

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Metalúrgica

**Profesor Patrocinante**  
Fernando Antonio Parada Luna

# Optimización de la lixiviación de carbonatos de tierras raras en medio HCl para la empresa Aclara

**Carlos Alejandro Sepúlveda Benítez**

Informe de Memoria de Título  
para optar al Título de  
Ingeniero Civil Metalúrgico

Agosto, 2024

## Agradecimientos

*En primer lugar, agradecer a mis quienes formaron la persona que soy y siempre han tenido un apoyo, preocupación y amor incondicional por mí, y quienes siempre se esforzaron por mi desarrollo, enseñanza y bienestar.*

*Igualmente agradecer el apoyo, cariño y motivación, de quien siempre estuvo a mi lado en esta etapa de la vida, en momentos buenos y malos, dándome ese empujoncito para salir adelante y superarme, y entregándome su amor, apoyo y ánimo para lograr nuestras metas, a mi amor Dominic.*

*También agradecer a los docentes y funcionarios de esta universidad, especialmente a los pertenecientes al departamento de ingeniería metalúrgica quienes hacen posible el desarrollo de esta hermosa carrera.*

*Agradecer también a mi patrocinante, Profesor Fernando parada, por consejos, recomendaciones y paciencia en esta ultima etapa de la carrera.*

**GRACIAS...**

## Resumen

En el presente trabajo se evaluó el proceso de lixiviación en medio ácido clorhídrico del concentrado de carbonatos de tierras raras producido por el módulo Penco de la empresa Aclara, lo que se enmarca en el propósito de evaluar un tratamiento al concentrado generado con el fin de entregar valor agregado.

Los objetivos específicos del presente trabajo son evaluar la eficacia del proceso de lixiviación de los elementos de tierras raras bajo diferentes condiciones, determinar el consumo de ácido clorhídrico en el proceso y optimizar la eficacia de extracción de los elementos de interés y la acidez del PLS generado en el proceso.

Este trabajo se dividió en 5 etapas, la primera buscó determinar el consumo del reactivo que en este caso fue el ácido clorhídrico (HCl), luego de obtener este parámetro se evaluó en diferentes pruebas experimentales el desempeño del proceso variando tanto la concentración de HCl como la razón líquido-sólido. Seguido de esto se procedió a medir la acidez de las pruebas anteriores y diseñar nuevas condiciones con el fin de obtener un pH óptimo para las etapas posteriores propuestas. Posteriormente se realizaron pruebas a parámetros fijos con el fin de evaluar la cinética de la reacción estudiada. Para finalmente analizar los datos obtenidos de las pruebas y análisis químicos realizados a las muestras obtenidas.

Dentro de los resultados obtenidos los más relevantes son:

- Una alta disolubilidad del concentrado estudiado en el medio ácido clorhídrico, sobre un 95% de la masa de concentrado fue disuelta en la mayoría de las pruebas realizadas.
- El punto óptimo de la acidez deseada en el PLS generado (pH = 0,8) en las razones líquido-sólido igual a 5 y 10, coincide con concentraciones de ácido clorhídrico en donde se disuelve también el máximo de masa de concentrado.
- La cinética de la reacción estudiada es bastante rápida ya que en pruebas experimentales se determinó que a los 10 minutos ya se alcanza la máxima lixiviación de masa de concentrado.
- En análisis químicos a los PLS, los elementos de tierras raras con mayores concentraciones fueron el Y, Nd y La, y las principales impurezas fueron el Al, Ca, Fe y el Mn, elementos de metales pesados y radioactivos solo se detectaron en pequeñas concentraciones.

## Abstract

In the present work, the leaching process in hydrochloric acid medium of the rare earth carbonate concentrate produced by the modulo Penco the Aclara company was evaluated, this is framed in the intention of evaluating a treatment to the concentrate generated to deliver added value.

The specific objectives of this work are to evaluate the efficiency of the leaching process of rare earth elements under different conditions, to determine the consumption of hydrochloric acid in the process, to optimize the extraction efficiency of the elements of interest and the acidity of the PLS generated in the process.

This work was divided into 5 stages, the first one sought to determine the consumption of the reagent, which in this case was hydrochloric acid (HCl). After obtaining this parameter, the performance of the process was evaluated in different experimental tests, varying both the HCl concentration and the liquid-solid ratio. After this, the acidity of the previous tests was measured and new conditions were designed in order to obtain an optimum pH for the subsequent stages proposed. Subsequently, tests were carried out at fixed parameters to evaluate the kinetics of the reaction studied. Finally, the data obtained from the tests and chemical analysis of the samples obtained were analyzed.

Among the results obtained, the most relevant are the following:

- A high dissolvability of the concentrate studied in the hydrochloric acid medium, over 95% of the concentrate mass was dissolved in most of the tests performed.
- The optimum point of the desired acidity in the PLS generated (pH = 0.8) at liquid-solid ratios equal to 5 and 10, coincides with concentrations of hydrochloric acid where the maximum mass of concentrate is also dissolved.
- The kinetics of the reaction studied is quite fast since in experimental tests it was determined that after 10 minutes the maximum leaching of concentrate mass is already reached.
- In chemical analysis of the PLS, the rare earth elements with the highest concentrations were Y, Nd and La, and the main impurities were Al, Ca, Fe and Mn; heavy metal and radioactive elements were only detected in small concentrations.

## ÍNDICE

<b>1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1 Objetivos generales .....	2
1.2 Objetivos específicos .....	2
<b>2. Antecedentes</b> .....	<b>3</b>
2.1 Antecedentes de tierras raras.....	3
2.1.1 Elementos de tierras raras .....	3
2.1.2 Propiedades de tierras raras .....	5
2.1.3 Mineralogía y depósitos de REE .....	6
2.1.4 Mercado mundial de los REE .....	9
2.1.5 Situación de oferta y demanda mundial de REE .....	11
2.1.6 Aplicaciones de las tierras raras.....	14
2.2 Procesos Hidrometalúrgicos .....	15
2.2.1 Lixiviación.....	15
2.2.2 Lixiviación de elementos de tierras raras .....	16
2.2.3 Extracción por solventes .....	20
2.3 Descripción Modulo Penco de Aclara .....	22
<b>3. Desarrollo Experimental</b> .....	<b>23</b>
3.1 Equipos y procedimientos .....	24
3.1.1 Pruebas de consumo .....	24
3.1.2 Pruebas de optimización.....	27
3.1.3 Mediciones de pH .....	29
<b>4. Resultados</b> .....	<b>30</b>
4.1 Determinación del consumo de ácido clorhídrico .....	30
4.2 Pruebas de evaluación de la lixiviación .....	30
4.3 Optimización para el pH del PLS .....	34
4.4 Cinética de la reacción .....	36
4.5 Resultados análisis químicos.....	38
4.5.1 Análisis de elementos de tierras raras.....	43
4.5.2 Comportamiento de las impurezas .....	47
<b>5. Conclusiones</b> .....	<b>49</b>
<b>6. Bibliografía</b> .....	<b>52</b>
<b>7. Anexos</b> .....	<b>54</b>

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Concentración de elementos de tierras raras a escala logarítmica (Cochilco, 2016).....	4
Figura 2.	Principales reservas mundiales de óxidos de tierras raras. (U.S. Geological Survey, 2023) .....	9
Figura 3.	Producción mundial de tierras raras en los últimos años. ....	10
Figura 4.	Producción de Tierras raras en el 2022. (U.S. Geological Survey, 2023).....	11
Figura 5.	Uso estimado histórico de REE en diferentes sectores(Vaughan et. al., 2023) .....	13
Figura 6.	Comparación de la demanda total de REO en 2020 y 2030 (proyectada),(Roskill, 2021).....	13
Figura 7.	Esquema de proceso de recuperación de TTRR de arcillas iónicas. ....	20
Figura 8.	Proceso circular de minerales de tierras raras. Modificado de (Aclara Resources, 2023).....	22
Figura 9.	Carbonato de tierras raras utilizado en los ensayos. ....	23
Figura 10.	Montaje pruebas de lixiviación de carbonatos con agitación. ....	25
Figura 11.	Montaje de filtración, compuesto por: Matraz Kitasato (A), Embudo Erlenmeyer (B) Bomba de vacío (C). ....	26
Figura 12.	Residuo de lixiviación de carbonatos de tierras raras. ....	26
Figura 13.	Equipo utilizado para la medición de pH de los PLS obtenidos. ....	29
Figura 14.	Efecto del exceso de ácido con respecto al consumo de HCl de referencia (585 kg/t concentrado) .....	32
Figura 15.	Efecto de la razón líquido/sólido en la extracción con una dosificación de ácido equivalente al exceso del 5% con respecto al consumo de referencia (585 kg/t concentrado) .....	33
Figura 16.	pH del PLS obtenido en ensayos a razones líquido-sólido igual a 10 y a 5. ....	35
Figura 17.	Porcentaje de extracción sólido en función del tiempo a temperatura ambiente, una razón L/S de 10/1 y 1.72 M de HCl inicial.....	36
Figura 18.	Concentración de los elementos de tierras raras, visualizada para las 7 muestras caracterizadas en la Tabla 14.....	39
Figura 19.	Concentración de los elementos de tierras raras, visualizada por elemento para las 7 muestras caracterizadas en la Tabla 14. ....	40
Figura 20.	Concentración de los elementos de tierras raras para las muestras 1 y 2, obtenidas a razón L/S igual a 10/1 y con una concentración de HCl igual a un 25% y 50% de exceso respectivamente. ....	40
Figura 21.	Concentración de los elementos de tierras raras para las muestras 4 y 5, obtenidas a razón L/S igual a 5/1 y con una concentración de HCl estequiométrica y un 50% de déficit respectivamente. ....	41
Figura 22.	Concentraciones de las principales impurezas de las muestras. ....	42

Figura 23.	Grado de REE lixiviado en las muestras analizadas en base al concentrado. ....	44
Figura 24.	Comparación en eficacia de lixiviación de REE en las muestras 1 y 2 obtenidos a razón líquido sólido igual a 10 (M-1 con 25% exceso HCl y M-2 con 5% exceso HCl). ....	45
Figura 25.	Comparación en eficacia de lixiviación de REE en las muestras 4 y 5 obtenidos a razón líquido sólido igual a 5 (M-4 con HCl del consumo de referencia y M-5 con 50% de déficit de HCl). ....	46
Figura 26.	Concentraciones de las principales impurezas, visualizadas por elemento. ....	48
Figura 27.	Concentraciones de las principales impurezas, visualizadas por muestra. ....	48
Figura 28.	Concentración del elemento escandio en las 7 muestras analizadas, expresadas en mg/L. ....	55
Figura 29.	Concentración del elemento itrio en las 7 muestras analizadas, expresadas en mg/L. ....	55
Figura 30.	Concentración del elemento lantano en las 7 muestras analizadas, expresadas en mg/L. ....	56
Figura 31.	Concentración del elemento cerio en las 7 muestras analizadas, expresadas en mg/L. ....	56
Figura 32.	Concentración del elemento praseodimio en las 7 muestras analizadas, expresadas en mg/L. ....	57
Figura 33.	Concentración del elemento neodimio en las 7 muestras analizadas, expresadas en mg/L. ....	57
Figura 34.	Concentración del elemento samario en las 7 muestras analizadas, expresadas en mg/L. ....	58
Figura 35.	Concentración del elemento europio en las 7 muestras analizadas, expresadas en mg/L. ....	58
Figura 36.	Concentración del elemento gadolinio en las 7 muestras analizadas, expresadas en mg/L. ....	59
Figura 37.	Concentración del elemento terbio en las 7 muestras analizadas, expresadas en mg/L. ....	59
Figura 38.	Concentración del elemento disprosio en las 7 muestras analizadas, expresadas en mg/L. ....	60
Figura 39.	Concentración del elemento holmio en las 7 muestras analizadas, expresadas en mg/L. ....	60
Figura 40.	Concentración del elemento erbio en las 7 muestras analizadas, expresadas en mg/L. ....	61
Figura 41.	Concentración del elemento praseodimio en las 7 muestras analizadas, expresadas en mg/L. ....	61
Figura 42.	Concentración del elemento iterbio en las 7 muestras analizadas, expresadas en mg/L. ....	62
Figura 43.	Concentración del elemento lutecio en las 7 muestras analizadas, expresadas en mg/L. ....	62
Figura 44.	Concentración promedio de las principales impurezas presentes en el PLS. ....	63

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Listado de elementos de tierras raras .....	3
Tabla 2:	Principales clasificaciones de Tierras raras según peso atómico y criticidad. (USGS, 2002).....	5
Tabla 3:	Propiedades fisicoquímicas de REE (Gupta & Krishnamurthy, 2005).....	5
Tabla 4:	Principales minerales de mena de REE. (Zhang et. al., 2016).....	6
Tabla 5:	Principales usos de los elementos de tierras raras. (U.S. Geological Survey, 2023)(Vaughan et. al., 2023) .....	14
Tabla 6:	Resumen de técnicas de lixiviación de minerales de REE. (Gupta & Krishnamurthy, 2005), (Kuzmin et. Al., 2012), (Merritt, 1990), (Moldoveanu & Papangelakis, 2013a), (Moldoveanu & Papangelakis, 2013b) .....	16
Tabla 7:	Concentraciones de elementos de tierras raras en el concentrado estudiado. ....	23
Tabla 8:	Condiciones para pruebas de consumo de HCl .....	24
Tabla 9:	Condiciones experimentales de acidez de las diferentes pruebas.....	27
Tabla 10:	Condiciones y resultados de consumo de HCl a temperatura ambiente. ....	30
Tabla 11:	Condiciones y resultados de lixiviación a temperatura ambiente .....	31
Tabla 12:	Condiciones y resultados de pH de PLS. ....	34
Tabla 13:	Condiciones y resultados de lixiviación a temperatura ambiente. ....	36
Tabla 14:	Detalle y condiciones de las muestras analizadas.....	38
Tabla 15:	Concentración promedio de las impurezas para las muestras analizadas.....	47
Tabla 16:	Concentraciones de los LREE en las muestras analizadas, expresadas en mg/L.....	54
Tabla 17:	Concentraciones de los HREE en las muestras analizadas, expresadas en mg/L.....	54
Tabla 18:	Grado de REE lixiviado en las muestras analizadas en base al concentrado, expresado en porcentaje. ....	63

## 1. Introducción

Aclara se encuentra desarrollando el Módulo Penco, el que se extiende por 600 hectáreas en la comuna de Penco, región del Bio-Bío. El objetivo de este proyecto es producir óxidos de tierras raras de calidad, procedente de sus yacimientos de arcilla iónica ricos en tierras raras pesadas, con el fin de convertirse en un proveedor líder para las empresas de tecnologías limpias y tecnologías integradas en la energía verde. (Aclara Resources, 2023).

