau en el tractament del segon mòbil.

2.-En el pas (3), s'ha fet un tractament tèrmic amb mescla eutèctica de clorurs durant 8 hores i els clorurs obtinguts, una vegada tamisats, s'han dissolt amb HCl 0,1 M. Aquesta dissolució s'ha passat per reïna catiònica i la solució eluïda amb HCl 2M, s'ha tractat amb NaOH 2M i els hidròxids precipitats s'han calcinat per obtenir el òxid i poder passar la mostra per la microsonda de RX. Els resultats mostren una major eficàcia en el tractament tèrmic amb mescla eutèctica de clorurs i no tant en el procés de pas de la reïna.

3.-En els mòbils que utilitza aquest grup no es presenta retenció de Pr i Nd. Però si presenta retenció de Tb.

4.- Els valors d'estranci, com va passar en el primer grup, presenta valors menors en l'atac amb aigua règia que en el propi tractament tèrmic amb mescla eutèctica de clorurs. És possible, donat que es repeteix en els dos processos, que en l'atac d'aigua règia es perdi Sr^{2+} en algun pas del procediment de lixiviació.

8.- Conclusions

En conclusió final, pensem que el tractament tèrmic amb mescla eutèctica de clorurs permet la concentració de terres rares i metalls de transició en una mostra que possibilita un tractament extractiu secundari eficaç. A partir del tractament amb aquest mètode dels residus electrònics, podem generar un concentrat (espècie de jaciment secundari) ric en terres rares i metalls de valor especial com el zirconi i el titani, que poden ser aprofitats. Tanmateix aquest mètode estalvia la producció de residus que es generen en el tractament d'àcids forts com l'àcid nítric i l'àcid clorhídric i s'accentua aquest estalvi en la producció de llots. La sal es pot utilitzar a partir de l'excedent de salmorra en plantes d'osmosi afegint el clorur de potassi per tal de fer l'eutèctic. A partir del concentrat i aplicant mètodes de quelants específics, poden extreure's els metalls de forma més selectiva.

L'estudi dut a terme ha permès posar en relleu la viabilitat tècnica de diversos mètodes per a la recuperació de terres rares contingudes en telèfons mòbils fora d'ús. A partir de l'anàlisi

comparativa dels tres protocols assajats —aigua règia, tractament tèrmic amb mescla eutèctica de clorurs i tractament amb resina catiònica— es poden extreure les conclusions següents:

El tractament amb aigua règia ha estat el mètode més eficient en termes de recuperació quantitativa de terres rares. La seva capacitat per dissoldre pràcticament tots els metalls presents en els circuits electrònics el converteix en un procediment molt potent, però alhora altament contaminant. Els gasos emesos, la generació de residus líquids agressius, la generació de llots, i l'elevat consum de reactius forts en limiten l'aplicació sostenible.

El tractament tèrmic amb mescla eutèctica de clorurs ha ofert resultats satisfactoris en la concentració de determinades terres rares i metalls com el coure, facilitant-ne la separació física en fase sòlida. Tot i tenir un rendiment inferior al de l'aigua règia, presenta una menor perillositat ambiental i permet obtenir subproductes d'interès tecnològic com el coure metàl·lic, metalls de transició i les terres rares.

La cloruració mitjançant resina catiònica permet concentrar de manera selectiva els ions lantànids amb valència +3, tot generant un impacte ambiental molt reduït. Aquest procediment destaca per la seva seguretat operativa, facilitat de manipulació i possibilitat d'adaptació a escales més grans.

En conjunt, s'ha pogut constatar que la reutilització de residus electrònics no només és factible, sinó també altament recomanable en un context de transició cap a models industrials més sostenibles. L'adopció de metodologies alternatives, com les basades en el tractament tèrmic amb mescla eutèctica de clorurs, pot contribuir significativament a la reducció de la dependència de la mineria primària i a la minimització dels impactes ambientals associats.

9.- Perspectives futures

L'èxit dels protocols assajats en aquest projecte obre la porta a diverses línies de recerca futures:

- **Optimització de processos:** cal aprofundir en la cinètica i els equilibris químics implicats en l'adsorció i eluïó de terres rares mitjançant resines, amb l'objectiu de maximitzar-ne el rendiment i l'eficiència de separació. Fomentar la sostenibilitat del procés de tractament químic.
- **Escalabilitat industrial:** es proposa l'estudi de la implementació d'aquests processos a escala de planta pilot, valorant-ne el cost energètic, la recuperació de reactius i la gestió dels residus generats.
- **Recuperació integral:** seria convenient ampliar la recuperació a altres metalls estratègics presents en dispositius electrònics, com l'or (Au), el tàntal (Ta) i el pal·ladi (Pd), Terres Rares, Titani, Zirconi mitjançant metodologies integrades i sinèrgiques.
- **Avaluació del cicle de vida (LCA):** per tal de determinar amb rigor l'impacte ambiental global de cada metodologia, seria rellevant realitzar una anàlisi del cicle de

vida que permet comparar els processos no només en termes d'eficiència química, sinó també d'efectes ecològics i socials.

Amb aquestes línies de desenvolupament, la recuperació de terres rares i metalls de transició específic a partir de residus electrònics pot esdevenir una solució per avançar cap a una indústria més circular, segura i ambientalment responsable.

Aquest treball ha estat realitzat pels següents alumnes de segon curs del Cicle Mig d'Operacions de Laboratori; Lucia Aguilar, Abril Amador, Jordi Cortez, Aitor Hernández, Adrián Montilla i Maria Roig. El treball ha estat supervisat pel Departament de Química de l'Institut Miquel Biada. Les analítiques amb el mètode de fluorescència de RX han estat realitzades amb la col·laboració de la UPC de Manresa, sota la direcció de la Dra. Maria Pura Alfonso i el Dr. Arnau Martínez Alcalà.

10.-Bibliografia

Ruiguang Pana, Chen Zhua,* . **2024.Linear correlations of Gibbs free energy for rare earth element oxide, hydroxide, chloride, fluoride, carbonate, and ferrite minerals and crystalline solids.** Department of Earth and Atmospheric Sciences, Indiana University Bloomington,IN 47405, USA