El termino tierras raras se refiere al grupo de 17 elementos químicos de características químicas similares, entre ellos se encuentran escandio, itrio y los lantánidos, término que se refiere a él lantano y los catorce elementos siguientes los cuales se agrupan bajo este término debido a sus características similares al lantano. Todos estos elementos se encuentran en la naturaleza a excepción del prometio. (Avendaño Corvalán, 2017)

Aunque por su nombre se puede entender que son elementos poco abundantes en la naturaleza esto no es así, debido que estos elementos son más abundantes en la corteza que la misma plata y oro, pero tienen una muy baja tendencia de estar concentrados. El termino tierra en su nombre se debe a un antiguo término utilizado para referirse a los óxidos y el termino raras es debido a que en los años 40 eran difíciles de obtener y por lo tanto se consideraban raras.

Las tierras raras tienen múltiples usos en la tecnología, hoy en día son de vital importancia para el desarrollo de tecnologías amigables con el medio ambiente dado su uso para los motores eléctricos y para los generadores de energía eólica. Por lo anterior, la USGS el año 2022 incluyó la totalidad de las tierras raras en la lista de elementos críticos para Estados Unidos. La compañía minera Aclara consciente de lo anterior y de las intenciones de la unión europea y EE. UU. de disminuir la dependencia de la producción de china, busca producir concentrado de tierras raras y se encuentra desarrollando investigaciones para tratar los concentrados mediante  $H_2SO_4$  y HCl y posteriormente separar los elementos de TTRR desde el PLS mediante SX. Dentro de lo anterior se efectúa el estudio de la lixiviación del concentrado con HCl y obtener un PLS óptimo para la etapa de extracción por solventes. Con ello se busca entregarle un valor agregado al concentrado, el cual ya es producido a escala piloto por Aclara. Para ello se realizaron pruebas de lixiviación acida con HCl al concentrado

producido a escala piloto por la empresa, con ello evaluar el efecto de algunas variables de interés y encontrar condiciones óptimas para operaciones y/o ensayos posteriores.

## 1.1 Objetivos generales

El objetivo principal del estudio fue la evaluación y determinación de las condiciones óptimas del proceso de lixiviación en medio HCl del concentrado de carbonatos de tierras raras obtenido por la planta piloto de la minera Aclara.

## 1.2 Objetivos específicos

- Determinar el consumo de HCl en el proceso de lixiviación del concentrado
- Determinar la eficacia de extracción bajo diferentes condiciones
- Evaluar las condiciones a las cuales se optimiza la eficiencia en la extracción de los elementos deseados
- Determinar las condiciones bajo las cuales se obtiene un PLS de la acidez deseada para etapas posteriores.

## 2. Antecedentes

### 2.1 Antecedentes de Tierras Raras

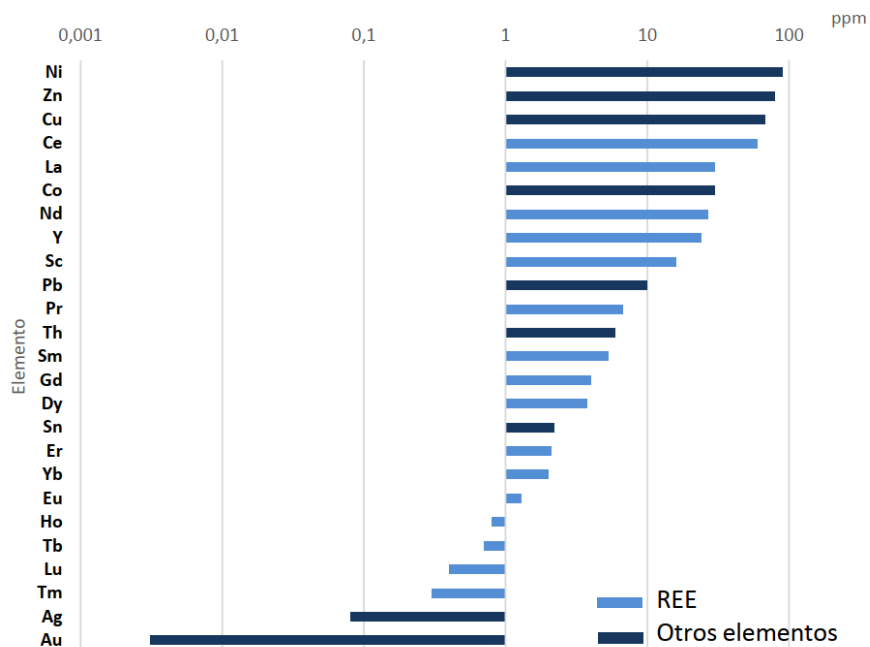
#### 2.1.1 Elementos de tierras raras

El termino tierras raras (REE) denota un grupo de 17 elementos metálicos de propiedades químicas similares, como se muestra en la Tabla 1, está conformado por el itrio (Y), escandio (Sc) y los lantánidos. Los lantánidos son una serie de elementos con un numero atómico del 57 al 71, todos a excepción del prometio (Pm) son encontrados en la naturaleza.

**Tabla 1: Listado de elementos de tierras raras**

	<b>Elemento</b>	<b>Símbolo</b>	<b>N° atómico</b>
Otros	Escandio	Sc	21
	Itrio	Y	39
Lantánidos	Lantano	La	57
	Cerio	Ce	58
	Praseodimio	Pr	59
	Neodimio	Nd	60
	Prometio	Pm	61
	Samario	Sm	62
	Europio	Eu	63
	Gadolinio	Gd	64
	Terbio	Tb	65
	Disproso	Dy	66
	Holmio	Ho	67
	Erbio	Er	68
	Tulio	Tm	69
	Yterbio	Yb	70
Lutecio	Lu	71	

A pesar de lo que indica su nombre los elementos de tierras raras (REE), en realidad no son elementos menos abundantes que el plomo o el oro, además todas las tierras raras con excepción del prometio (Pm) son más abundantes que cualquiera de los metales preciosos (Au, Ag, Rh, Pd y Pt) y el cerio (Ce) tiene una abundancia similar al cobre (Cu) y es cuatro veces más abundante que el plomo (Pb) (ver Figura 1). Otra propiedad relevante es que los REE con número atómico par son mucho más abundantes que las con número atómico impar, esto es conocido como la regla de Oddo-Harkins.



**Figura 1. Concentración de elementos de tierras raras a escala logarítmica (Cochilco, 2016).**

Como muestra la Tabla 2, según su peso atómico los químicos subdividen los elementos de tierras raras en dos grupos: tierras raras livianas (en inglés light rare earth elements, LREE) desde el lantano (La) al Europio (Eu) las cuales son relativamente más abundantes y las tierras raras pesadas (en inglés heavy rare earth elements, HREE) desde el gadolinio (Gd) al lutecio (Lu). Además, el itrio (Y), a pesar de poseer un número atómico menor que las LREE, es incluido dentro de las HREE debido a que posee similitudes en las propiedades fisicoquímicas y su tendencia a presentarse junto a ellas en la naturaleza. Adicionalmente algunos investigadores consideran la existencia hoy día un grupo intermedio el cual está comprendido por el samario (Sm), europio (Eu), gadolinio (Gd) y terbio (Tb) llamado “tierras raras intermedias” y otras investigaciones (Zepf, 2013) incluyen un cuarto grupo el cual está conformado por su nivel de criticidad, en base al riesgo de suministro e importancia para el desarrollo de energías limpias. Lo anterior se presenta en la Tabla 2 en donde en rojo se destacan los elementos de tierras raras clasificados como críticos desde el 2002 según organismos internacionales como el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Sin embargo, cabe destacar que en la reciente publicación efectuada por el USGS en 2022 se incluye la totalidad de las tierras raras (con excepción del Pm) en la lista de los minerales críticos, esto por la ley de energía de 2022 (The United States Geological Survey, 2023).

**Tabla 2: Principales clasificaciones de Tierras raras según peso atómico y criticidad. (USGS, 2002)**

Livianas					Pesadas								Otros			
Livianas			Intermedias		Pesadas											
La	Ce	Pr	Nd	Sc	Sm	Eu	Gd	Yb	Lu	Ho	Tm	Er	Tb	Dy	Y	Pm

### 2.1.2 Propiedades de las tierras raras

Las tierras raras (REE) al ser fisicoquímicamente similares entre sí como se observa en la Tabla 3, suelen presentarse agrupadas en los minerales, comportándose como una sola entidad, lo cual hace compleja su separación (Zepf, 2013). A pesar de existir las excepciones de  $Ce^{+4}$  y el  $Eu^{+2}$ , los REE tienen radios iónicos similares e igual estado de oxidación, trivalente (estado de oxidación +3). Esta característica permite la sustitución de un elemento de TTRR por otro dentro de las estructuras cristalinas de los minerales, debido a ello se presentan múltiples elementos de TTRR en un mismo mineral. (Castor & Hedrick, 2006). Asimismo, comúnmente suelen encontrarse en rocas y minerales que contienen  $Ca^{+2}$ ,  $Th^{+4}$  y  $U^{+4}$  debido a que sus radios iónicos son similares, por lo que pueden reemplazar o compartir espacio en algunas estructuras cristalinas.

**Tabla 3: Propiedades fisicoquímicas de REE (Gupta & Krishnamurthy, 2005)**

Elemento	Símbolo	N° atómico	Peso atómico	Radio atómico (Å)	Carga	Promedio Corteza (ppm)
Lantano	La	57	138.90	1.061	+3	31.00
Cerio	Ce	58	140.11	1.034	+3, +4	63.00
Praseodimio	Pr	59	140.90	1.013	+3, +4	7.10
Neodimio	Nd	60	144.24	0.995	+3	27.00
Prometio	Pm	61	145.00	0.979	+3	N/A
Samario	Sm	62	150.36	0.964	+2, +3	4.70
Europio	Eu	63	151.96	0.950	+2, +3	1.00
Gadolinio	Gd	64	157.25	0.938	+3	4.00
Terbio	Tb	65	158.92	0.923	+3, +4	0.70
Disprobio	Dy	66	162.50	0.908	+3	3.90
Holmio	Ho	67	164.93	0.894	+3	0.83
Erbio	Er	68	167.26	0.881	+3	2.30
Tulio	Tm	69	168.23	0.869	+2, +3	0.30
Iterbio	Yb	70	173.04	0.859	+2, +3	2.00
Lutecio	Lu	71	174.97	0.848	+3	0.31
Escandio	Sc	21	44.95	0.680	+3	14.00
Itrio	Y	39	88.90	0.880	+3	21.00

### 2.1.3 Mineralogía y depósitos de REE

Debido a que las REE son elementos incompatibles, no suelen incorporarse a la estructura de los principales minerales formadores de roca. Sin embargo, suelen formar parte en algunos minerales accesorios debido a su compatibilidad, algunos ejemplos son la monacita, xenotima y el apatito, los cuales se forman a partir de fluidos magmáticos en las etapas finales de la cristalización (Hanchar & Westrenen, 2007).

Las REE no se encuentran como elementos nativos en la naturaleza debido a su configuración electrónica (Zhang, Zhao, & Schreiner, 2016). Sin embargo, es posible encontrar REE en altas concentraciones en múltiples minerales como los que se presentan en la Tabla 4. Cabe señalar que los minerales de REE se encuentran dominados por LREE como la bastnasita, monacita, allanita y loparita o por HREE como en el caso de la gadolinita, xenotima y euxetina. En la actualidad las principales fuentes minerales para la producción industrial son la bastnasita, monacita y xenotima, sin embargo, se encuentran evaluando otras fuentes para la obtención de REE.

**Tabla 4: Principales minerales de mena de REE. (Zhang et. al., 2016)**

Grupo	Mineral	Formula Química	REO (%)
<b>Carbonato</b>	Bastnasita	$\text{Re}[(\text{CO}_3)\text{F}]$	74,8
	Parisita	$\text{Re}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_3\text{F}_2$	60,3
	Cebaita	$\text{Ba}_3(\text{Ce},\text{Nd})_2(\text{CO}_3)_5\text{F}_2$	-
	Huanghoita	$\text{Ba}(\text{Ce},\text{La},\text{Nb})(\text{CO}_3)_2\text{F}$	40
	Synchisita	$\text{CaCe}(\text{CO}_3)_2\text{F}$	51
<b>Fosfato</b>	Monacita	$(\text{Re},\text{Th})\text{PO}_4$	65,1
	Xenotima	$\text{Y}(\text{PO}_4)$	62
	Cheralita	$\text{CaTh}(\text{PO}_4)_2$	Variable
	Apatito	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F},\text{Cl},\text{OH})$	Variable
	Florencita	$(\text{Ce},\text{Al})_3\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6$	32
<b>Silicato</b>	Gadolinita	$\text{Y}_2\text{FeBe}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}$	48,3
	Gerenita	$(\text{Ca},\text{Nd},\text{Al})_2\text{Fe}_2+(\text{SiO}_4(\text{Si}_2\text{O}_2)\text{O}(\text{OH}))$	44
	Allanita	$(\text{Ca},\text{RE})_2(\text{Al},\text{Fe})_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$	3-51
	Keiviita	$\text{Y}_2\text{Si}_2\text{O}_2$	69
	Zircon	$\text{ZrSiO}_4$	Variable
<b>Óxido</b>	Euxenita	$(\text{Y},\text{Ca},\text{Ce})(\text{Nb},\text{Ta},\text{Ti})_2\text{O}_6$	24,3
	Loparita	$(\text{Ce},\text{Na},\text{Ca})_2(\text{Ti},\text{Nb})_2\text{O}_6$	29,8
	Fergusonita	$\text{YNbO}_4$	39,9
	Aeschynita	$(\text{Y},\text{Ca},\text{Fe})(\text{Ti},\text{Nb})_2(\text{O},\text{OH})_6$	24,6

Polycrasa	$(Y, Ca, Ce, U, Th)(Ti, Nb, Ta)_2O_6$	19,5
Y-Pirocloro	$(Y, Na, Ca, U)_{1-2}Nb_2(O, OH)$	17
Smarskita	$(Y, Fe, U)(Nb, Ta)_5O_4$	24,3

A pesar de no ser elementos escasos, es poco común encontrarlos en concentraciones suficientes como para que la extracción sea económicamente viable. Las tierras raras tienen una baja tendencia a concentrarse en depósitos minerales explotables, y en consecuencia, la mayor parte del suministro mundial proviene solo de unas pocas fuentes.

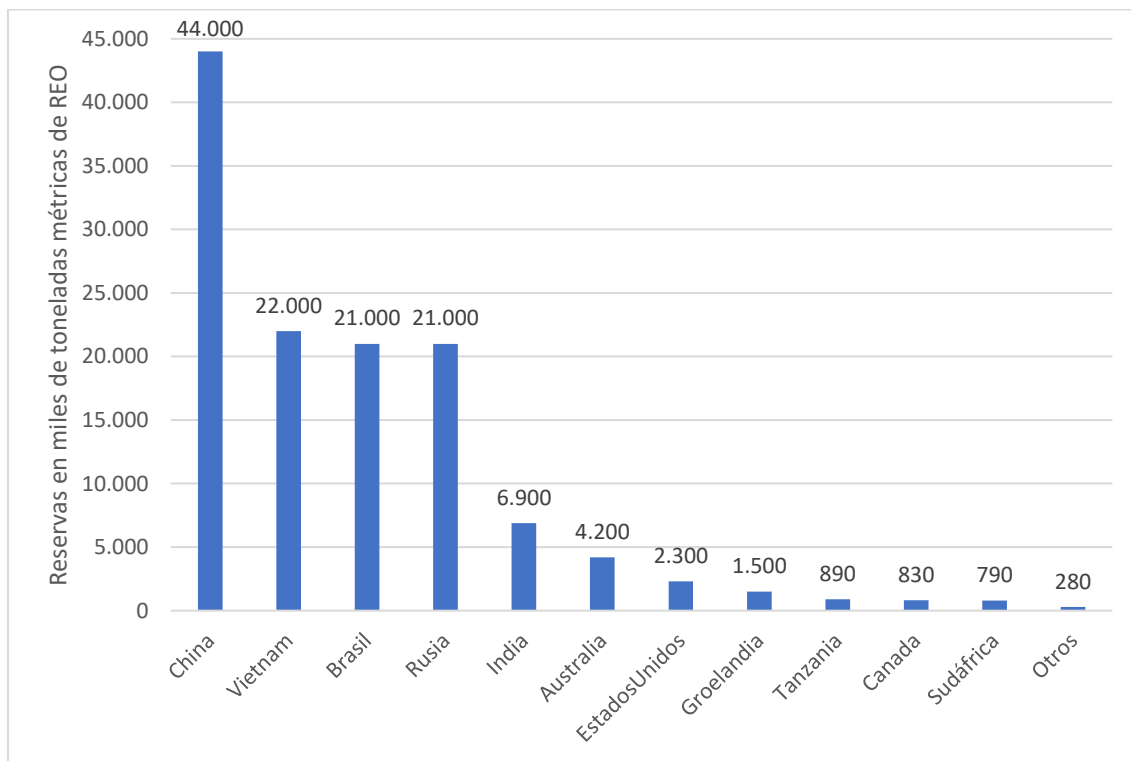
Los depósitos de tierras son pocos y muy diversos, debido a esto se hace difícil su clasificación y algunos tipos de yacimientos no tienen más de un ejemplo. Además, en algunos yacimientos se producen más de un tipo de proceso por ello es posible incluirlo en más de una categoría. Los depósitos se encuentran principalmente en China, pero también existen en Rusia, Australia, Estados Unidos y Kazajistán. Entre los principales yacimientos de tierras raras se pueden enumerar rocas ígneas alcalinas donde los elementos se concentran por no encajar en la estructura de los minerales formadores de roca, carbonatitas que son rocas ígneas que contienen bastnasita, óxidos de hierro con altos contenidos de tierras raras, pegmatitas graníticas las cuales corresponden roca ígnea de grano grueso con contenido de la familia NYF (enriquecidas en Nb, Y, F), depósitos residuales producidos por la meteorización profunda de rocas ígneas, arcillas iónicas con bajas concentraciones de REE (0,04-0,25% REOs), placeres o paleo-placeres de minerales pesados que corresponden a depósitos de playa actuales o antiguo y los depósitos en vetas con carbonatos y/o fosfatos de tierras raras. (Chakhmouradian & Zaitsev, 2012), (Gupta & Krishnamurthy, 2005)

Los yacimientos de arcillas iónicas de tierras raras o arcillas de adsorción de iones (en inglés, ion-adsorption clays) son el tipo de yacimiento presente en el caso del Módulo Penco de Aclara. Estos depósitos contienen entre 0,05 y 0,2 % en peso de óxidos de tierras raras adsorbidos en la superficie de minerales de aluminosilicatos (por ejemplo; caolinita, illita y esmectita). Estos yacimientos son el resultado de la erosión in situ de las rocas hospedantes (principalmente graníticas) que, en escalas de tiempo geológicas, produce la formación de arcillas de aluminosilicatos. Los minerales arcillosos son parte de la clase de filosilicatos, que contienen estructuras en capas de láminas compartidas de aluminio octaédrico y silicio tetraédrico, lo que permite que las moléculas de agua y los cationes hidratados puedan entrar y salir de los espacios entre capas. Muy comúnmente, la sustitución isomorfa de un catión por otro (de tamaño similar, pero con menor carga, por ejemplo,  $\text{Al}^{3+}$  por  $\text{Si}^{4+}$  o  $\text{Mg}^{2+}$  por  $\text{Al}^{3+}$ ) dentro de las estructuras cristalinas conduce a un desequilibrio de carga en las arcillas de silicato, lo que explica la carga negativa permanente en las partículas de arcilla y, por lo tanto, la capacidad de adsorber iones de lantánidos liberados/disueltos de minerales que contienen REE durante la meteorización (Velde & Meunier, 2008). Los climas tropicales y subtropicales cálidos presentan condiciones ideales para que ocurra este proceso (Sanematsu et. al.,2013).

Aunque los depósitos de arcilla de adsorción de iones son de ley sustancialmente más baja que otros tipos de fuentes de lantánidos, la ley más baja se ve compensada en gran medida por la facilidad de extracción y procesamiento, los costos y el contenido muy bajo de elementos radiactivos (normalmente asociados con el itrio). Estos depósitos se extraen mediante métodos a cielo abierto y no se requiere beneficio del mineral. Una lixiviación simple utilizando soluciones salinas monovalentes a temperatura ambiente puede producir un producto REO de alta calidad (Chi, 1989), (Tran, 1991).

### 2.1.4 Mercado mundial de los REE

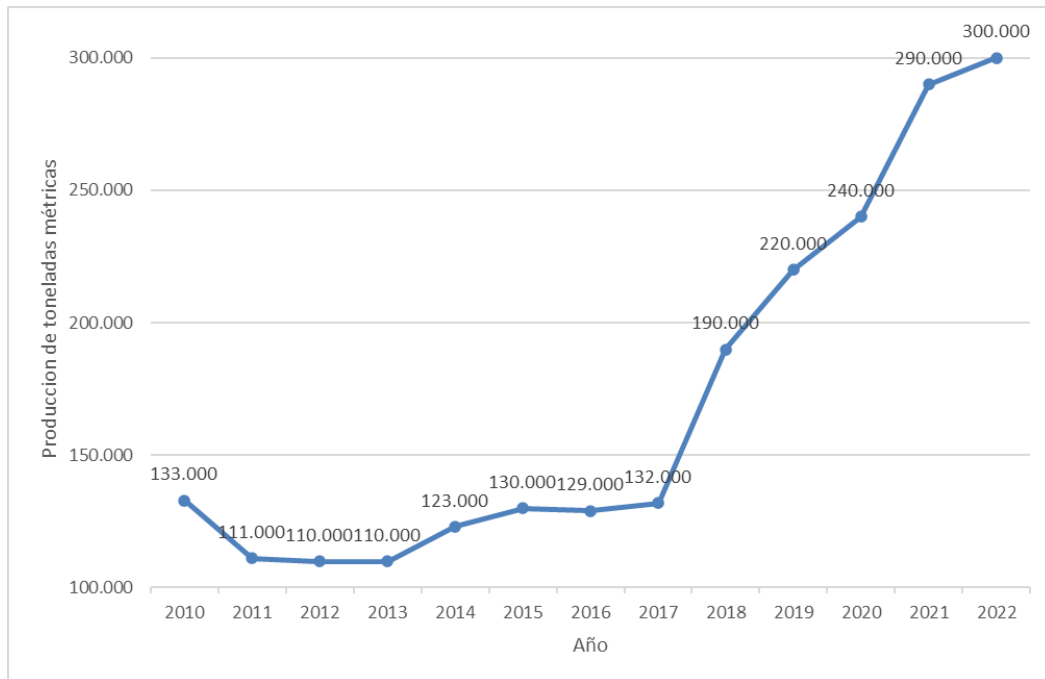
Las tierras raras son relativamente abundantes en la corteza terrestre, pero las concentraciones para desarrollar una explotación factible económicamente son menos comunes que para la mayoría de los demás productos minerales. Para el año 2023, la USGS (principal recopilador de datos referentes a las tierras raras) estima reservas mundiales en torno a 130.000.000 toneladas de tierras raras, de las cuales más de un tercio pertenecen a reservas ubicadas en China. En la Figura 2 se presentan los países con las principales reservas de tierras raras, donde se puede apreciar que las reservas se encuentran principalmente en China con aproximadamente un 34% de las reservas, Vietnam un 17%, Brasil y Rusia con 16%.



**Figura 2. Principales reservas mundiales de óxidos de tierras raras. (U.S. Geological Survey, 2023)**

Desde el año 1900 en adelante la producción mundial de óxidos de tierras raras se mantuvo en torno a las 2000 toneladas anuales, sin embargo, en el año 1996 se registró un importante impulso, al superar las 10.000 toneladas de producción. A partir de dicho año la producción mundial ha crecido a una tasa anual promedio de 4,2% al 2012 (110.000 Ton). En los próximos 5 años, hasta el 2017, se mantuvo una producción entre las 110.000 y 130.000 toneladas, lo cual se evidencia en la Figura 3. Posterior al 2017 se ha presenciado un aumento sostenido hasta las 290.000 toneladas en el año

2021 debido por el desarrollo al desarrollo tecnológico y de energías limpias principalmente. A febrero del 2023, la producción mundial informada para el año 2022 fue de 300.000 toneladas (U.S. Geological Survey, 2023), lo cual evidencia un aumento de casi un 200% con respecto a la producción de 10 años atrás.



**Figura 3. Producción mundial de tierras raras en los últimos años.**

En la Figura 4 se puede observar que de las 300.000 toneladas informadas en la producción del 2022 la producción china representa un 69,76%, lo que evidencia una diferencia abismal con la producción china y la de los otros países, lo cual se encuentra atribuido principalmente a sus grandes reservas (aproximadamente un 34%) y la menor regulación ambiental en el país.

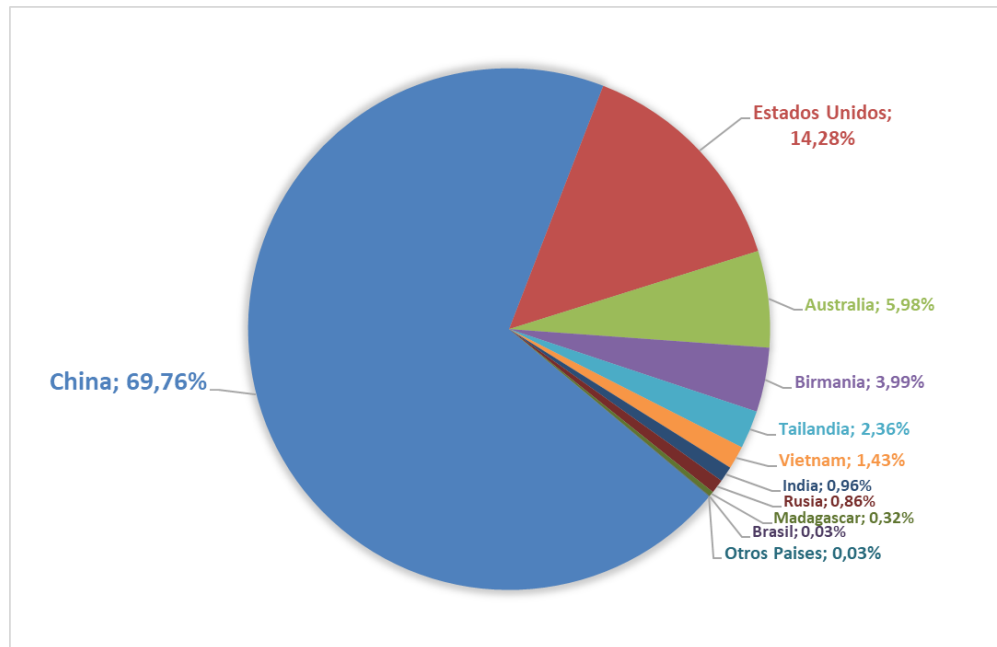


Figura 4. Producción de Tierras raras en el 2022. (U.S. Geological Survey, 2023)

### 2.1.5 Situación de oferta y demanda mundial de REE

Hay muchos depósitos globales que tienen el potencial para convertirse en minas operativas, pero los pasos de concentración y refinación, que ocurren después de la extracción, son un posible cuello de botella en la cadena de suministro de REE. En el otro extremo de la cadena de suministro, existe una demanda cada vez mayor de tecnologías de electrificación, algunas de las cuales actualmente utilizan imanes permanentes de tierras raras en motores y generadores. Aunque muchos REE exhiben propiedades deseables similares, como actividad catalítica, magnetismo y electroluminiscencia, no pueden intercambiarse sin una importante investigación y desarrollo adicional en sus usos finales. Por ejemplo, la creciente demanda de vehículos eléctricos y turbinas eólicas, que utilizan imanes permanentes de tierras raras en sus motores y generadores, da como resultado una mayor demanda de neodimio en lugar de iterbio. (Vaughan et. al., 2023)

Debido a la asociación natural de los REE entre sí, junto con las tendencias divergentes en la demanda de REE específicos pueden generar desequilibrios entre la oferta y la demanda, con precios que fluctúan como una señal, aunque imperfecta, para los mercados. Por lo que resulta útil examinar los lados de la oferta y la demanda juntos y considerar los usos de los REE más abundantes. El cerio (Ce) y el lantano (La) a menudo se consideran subproductos del proceso, debido a su abundancia

geológica en comparación con otros REE. Además, el seguimiento y la actualización de los usos de los REE a nivel elemental ayudan a comprender estas dinámicas. Por tonelaje demandado, el lantano y el cerio son los más importantes, seguidos por el neodimio y el praseodimio. El lantano y el cerio se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, siendo los usos principales la catálisis, el vidrio, la cerámica y los polvos de pulido. Con estos usos, estos elementos sustentan diversas industrias, incluida la industria de refinerías de petróleo (catalizadores para craqueo fluido), la industria informática y electrónica (vidrio y polvos de pulido) y la industria automotriz (catalizadores para convertidores catalíticos de automóviles). El neodimio y el praseodimio se utilizan ampliamente en los imanes. Aunque el tonelaje de Nd y Pr es menor que el del lantano y el cerio, su valor fue significativamente mayor en 2020 (Vaughan et. al., 2023). En la Figura 5 se puede apreciar una creciente demanda general de tierras raras en los últimos años impulsada principalmente por un aumento sostenido en la demanda de imanes.

Se pronostica que las aplicaciones de imanes de tierras raras representarán en torno al 40% de la demanda total para 2030, lo que aumenta la posibilidad para un equilibrio estrecho entre la oferta y la demanda de elementos magnéticos clave de tierras raras, de tal forma brindando la oportunidad de financiar, construir y poner en funcionamiento nueva capacidad de producción (Roskill, 2021). Lo anterior se presenta gráficamente en la Figura 6, en donde se proyecta un aumento en la demanda mayor principalmente en los elementos de Neodimio, Praseodimio, Samario y Disprosio, de las cuales los tres primeros elementos pertenecen al grupo de las tierras raras ligeras que hace unos años eran de menor importancia debido a su mayor abundancia y menor demanda.

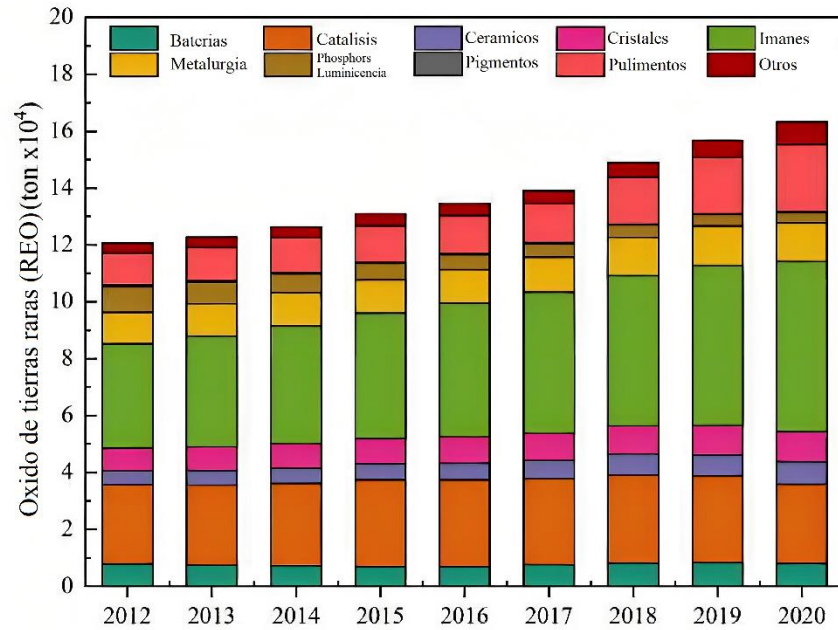


Figura 5. Uso estimado histórico de REE en diferentes sectores. Modificado de (Vaughan et. al., 2023)

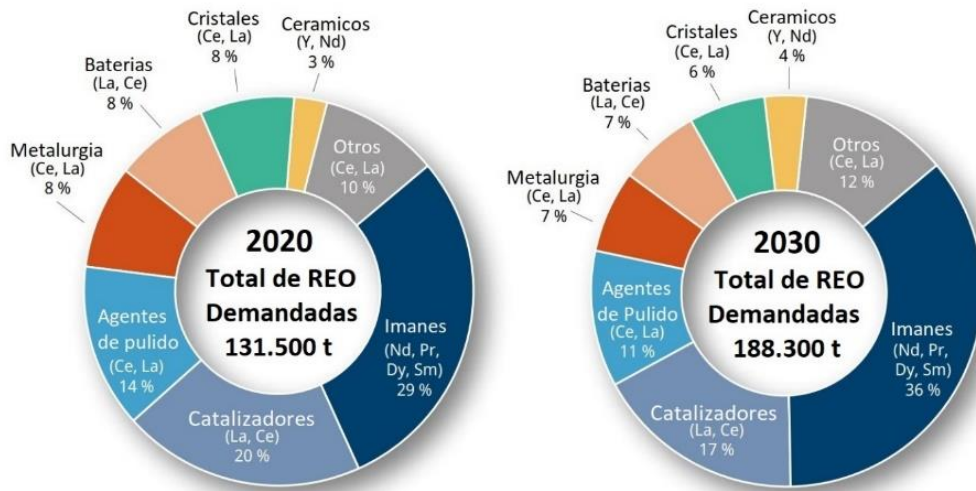


Figura 6. Comparación de la demanda total de REO en 2020 y 2030 (proyectada), mostrada por uso en porcentaje. (Roskill, 2021)

### 2.1.6 Aplicaciones de las tierras raras

Debido a que las tierras raras presentan propiedades físicas y químicas especiales, estas tienen una amplia gama de aplicaciones. Entre las principales se encuentran su utilización en aplicaciones metalúrgicas como catalizadores, vidrio y cerámica, en la fabricación de imanes permanentes y materiales luminiscentes. Actualmente crece la demanda para elementos como el disprosio y neodimio debido a su aplicación en los imanes Neodimio-hierro-boro que son utilizados principalmente en la electromovilidad y turbinas eólicas, sin embargo, otros elementos siguen siendo de vital importancia para el desarrollo tecnológico, equipamiento militar e implementación de energías renovables. En la Tabla 5 se presentan los principales usos de cada elemento de tierras raras.

**Tabla 5: Principales usos de los elementos de tierras raras. (U.S. Geological Survey, 2023)(Vaughan et. al., 2023)**

ELEMENTO	USOS Y APLICACIONES
Escandio	En metalurgia para aleaciones metálicas de la industria aeroespacial, en equipos de defensa y equipos deportivos.
Itrio	En metalurgia para aleaciones metálicas, láseres, cerámicas, eficiencia de combustible, comunicaciones por microondas, monitores, televisores y sensores de temperatura
Lantano	En refinación de petróleo, electrodos de baterías, almacenamiento de hidrogeno, cámaras, vidrios de alto índice, baterías portátiles, láseres y películas de rayos X
Cerio	Convertidores catalíticos, aleaciones metálicas, polvos o agentes de pulido (de espejos, vidrios, cristales ópticos, microprocesadores, lentes), catalizadores y baterías.
Praseodimio	En imanes, láseres, pigmento para vidrio o cerámicas, reflectores, control de la polución y filtros fotográficos.
Neodimio	En imanes de alta potencia para vehículos, generadores de turbinas eólicas y ordenadores portátiles, además en láseres, catalizadores, condensadores y pulido de vidrio
Prometio	En fuentes de radiación beta para baterías nucleares y catalizadores de fracturamiento hidráulico
Samario	En imanes para alta temperatura, láseres y barras de control en reactores (para captura de neutrones)
Europio	en lámparas y luces fluorescentes, en fósforos rojos/Azules, lámparas de vapor de mercurio y aditivo para vidrios.
Gadolinio	En tubos de rayos x, memorias de ordenador, láseres, imanes y cristales de alto índice
Terbio	en láseres lámparas fluorescentes y fósforos verdes (para tubos de tv).
Disprosio	En láseres, baterías, e imanes de alta potencia.
Holmio	En imanes poderosos y láseres.
Erbio	Láseres (para comunicaciones), aceros al vanadio y colorantes de vidrio.
Tulio	En ubos de haz de electrones, detección de rayos x e imanes de alta potencia.

Yterbio	En láseres infrarrojos, agente reductor, paneles solares, fibra óptica y aleaciones metálicas de acero inoxidable.
Lutecio	En comunicación microondas, fosforo de rayos x y usos automotrices.

## 2.2 Procesos Hidrometalúrgicos

### 2.2.1 Lixiviación

La lixiviación corresponde a la disolución selectiva de los constituyentes de interés de la mena o concentrado para obtener una solución acuosa conteniendo el metal valioso y un residuo insoluble conteniendo el material sin valor. A continuación de la lixiviación generalmente se incluye una o más etapas de purificación y separación sólido-líquido para obtener una solución clara desde la cual puede precipitarse selectivamente el metal valioso. (Ruiz, 2020)

La lixiviación es fundamentalmente un proceso de transferencia de masa sólido-líquido. La lixiviación puede ser llevada a cabo en condiciones ambientales o a temperaturas elevadas y/o bajo presión. Las condiciones del proceso dependerán de las reacciones químicas que están teniendo lugar. El objetivo en todos los casos es obtener iones metálicos o complejos que puedan ser extraídos selectivamente desde la solución.

Los dos parámetros fundamentales que definen la solubilidad o insolubilidad de los diversos compuestos metálicos en una solución acuosa son el pH y el potencial de oxidación de la solución. Por tanto, el comportamiento termodinámico de un sistema acuoso está determinado por estos dos parámetros junto con la temperatura y las concentraciones (o actividades) de las especies disueltas. El pH de la solución, por supuesto, determina el carácter ácido-base del sistema y es el principal parámetro que controla la solubilidad de especies metálicas oxidadas o hidrolizadas. Un gran número de procesos hidrometalúrgicos dependen críticamente del control del pH para operar exitosamente. Para controlar el pH se puede agregar deliberadamente un ácido o una base durante la reacción, para consumir iones hidroxilo o iones hidrógeno producidos por la reacción, o en algunos casos se puede diseñar la química del sistema de modo que sea auto regulable (uso de soluciones tampón o “buffer”).

El potencial de oxidación de un sistema acuoso determina primariamente la valencia o estado de oxidación de metales y ligandos, y esto a su vez determina en muchos casos si las especies son

solubles o insolubles. Todos los metales, las aleaciones y la mayoría de los sulfuros metálicos deben ser oxidados para disolverse en medio acuoso. Por lo tanto, muchos de los procesos de lixiviación que se practican industrialmente requieren la adición de un agente oxidante. (Ruiz, 2020)

### 2.2.2 Lixiviación de elementos de tierras raras

Los principales minerales de REE utilizados en la producción primaria de REE son la bastnasita y la monacita. De igual manera son utilizadas las arcillas adsorbidas de iones, las cuales son recursos de menor grado, no obstante, debido a su fácil procesamiento son cada vez más populares como recurso primario. La Tabla 6 presenta una visión general resumida y concisa de las tecnologías de lixiviación, tanto pasadas como presentes, utilizadas en la producción primaria de REE. (Peelman et. al., 2016)

**Tabla 6: Resumen de técnicas de lixiviación de minerales de REE. (Gupta & Krishnamurthy, 2005), (Kuzmin et. Al., 2012), (Merritt, 1990), (Moldoveanu & Papangelakis, 2013a), (Moldoveanu & Papangelakis, 2013b)**

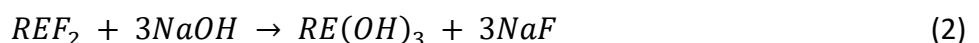
Mineral	Proceso	Rendimiento (REE)	Observaciones	Estado
Bastnasita	1) Lixiviación de HCl para eliminar ganga 2) Calcinación de residuos para formar REO	85-90%	La forma más antigua de procesar concentrados de bastnasita	Anticuoado
	Digestión con HNO <sub>3</sub> o H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	98%	La elección del ácido depende del procesamiento posterior: extracción con solvente → Precipitación HNO <sub>3</sub> → H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Anticuoado
	Tostación a 620°C para liberar el CO <sub>2</sub>	--	Ce <sup>+III</sup> se oxida a Ce <sup>+IV</sup> durante el tostado → no lixivian los fluoruros de REE, el residuo es comercializable	Anticuoado
	Lixiviación 30% de HCl			
	1) Conversión alcalina RE <sub>2</sub> F <sub>3</sub> → RE(OH) <sub>3</sub> 2) Lixiviación de HCl	--	El proceso puede ser precedido con lixiviación con HCl para extraer carbonatos de REE antes de la conversión alcalina	En uso
	Tostación ácido sulfúrico Lixiviación en solución de NaCl Precipitación como sulfatos de sodio	--	Los precipitados se convierten en cloruros para una mayor purificación con extracción con disolvente	En uso

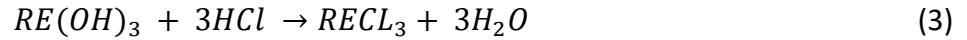
	Digestión en H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> caliente	--	Las condiciones del proceso determinan lo que se lixivia: solo LREE o LREE+HREE+Th	Anticuoado
			No produce ningún producto puro	
Monacita	Digestión en caliente 60-70% NaOH		Ce no se puede lixiviar si Mn está presente	
	Residuo de lavado con agua caliente	98%	Th se lixivia junto con REE	En uso
	Lixiviación con ácido mineral de elección		Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> es comercializable como producto	
	1) Se Calienta en atmósfera reductora y sulfurosa con CaCl <sub>2</sub> y CaCO <sub>3</sub> .	89%	<ul style="list-style-type: none"> <li>No requiere molienda fina</li> <li>Th no lixivia, permanece como ThO<sub>2</sub></li> <li>No hay problema de Mn</li> </ul>	En uso
	2) Lixiviación con 3% HCl			
Arcilla de iones	Lixiviación de sal con (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	80-90%	REE fisio-adsorbida a través del intercambio catiónico	En uso
	Lixiviación con agua de mar	40%	Proceso ineficiente pero barato	I+D
	Lixiviación ácida con ácido fuerte (pH<1)	TODO	Disuelve toda la arcilla, se incurre en costos adicionales significativos	No utilizado

A continuación, se detallan procesos de ciertos minerales presentados en la Tabla 6 debido a su interés e importancia en la producción mundial de REE.

**Bastnasita:** este es un mineral de fluorocarbonato de tierras raras (RE(CO<sub>3</sub>)F), el cual contiene principalmente elementos de tierras raras ligeras. Posterior a una concentración física, los concentrados de bastnasita contienen entre un 40% y 60% REE.

Un problema de las tecnologías utilizadas en el pasado era la imposibilidad de extraer los fluoruros de REE. Esto fue resuelto en las tecnologías actuales de dos maneras diferentes: pre/post-tratamiento de tostado con ácido alcalino o sulfúrico. El tratamiento alcalino, desarrollado por Kruesi y Duker de Molycorp, es un proceso de tres pasos, utilizando las siguientes reacciones:



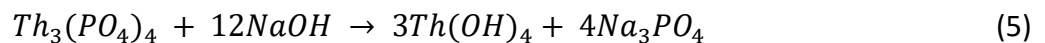
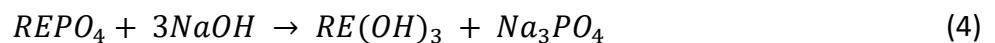


Donde en la primera reacción una solución suave de HCl extrae el carbonato de REE, luego una reacción con NaOH a 96 °C para convertir los fluoruros de REE en hidróxidos, que luego se disuelven por lixiviación en HCl como indica la reacción (3). Existen procesos alternativos, los cuales omiten el primer paso de la lixiviación y en su lugar la bastnasita se trata primero con solución alcalina y luego con HCl.

Otro proceso utilizado actualmente en el mercado para procesar la bastnasita es el tostado con ácido sulfúrico. En el proceso, el concentrado de bastnasita se calienta en una solución de 98% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 400 a 500 °C durante varias horas. Esto descompone la matriz de fluorocarbonato de la bastnasita, dando lugar a la liberación del gas CO<sub>2</sub> y HF. Las REE se convierten en sus sulfatos y pueden precipitarse selectivamente como sulfatos de Na lixiviando el residuo con NaCl disuelto en agua. El proceso de sulfato está actualmente en uso en la mina Bayan Obo en China, mientras que el método alcalino fue utilizado por Molycorp en la mina Mountain Pass antes de cerrar.

**Monacita:** este es un mineral de fosfato de tierras raras, RE(PO<sub>4</sub>), el cual contiene principalmente LREE y en menor cantidad de HREE (más que bastnasita). La monacita puede contener hasta un 70% de REE, principalmente Ce y La, así como cantidades significativas de Nd, Pr y Sm. El contenido de Th también es bastante alto, oscilando entre el 4 y el 12%, lo que es de preocupación en el procesamiento de monacita.

Como se muestra en la Tabla 6, el método alcalino es actualmente una de las principales tecnologías de lixiviación para la monacita. Las reacciones durante la lixiviación alcalina son:



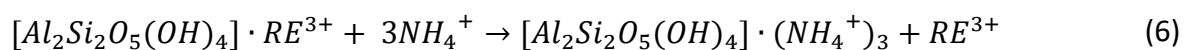
Después de que la monacita se digiere en 60-70% NaOH a 140-150 °C durante 4 horas, el residuo se disuelve en solución ácida caliente, HNO<sub>3</sub>, para la extracción con disolvente se utiliza TBP y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, luego para la extracción con solventes utilizan aminas en la solución. Este proceso requiere una molienda adecuada del mineral de monacita antes del tratamiento (tamaño de partícula inferior a

45  $\mu\text{m}$ ) para lograr tasas de extracción del 98%, incluso con minerales de ley relativamente baja (monacita australiana 48,6% REE). Sin embargo, el Th se lixivia al mismo tiempo, lo que trae preocupación por la radiactividad en el proceso y sus residuos. Otra preocupación es la presencia de  $\text{Mn}^{+IV}$  durante el procesamiento alcalino, que oxida Ce y forma  $\text{CeO}_2$ , que no es lixiviable en HCl.

Un método alternativo ha sido propuesto por Merritt, en el que el mineral de monacita se calienta con  $\text{CaCl}_2$  y  $\text{CaCO}_3$  bajo una atmósfera reductora y sulfurosa. Esto conduce a la conversión de fosfatos de REE en oxisulfuros de REE ( $\text{RE}_2\text{O}_2\text{S}$ ) y oxiclорuros ( $\text{REOCl}$ ), al tiempo que crea un óxido Th y fluorapatita estables ( $\text{Ca}_5\text{Cl}(\text{PO}_4)_3$ ). A partir de esta mezcla, los REE se puede lixiviar selectivamente con HCl al 3%. Este proceso tiene tres ventajas sobre el proceso alcalino: el paso de conversión es más corto (45 min vs 3-4 h en la digestión alcalina), no hay necesidad de molienda fina, y el Th se estabiliza como  $\text{ThO}_2$ . Sin embargo, la tasa de recuperación de REE es menor que el método alcalino (89% vs 98%) y no se obtiene el producto  $\text{Na}_3\text{PO}_4$ . (Merritt, 1990)

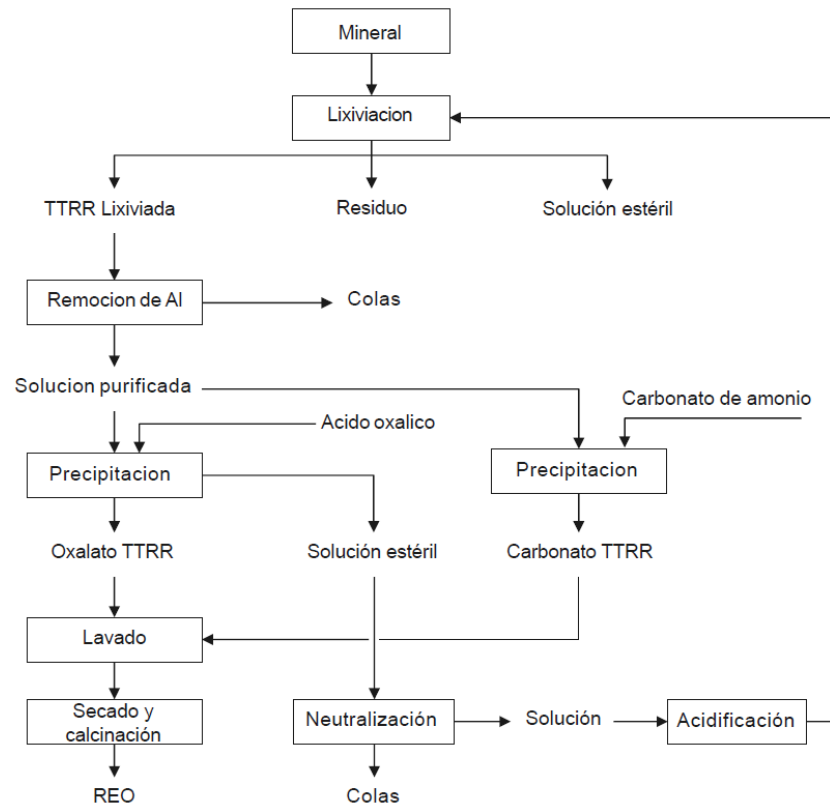
**Arcillas adsorbidas de iones:** son arcillas de alúmina-silicato en las que se han adsorbido iones de REE. Aunque estas arcillas tienen una concentración media de REE de sólo 0,05-0,2 % en peso, su facilidad de proceso y la fracción de REE pesada relativamente alta las convierten en viables recursos de REE. Estas arcillas no requieren ningún proceso de beneficio previo y contienen muy pocos elementos radiactivos, una preocupación constante con el procesamiento de monacita.

Como se indica en la Tabla 6, la lixiviación ácida de sal o a baja concentración de ácido para recuperar los REE se aplican con mayor frecuencia (Moldoveanu & Papangelakis, 2013). Se utilizan comúnmente  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  y NaCl como lixivante y la reacción de lixiviación es la siguiente:



La cinética del proceso de lixiviación es muy rápida, el equilibrio se logra en alrededor de 10 min y la extracción total de REE está entre el 80-90%. También se han realizado ensayos de lixiviación en Madagascar utilizando agua de mar como lixivante (Moldoveanu & Papangelakis, 2013). Sin embargo, estos ensayos arrojaron tasas de recuperación de alrededor del 40%, muy inferiores al 80-90% logrado con  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ . El proceso industrial utilizado actualmente en China utiliza una arcilla iónica con una concentración de REO entre 0,08 y 0,8 % en peso y un lixivante de 7% de NaCl y 1-2%  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  a un pH igual a 4. Se logra una tasa de recuperación de hasta el 95% de REO (Fu, 2009).

En la Figura 7 se muestra un esquema simple del proceso de recuperación de tierras raras de este tipo de depósitos



**Figura 7. Esquema de proceso de recuperación de TTRR de arcillas iónicas. Modificado de (Zhao, Tang, & Wu, 2001)**

### 2.2.3 Extracción por solventes (SX)

Extracción por solventes (SX) es el nombre que se le asigna a un proceso fisicoquímico o químico de separación que, en general, trae como consecuencia una purificación y concentración en el cual las especies solubles que están en una cierta fase líquida se distribuyen preferencial y selectivamente en una segunda fase, también líquida, siendo ambas fases, completamente, inmiscibles entre sí. En la generalidad de los casos, la primera de estas fases, fase portadora de las sustancias disueltas, está constituida esencialmente por agua (fase acuosa) y la otra, o fase extractante, es de naturaleza orgánica (fase orgánica). (Domic Mihovilovic, 2001)

Específicamente en Hidrometalurgia, la extracción mediante solventes orgánicos consiste en un proceso químico, en el cual las especies metálicas contenidas (disueltas) en la fase acuosa reaccionan

con un reactivo orgánico para formar un complejo organometálico. De esta manera, las especies metálicas abandonan la fase acuosa y pasan a formar parte de la fase orgánica. Esto se efectúa de acuerdo con diferentes mecanismos, según el tipo de extractante, ya sea por intercambio catiónico, por intercambio aniónico o por formación de aductos. En el caso de usar un agente quelante el metal en la fase orgánica no está unido directamente a los átomos de carbono, como sería el caso de un compuesto organometálico, sino que, mediante enlaces de coordinación, se une a átomos de oxígeno, nitrógeno o azufre. El proceso de re-extracción, o descarga del reactivo orgánico, consiste en la reacción química inversa. Se puede apreciar entonces, que resulta una condición indispensable para la eficacia de este proceso que las dos fases líquidas, la fase acuosa y la fase orgánica, sean completamente inmiscibles entre sí.

La extracción por solventes como técnica para la recuperación selectiva, concentración y purificación de metales, data al menos de 1842 cuando el químico francés. M.E. Péligot extrajo nitrato de uranio utilizando éter etílico como solvente orgánico, para separar el uranio de otros constituyentes procedentes de la disolución de un mineral de pitchblenda. Sin embargo, la primera operación industrial de SX en Hidrometalurgia sólo se construyó en el año 1942, como parte del esfuerzo bélico de la Segunda Guerra Mundial, en el Proyecto Manhattan para purificar uranio, aplicando la misma técnica experimentada por Péligot un siglo antes en la Mallinckrodt Chemical Works, de EE. UU. (Domic Mihovilovic, 2001)

Para el caso de las tierras raras a nivel industrial, entre los extractantes más utilizados se pueden nombrar el HEH/EPH, D2EHPA, Versatic 10, TBP, Aliquat 336, EHEHPA, HDEHP, P507 de Luoyang Aoda chemical Co. Ltda y los Cyanex 923, 572 y 272 de Cytec Industries Inc. Estos pueden entregar utilidad en forma unitaria o bien en forma complementaria con otros. (Xie et. al., 2014),(Zhang et. al., 2016)

### 2.3 Descripción Módulo Penco de Aclara

El Módulo Penco tiene arcillas iónicas con tierras raras que presentan características únicas en el planeta. Este yacimiento se extiende por 600 hectáreas en la comuna de Penco, región del Bio-Bío. Para el procesamiento productivo de las arcillas presentes en el yacimiento, Aclara desarrollo un proceso denominado cosecha circular de tierras raras el cual entrega como producto un carbonato de tierras raras de alta pureza. En el proceso, los principales reactivos, sulfato de amonio y el agua, se recirculan casi en su totalidad (99% y 95% respectivamente). Como muestra la Figura 8 el proceso comienza con un transporte en camiones del mineral desde el yacimiento, luego las arcillas entran al proceso de intercambio iónico donde son contactadas con una solución de sulfato de amonio para la extracción de las tierras raras, posteriormente se realiza el ajuste de pH correspondiente. La corriente líquida obtenida pasa a la siguiente etapa de remoción de impurezas y los sólidos al lavado para la recuperación de la solución arrastrada por estos. La corriente ya purificada es pasada a la etapa de precipitación donde se adicionan reactivos de base amonio para producir la precipitación de las tierras raras en forma de carbonatos, estos carbonatos de tierras raras luego son filtrados para recuperar el agua y la disposición final del producto del proceso productivo.

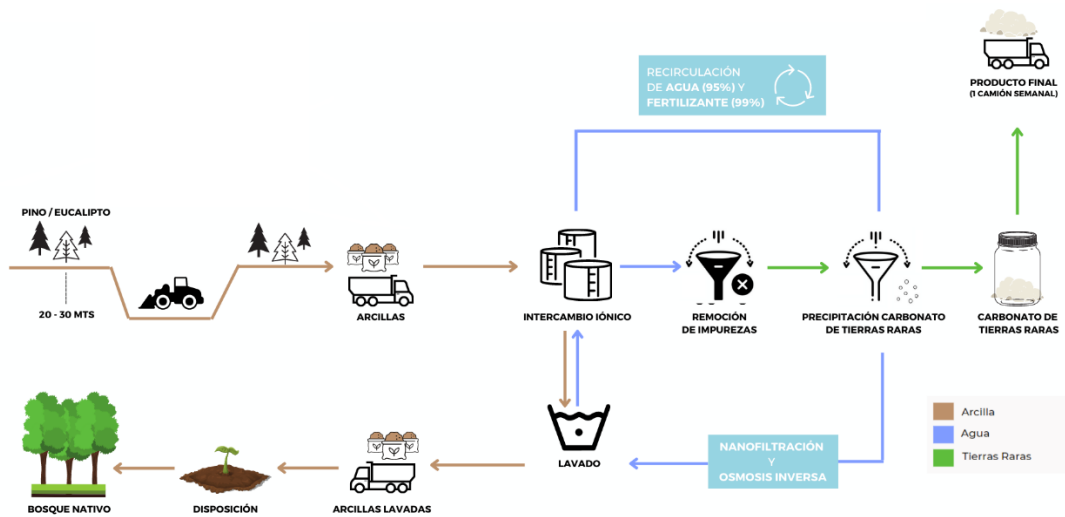


Figura 8. Proceso circular de minerales de tierras raras. Modificado de (Aclara Resources, 2023)

### 3. Desarrollo Experimental

Para el desarrollo de este estudio se utilizó una muestra de concentrado de carbonato de tierras raras con bajo contenido de impurezas entregado por Aclara como el que se observa en la Figura 9, la composición del concentrado se presenta en la Tabla 7, el cual previamente a las pruebas fue homogenizado mediante molienda manual. A partir de este se realizaron pruebas de lixiviación en medio HCL a diferentes razones líquido-sólido y concentraciones de ácido clorhídrico.



**Figura 9. Carbonato de tierras raras utilizado en los ensayos.**

**Tabla 7: Concentraciones de elementos de tierras raras en el concentrado estudiado.**

Elemento	Concentración (ppm)
Y	125187
La	66385
Ce	9310
Pr	18664
Nd	83891
Sm	14292
Eu	801
Gd	18094
Tb	3116
Dy	21683
Ho	5200
Er	15730
Tm	2341
Yb	13145
Lu	2060

### 3.1 Equipos y procedimientos

#### 3.1.1 Pruebas de consumo

Con el fin de conocer un valor estimado del HCl consumido en la lixiviación por unidad de masa del concentrado de tierras raras estudiado, se realizó una prueba de lixiviación por duplicado en iguales condiciones tanto de acidez, volúmenes, masa de carbonatos, agitación y tiempo de lixiviado (pruebas **C1** y **C2**). Las condiciones experimentales se presentan en la Tabla 8, estas se establecieron a partir de estudios anteriormente realizados donde se evaluaron parámetros similares.

**Tabla 8: Condiciones para pruebas de consumo de HCl.**

Condición	Valor
Razón líquido/sólido	22,5/1
Volumen de Solución	450 mL
Masa de carbonato de REE	20 g
Concentración de HCl	2,5 M
Tiempo de lixiviado	120 minutos
Temperatura	20°C (Ambiente)

El equipamiento, materiales e insumos utilizados en este tipo de pruebas se presentan a continuación:

#### **Equipamiento:**

- Matraz aforado.
- Bomba de vacío Winkler UNI-CROWN LAB-300-2.
- Balanza de precisión TOMS Revel 220g.
- Agitador mecánico de cristal con 2 hélices.
- Motor de agitación SciLogex OS20-Pro.
- Matraz Kitasato de 1 L.
- Embudo Erlenmeyer.
- Termómetro de laboratorio.

**Insumos:**

- Concentrado de carbonato de tierras raras proporcionado por Aclara.
- Ácido clorhídrico de calidad análisis (37% HCl).
- Agua destilada.
- Papel filtro grado 200.

**Procedimiento:**

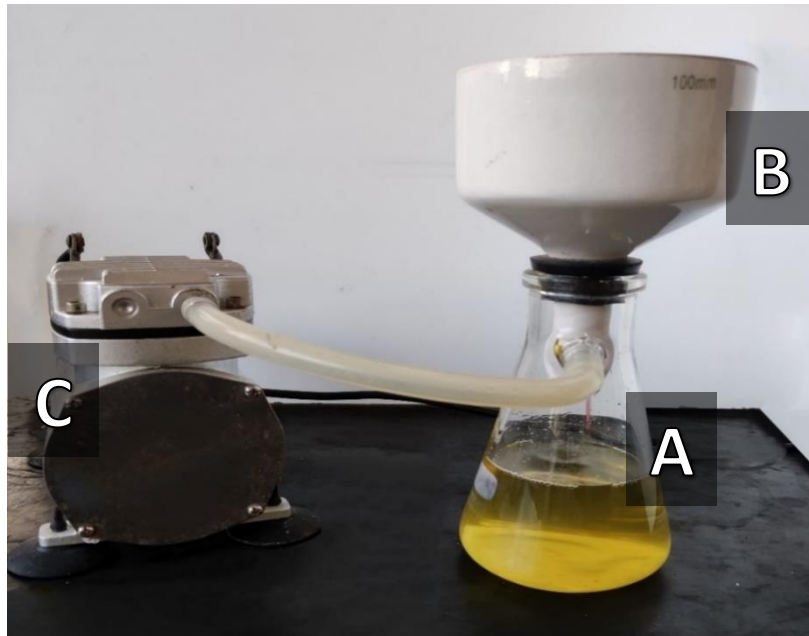
Para la preparación de una solución con una concentración 2,5 M de HCl, en primer lugar, en un matraz aforado se adiciono el HCl concentrado para luego enrazar con agua destilada, con un volumen de 450 mL de solución, con esta se procedió a lixiviar por duplicado una masa de concentrado de 20 g, esta se realizó a una razón líquido/sólido igual a 22,5/1 por un tiempo de 120 minutos a temperatura ambiente.

Las pruebas se realizaron en un vaso precipitado acorde al volumen utilizado en la prueba y se indujo agitación al sistema mediante un agitador electrónico como muestra la Figura 10.



**Figura 10.** Montaje pruebas de lixiviación de carbonatos con agitación.

Durante la prueba se produce un aumento de temperatura en la solución debido a que la reacción de solubilidad de TTRR es exotérmica, por lo anterior una vez transcurrido el tiempo de la prueba se dejó enfriar la solución por unos minutos. Posteriormente se efectuó el filtrado en un kit que consta de matraz Kitasato, embudo Erlenmeyer y papel filtro, mientras se aplica vacío para la separación del sólido que no disuelto, esto se muestra en la Figura 11. El residuo del proceso de lixiviación se puede observar en la Figura 12.



**Figura 11.** Montaje de filtración, compuesto por: Matraz Kitasato (A), Embudo Erlenmeyer (B) Bomba de vacío (C).



**Figura 12.** Residuo de lixiviación de carbonatos de tierras raras.

Finalmente, terminada la filtración, se midió el volumen de PLS obtenido y se extrajo una muestra de 100 mL del PLS obtenido para análisis posteriores. Además, posterior a un secado se midió la masa de residuo sólido no disuelto.

### 3.1.2 Pruebas de optimización

#### Descripción general de la prueba de lixiviación para la optimización

A partir de los resultados del consumo de HCl obtenido por las pruebas **C1 y C2**, se procedió a realizar diferentes pruebas para optimizar el proceso de lixiviación del concentrado estudiado, las cuales se realizaron variando concentraciones de HCl y la razón líquido-sólido. Para con ello posteriormente obtener datos de masa lixiviada, volumen de PLS obtenido, masa de sólido residual, temperatura de reacción y acidez del PLS obtenido.

En la Tabla 9 se presentan las condiciones a las cuales se realizaron estas pruebas, la totalidad de estas se realizó a temperatura ambiente, estas condiciones se establecieron con concentraciones cercanas al consumo anteriormente obtenido y a estimaciones de el pH de la solución resultante.

**Tabla 9: Condiciones experimentales de acidez de las diferentes pruebas.**

Prueba N°	Razón Líquido/Sólido [mL/g]	Relación respecto al consumo	Concentración de HCL (M)	Tiempo [Minutos]
1	10	50% exceso	2,40	120
2	10	25% exceso	1,99	120
3	10	10% exceso	1,77	120
4	10	5% exceso	1,69	120
5	20/3	5% exceso	2,53	120
6	5	50% exceso	4,80	120
7	5	5% exceso	3,37	120
8	5	0% exceso	3,21	120
9	5	5% déficit	3,05	120
10	5	10% déficit	2,89	120
11	5	15% déficit	2,73	120
12	5	20% déficit	2,57	120

13	5	50% déficit	1,60	120
14	3	5% exceso	4,21	120
15	3	50% exceso	5,62	120

El procedimiento mediante el cual se realizaron es el siguiente:

- 1) Se comenzó con la preparación de la solución, para ello se utilizó una probeta acorde al volumen total de la prueba, en primer lugar, se adiciono el volumen de HCl requerido y luego fue enrasado con agua destilada hasta el volumen total deseado. Posterior a ello se trasvasijo esta solución a un vaso precipitado para inducirle agitación para su homogenización.
- 2) Luego se toma una muestra de 25mL de la solución inicial para su posterior análisis en los frascos debidamente etiquetados.
- 3) Se masa el mineral requerido para la prueba, el cual luego es adicionado a la solución para su lixiviación.
- 4) Al comenzar a reaccionar el mineral en la solución se comenzó a medir la temperatura de la solución con el termómetro y se registró la máxima temperatura alcanzada en cada prueba.
- 5) Luego de alcanzar el tiempo de reacción deseado, se procedió a dejar enfriar la solución por unos minutos, para luego filtrar la solución en el kit de filtración mostrado en la Figura 11.
- 6) El sólido no disuelto depositado en el papel filtro es llevado a secado, para posteriormente registrar la masa obtenida. Y la solución obtenida es decir el PLS se le midió el volumen y se tomó una muestra para posteriores análisis.

Adicionalmente se realizaron pruebas para evaluar los tiempos de reacción de las pruebas y por ende la cinética de reacción, el procedimiento para estas pruebas consta de iguales pasos que los explicados anteriormente solo que los tiempos de reacción fueron variables, pero manteniendo constante volumen, la razón líquido-sólido y concentración de HCl.

### 3.1.3 Mediciones de pH

El procedimiento para la medición de pH se realizó acorde al fabricante del equipo, el cual se muestra en Figura 13 . El cual consistía en una previa de calibración del equipo con soluciones buffer a diferentes pH, posterior limpieza del electrodo con agua destilada y se procedió a introducir parcialmente el electrodo de medición al PLS, tal como se muestra en la imagen, y el valor es medido hasta estabilizar el valor de pH entregado.



Figura 13. Equipo utilizado para la medición de pH de los PLS obtenidos.

## 4. Resultados

Este capítulo se divide en seis secciones, las cuales corresponden a los resultados obtenidos en relación con el consumo de ácido clorhídrico en la lixiviación del mineral estudiado (Sección 4.1), pruebas de lixiviación en diferentes condiciones (Sección 4.2), optimización del pH (Sección 4.3), cinética de reacción (Sección 4.4) y el análisis de la concentración de las especies mediante análisis químico (Sección 4.5)

### 4.1 Determinación del consumo de ácido clorhídrico

A continuación, en la Tabla 10, se muestran los resultados de las pruebas C1 y C2, efectuadas para la determinación del consumo de ácido clorhídrico en la lixiviación del concentrado de carbonatos de tierras raras estudiado. En estas pruebas se pueden observar resultados bastante similares en las pruebas C1 y C2 con un consumo de 11,98 y 11,41 g de HCl respectivamente.

**Tabla 10: Condiciones y resultados de consumo de HCl a temperatura ambiente.**

Prueba	Concentrado (g)	Solución (mL)	Razón L/S (L/kg)	Concentración inicial (g HCl/L)	Concentración final (g HCl/L)	PLS (mL)	Consumo de HCl (g)
C1	20	425	21,75	75,20	45,40	440	11,98
C2	20	425	21,75	74,90	46,40	440	11,41

Con base en de los resultados expuestos en la Tabla 10 y cálculos simples se obtiene un consumo de 585 [g HCl/ kg Concentrado]. El valor obtenido se utilizó como referencia para evaluar diferentes condiciones en el proceso estudiado.

### 4.2 Pruebas de evaluación de la lixiviación

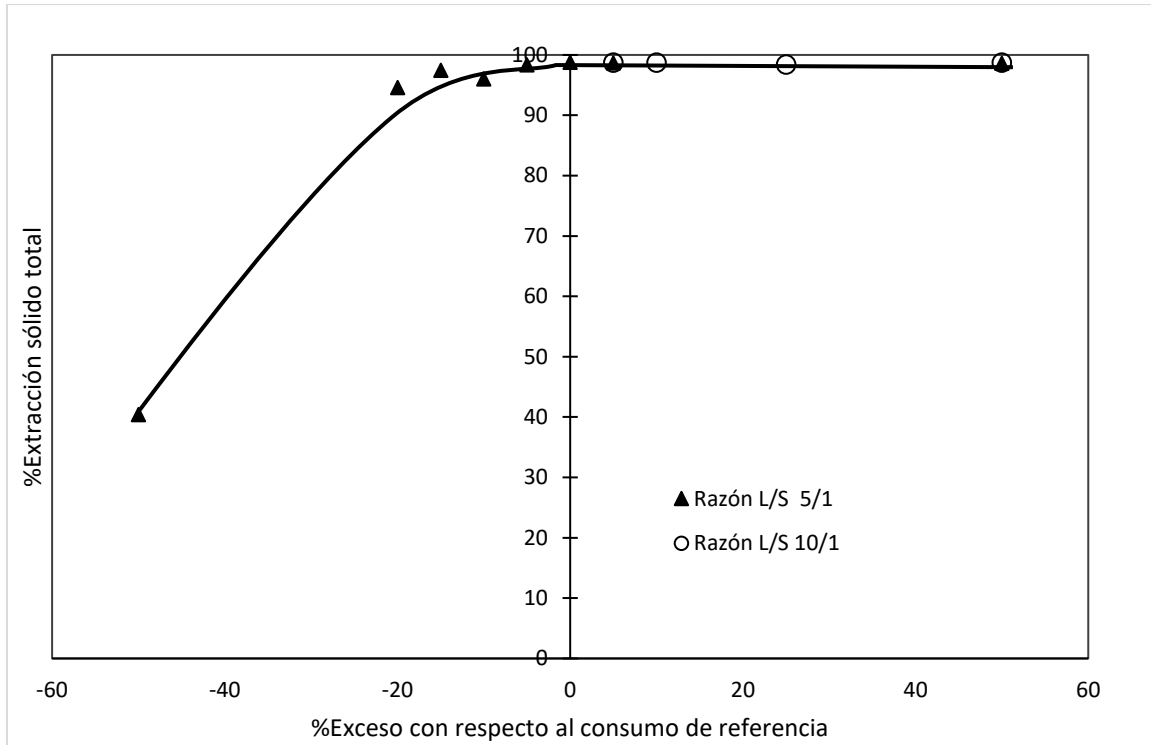
En base a los resultados de consumo de ácido obtenidos y con el fin de evaluar el proceso de lixiviación de carbonatos de tierras raras en diferentes condiciones, se realizaron pruebas variando tanto la concentración de ácido clorhídrico como la razón sólido-líquido, con lo que se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 11 y las Figuras 14 y 15, en estos es posible observar la masa residual obtenida en la prueba y el porcentaje de masa de concentrado lixiviada en cada prueba.

**Tabla 11: Condiciones y resultados de lixiviación a temperatura ambiente**

Prueba N°	Relación respecto al consumo	Razón L/S (L/kg)	Concentración de HCL (M)	Residuo (g)	% Masa lixiviada
1	50% exceso	10	2,40	0,32	98,71
2	25% exceso	10	1,99	0,40	98,41
3	10% exceso	10	1,77	0,32	98,72
4	5% exceso	10	1,69	0,32	98,72
5	5% exceso	20/3	2,53	0,36	98,80
6	50% exceso	5	4,80	0,79	98,60
7	5% exceso	5	3,37	0,33	98,68
8	0% exceso	5	3,21	0,30	98,80
9	5% déficit	5	3,05	0,41	98,36
10	10% déficit	5	2,89	0,99	96,04
11	15% déficit	5	2,73	0,64	97,44
12	20% déficit	5	2,57	1,36	94,56
13	50% déficit	5	1,60	14,9	40,40
14	5% exceso	3	4,21	0,72	98,72
15	50% exceso	3	5,62	0,80	98,00

En la Figura 14 se presenta el efecto del HCl expresado como exceso o déficit con respecto al consumo de HCl determinado en las pruebas preliminares (Tabla 10). En esta figura se puede ver que un exceso de HCl por sobre el consumo de referencia no hay cambio en la eficiencia de extracción, resultados que son similares para las dos razones L/S consideradas ( 5/1 y 10/1).

La tendencia observada en la Figura 14, también se puede ver observando la Tabla 11, por ejemplo, se ve que la variación porcentual es mínima comparando las pruebas 1 y 4 en el caso de una razón líquido-sólido de 10 y para el caso de una razón líquido-sólido de 5 comparando las pruebas 6, 7 y 8 también es mínima. Por consiguiente, se puede afirmar que no es relevante el exceso de HCl para pruebas posteriores.

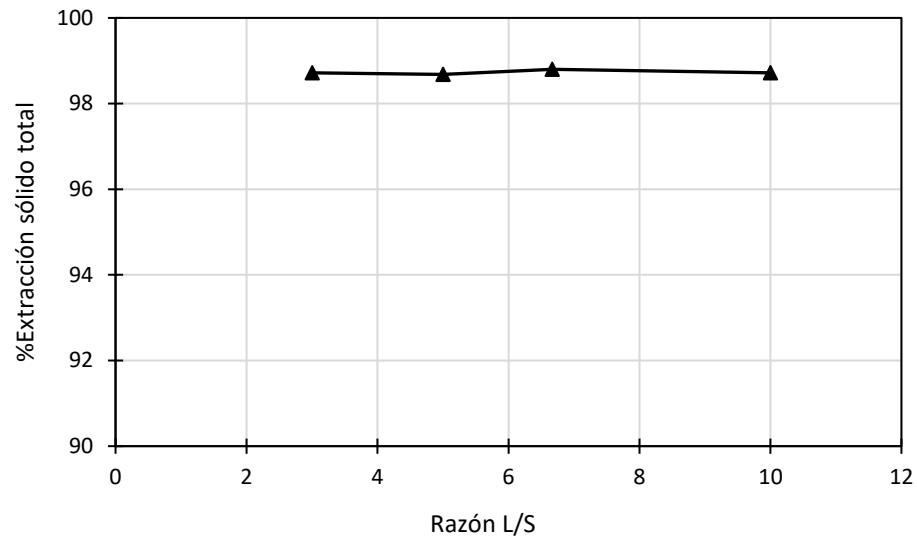


**Figura 14. Efecto del exceso de ácido con respecto al consumo de HCl de referencia (585 kg/t concentrado)**

En el caso de las pruebas realizadas con dosificaciones de ácido menores al consumo de HCl (pruebas 9 a 13) se observa que la relación de esta con la masa lixiviada no es directamente proporcional como se esperaría, sino que hasta un déficit de un 20% la diferencia porcentual en la masa lixiviada es mínima, pero al trabajar con una dosificación igual a la mitad del consumo de referencia la diferencia se hace mayor, disminuyendo a un 40% de extracción de la masa de concentrado lixiviada. Esto se debe a los equilibrios de las complejas reacciones que ocurren en el proceso. Entre estas principalmente están las reacciones (1) y (3) presentadas en la sección 2.2.2, junto con las diferentes reacciones de disolución de impurezas solubles con HCl.

En la Figura 15 se muestra el efecto de la razón L/S en pruebas en que se mantuvo constante la dosificación de HCl e igual a un 5% de exceso con respecto al consumo de HCl de referencia. En esta figura se observa que la extracción se mantiene prácticamente constante en todo el rango de razón L/S evaluado, por lo que se deduce que la disolución de los compuestos de tierras raras solo depende de la cantidad de ácido y no de la concentración. Sin embargo, es relevante tener en cuenta que al trabajar a razones líquido-sólido inferiores a 5/1 se dificulta la separación sólido-líquido mediante el

filtrado utilizado en el laboratorio (Figura 11). Esto se debe a que se llega a zonas de saturación en que debe comenzar a cristalizar alguna o algunas sales de cloruro de tierras raras.



**Figura 15.** Efecto de la razón líquido/sólido en la extracción con una dosificación de ácido equivalente al exceso del 5% con respecto al consumo de referencia (585 kg/t concentrado)

### 4.3 Optimización para el pH del PLS

En la Tabla 12 se observan resultados en las mediciones de acidez realizadas a las soluciones obtenidas en las pruebas para la evaluación de la lixiviación, para las razones líquido/sólido 10 y 5. Adicionalmente se realizó la medición a las soluciones obtenidas de la lixiviación en pruebas realizadas con concentraciones de HCl diferentes con el objetivo de obtener un PLS con un pH cercano a 0,8.

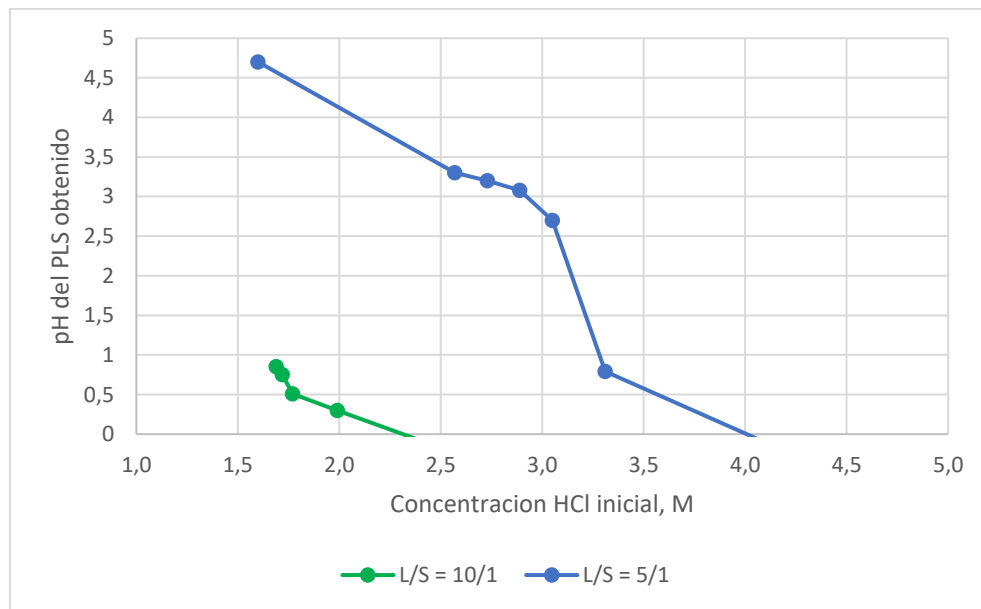
**Tabla 12: Condiciones y resultados de pH de PLS.**

Razón L/S	Concentración de HCL inicial (M)	Relación respecto al consumo	pH final
10	2,40	50% exceso	< 0
10	1,99	25% exceso	0,30
10	1,77	10% exceso	0,51
10	1,72	7% exceso	0,75
10	1,69	5% exceso	0,85
5	4.80	50% exceso	< 0
5	3.37	5% exceso	< 0
5	3.31	3% exceso	0,79
5	3.21	estequiométrico	-
5	3.05	5% déficit	2,70
5	2.89	10% déficit	3,08
5	2.73	15% déficit	3,20
5	2.57	20% déficit	3,30
5	1.60	50% déficit	4,70

A partir de los datos presentados en la Tabla 12 se obtuvo la gráfica presentada en la Figura 16, en la cual se observa gráficamente los valores de pH obtenidos en las diferentes pruebas. En base a lo anterior se puede notar que al realizar la lixiviación con una solución de 1,72 M de HCl aproximadamente (correspondiente a un 7% de exceso respecto al consumo de referencia) y una razón líquido-sólido igual a 10 se obtiene un PLS con un pH de 0,8, el cual es la condición de acidez

deseada para procesos posteriores y para el caso de una razón líquido-sólido igual a 5 se requiere una solución de 3,31 M de HCl (correspondiente a un 3% de exceso respecto al consumo de referencia) para obtener una solución con un pH igual a 0,79.

En base a los datos obtenidos en las pruebas de lixiviación a diferentes condiciones, es posible afirmar que el trabajar a estas concentraciones de HCl para obtener un PLS a pH óptimo no representaría una dificultad ya que estaría sobre el valor de consumo y no afectaría la eficacia del proceso.



**Figura 16.** pH del PLS obtenido en ensayos a razones líquido-sólido igual a 10 y a 5.

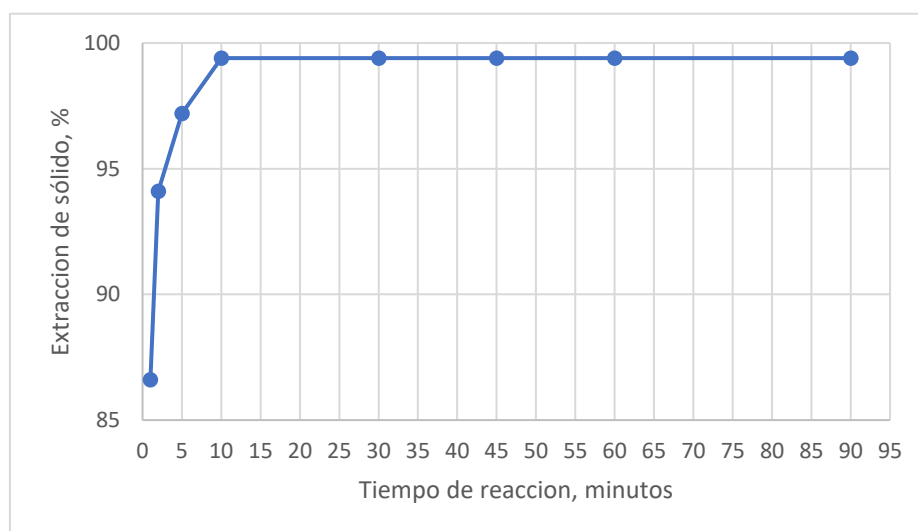
Adicionalmente, es importante tener en cuenta que es posible ajustar el pH mediante la adición de ácido o una solución básica dependiendo el caso, sin embargo, esto podría producir precipitación de elementos de interés o podría significar un consumo de un reactivo básico que se pudo evitar si no se hubiese agregado el exceso de ácido. En este caso, el óptimo es obtener un PLS que tenga el pH adecuado para alimentar a SX para evitar el consumo de reactivo por ajuste de pH.

#### 4.4 Cinética de la reacción

Con el fin de conocer la cinética de la reacción de disolución del concentrado de tierras raras se realizaron pruebas a diferentes tiempos de reacción comprendidos entre 1 y 90 minutos, las condiciones a las cuales se realizó la prueba son a una razón líquido-sólido igual a 10, temperatura ambiente y con una concentración de HCl igual a la obtenida en la optimización del pH es decir de 1,72 M, a partir de lo anterior se obtienen los resultados presentados en la Tabla 13 y gráficamente en la Figura 17.

**Tabla 13: Condiciones y resultados de lixiviación a temperatura ambiente.**

Tiempo (m)	Concentrado (g)	solución (mL)	Concentración HCl sol. Inicial (M)	Concentración HCl PLS (M)	Residuo (g)	Extracción %
1	10	100	1,72	1,15	1,34	86,60
2	10	100	1,72	0,87	0,59	94,10
5	10	100	1,72	0,82	0,28	97,20
10	10	100	1,72	0,59	0,06	99,40
30	10	100	1,72	0,54	0,06	99,40
45	10	100	1,72	0,39	0,06	99,40
60	10	100	1,72	0,52	0,06	99,40
90	10	100	1,72	0,52	0,06	99,40



**Figura 17. Porcentaje de extracción sólido en función del tiempo a temperatura ambiente, una razón L/S de 10/1 y 1.72 M de HCl inicial.**

A partir de los anteriores datos se puede concluir que para las condiciones estudiadas la cinética de lixiviación de tierras raras en medio HCl es relativamente rápida dado que a los 10 minutos ya se alcanza el máximo de masa lixiviada que corresponde a un 99,40% del concentrado de carbonatos de tierras raras en las condiciones estudiadas. Además, que para estas condiciones se obtiene un PLS con una acidez óptima para las etapas siguientes que se desean implementar.

## 4.5 Resultados análisis químicos

Con el fin de estudiar la disolución y concentración de los diferentes elementos de tierras raras en el PLS se envió un total de 7 muestras a análisis químicos, mediante la técnica de ICP-MS (Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente), estos fueron realizados en Activation Geological Services, se obtuvieron los datos con respecto a las concentraciones de especies presentes de TTRR y de impurezas. Las muestras analizadas se encuentran identificadas en la Tabla 14. Tal como se observa dos de estas fueron a razón líquido-sólido igual a 10, una muestra a razón 20/3, dos a razón igual a 5, una muestra a razón igual a 4 y una muestra a razón igual 3. En cuatro de ellas se evalúan pequeños excesos de HCl, en una muestra un gran déficit con el fin de evaluar si el HCl presenta predilección por los elementos de tierras raras y una muestra con una acidez mayor a la requerida para evaluar si esto presenta algún beneficio para en el proceso estudiado.

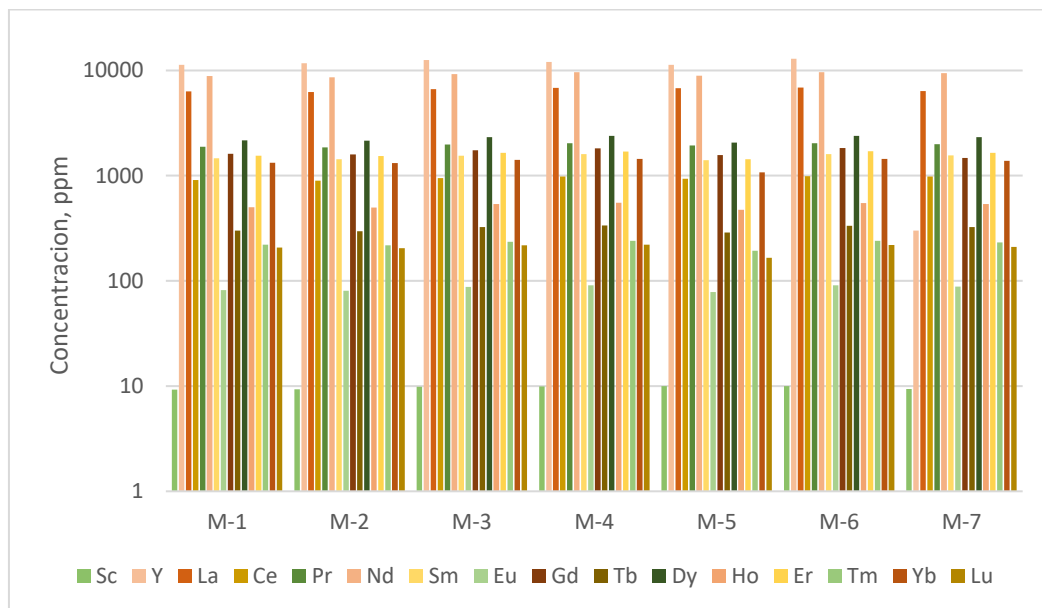
**Tabla 14: Detalle y condiciones de las muestras analizadas.**

Muestra	Razón L/S	Relación con el consumo	Concentración de HCL (M)	Extracción %
1	10	25% exceso	1,99	98,41
2	10	5% exceso	1,69	98,72
3	20/3	5% exceso	2,53	98,80
4	5	0% exceso	3,21	98,80
5	5	-50% déficit	1,60	40,40
6	4	5% exceso	4,21	98,72
7	3	5% exceso	5,62	98,00

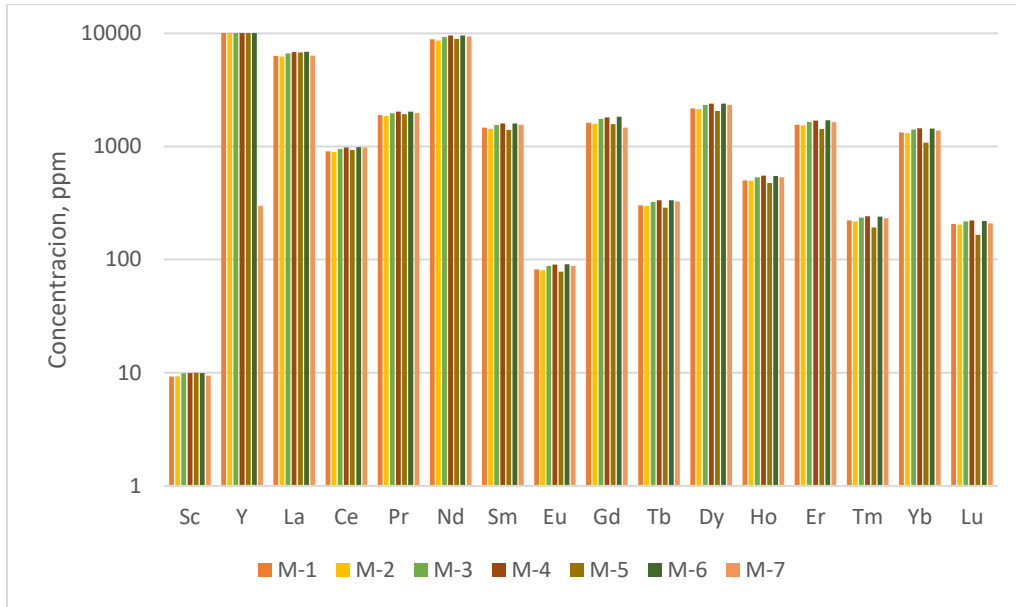
En la Figura 18 y la Figura 19 se pueden observar las concentraciones de los elementos de tierras raras en las 7 muestras analizadas, en la Figura 19 es posible observar altas concentraciones de Itrio (Y), neodimio (Nd) y lantano (La), y concentraciones bajas de escandio (Sc) y Europio (Eu). Y en la Figura 18 también es posible observar que como era de esperar para razones líquido-sólido más bajas se obtienen concentraciones más altas en las especies de interés casi proporcionales a razón líquido-sólido de la muestra, a excepción del itrio para la muestra 7.

Además, es posible observar a primera vista que a partir de las muestras 1 y 2 que no es requerido un exceso significativo de ácido clorhídrico ya que en el caso de 5% y 50% de exceso las concentraciones obtenidas de los elementos de interés son prácticamente las mismas como se muestra en la Figura 20.

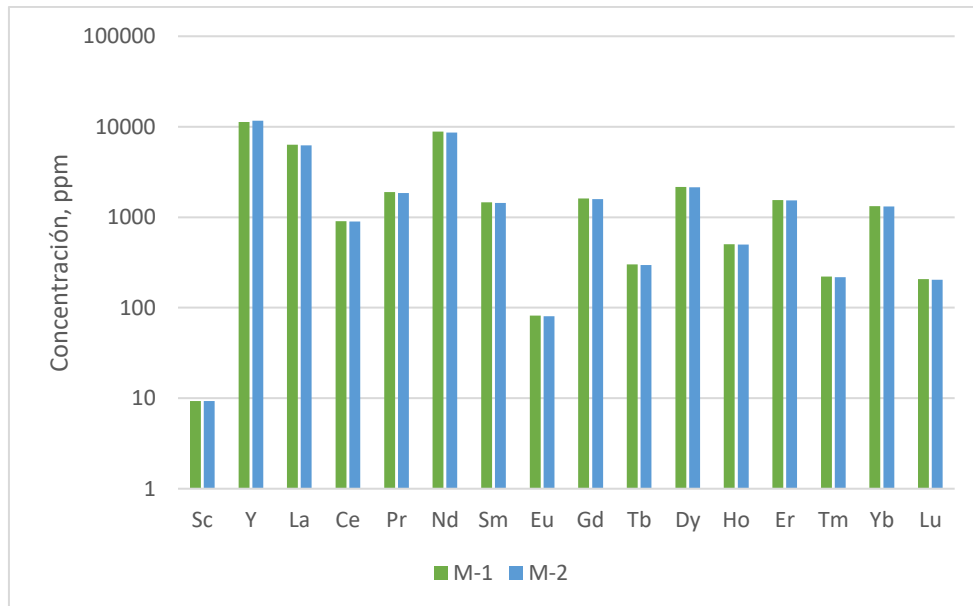
Al estudiar los resultados del análisis de las pruebas 4 y 5 (Figura 21), se tiene que el déficit de HCl produce una disminución de la concentración de las especies, pero esta no es proporcional a la razón de disminución de la concentración mostrando una pequeña predilección por los elementos de interés.



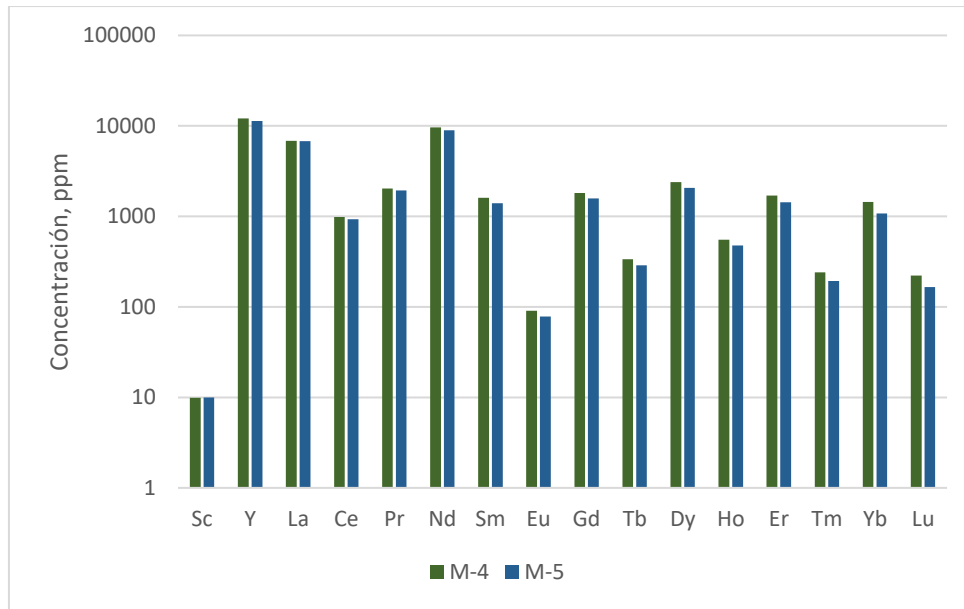
**Figura 18. Concentración de los elementos de tierras raras, visualizada para las 7 muestras caracterizadas en la Tabla 14.**



**Figura 19. Concentración de los elementos de tierras raras, visualizada por elemento para las 7 muestras caracterizadas en la Tabla 14.**



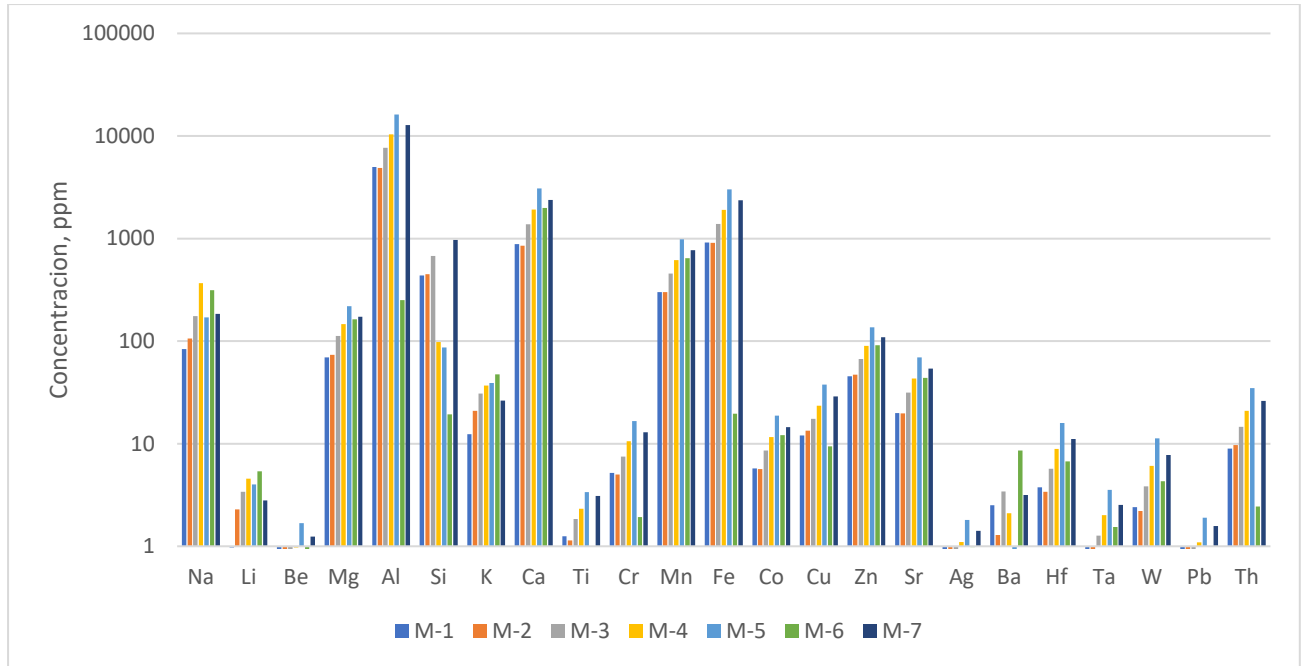
**Figura 20. Concentración de los elementos de tierras raras para las muestras 1 y 2, obtenidas a razón L/S igual a 10/1 y con una concentración de HCl igual a un 25% y 50% de exceso respectivamente.**



**Figura 21. Concentración de los elementos de tierras raras para las muestras 4 y 5, obtenidas a razón L/S igual a 5/1 y con una concentración de HCl estequiométrica y un 50% de déficit respectivamente.**

Para el caso de las impurezas presentes en PLS generado, a partir de los datos obtenidos, se elaboró la Figura 22 la cual muestra las concentraciones de las impurezas disueltas en el PLS para las 7 muestras, en ella es posible observar que las principales son el aluminio, hierro, calcio, silicio, manganeso, sodio, magnesio y el zinc.

Por lo que es posible observar, en primera instancia las concentraciones obtenidas al igual que para los elementos de tierras raras son proporcionales a su razón líquido-sólido en la mayoría de los casos. Analizando los datos obtenidos para los metales pesados en las muestras analizadas todos están bajo los 1000  $\mu\text{g/L}$  (1 ppm) de concentración y algunos incluso se encontraban bajo la concentración detectable. Y para el caso del uranio el cual es importante en los procesos de tierras raras igual presenta concentraciones bajo los 800  $\mu\text{g/L}$ , lo cual es un beneficio común para el tipo de yacimiento del caso de estudio.



**Figura 22. Concentraciones de las principales impurezas de las muestras.**

#### 4.5.1 Análisis de elementos de tierras raras

A partir de las concentraciones obtenidas en los análisis realizados a las muestras tomadas y conociendo los volúmenes y masas utilizadas en las pruebas estudiadas, además considerando como referencia análisis químicos anteriores (Tabla 7) al concentrado de carbonatos utilizado (a excepción del escandio, (Sc)) se puede obtener valores de la masa de los elementos lixiviada mediante cálculos simples, obtenidos con la fórmula 7, con los cuales se obtuvo la Figura 23 en donde en general se puede observar la lixiviación de gran parte de los elementos de interés en las muestras analizadas. En los resultados se observan algunos valores mayores a 100% lo cual puede deberse a la representatividad de la muestra de cabeza analizada y al error en el análisis químico. En cualquier caso, se comprueba que hay una disolución prácticamente completa de todos los elementos de tierras raras. Para comparar los datos concentración del Escandio, se utilizó como referencia el dato de mayor concentración obtenida en las muestras analizadas, que este caso corresponde a la muestra 5 y 6.

$$\%Lix = \frac{c_m \times R_{L/s} \times m_{ref}}{V_{ref} \times c_{ref}} * 100\% \quad (7)$$

En donde:

$c_m$ : Concentración del elemento en la muestra.

$c_{ref}$ : Concentración del elemento de referencia en el concentrado.

$m_m$ : masa de concentrado en la prueba de la muestra.

$m_{ref}$ : masa de referencia (1 kg).

$R_{L/s}$ : razón líquido sólido en la prueba de la muestra.

En específico para los elementos de La, Ce, Pr, Nd, Sm y Eu en las 7 muestras analizadas es posible asumir una solubilidad total de la masa de los elementos lixiviada, estos elementos conforman el grupo de las tierras raras livianas (LREE). En el caso de los demás elementos de interés los resultados son variados para las muestras analizadas, es posible observar resultados más bajos para los elementos de gadolinio, itrio y tulio.



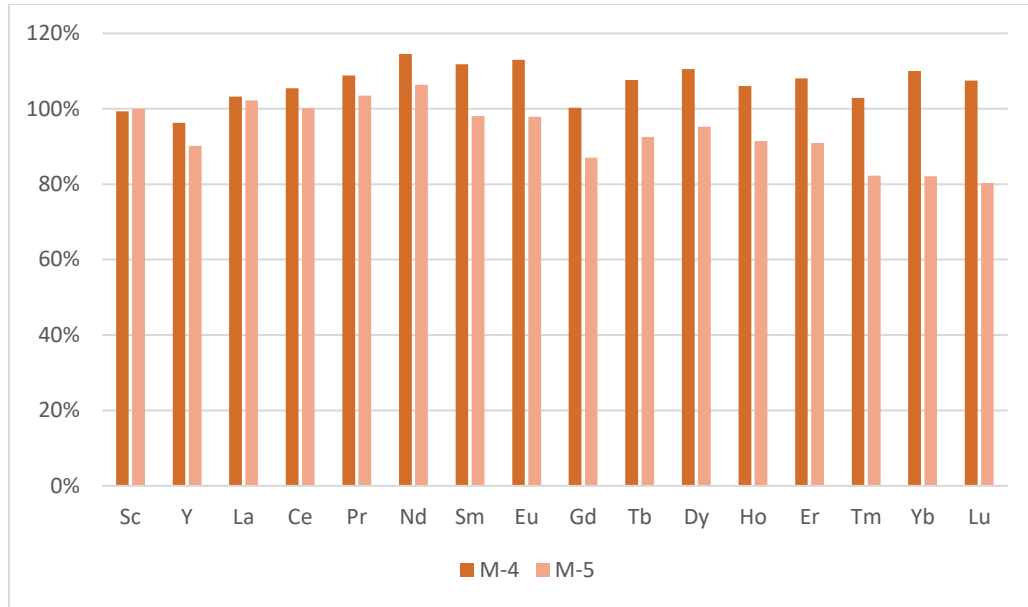
**Figura 23. Grado de REE lixiviado en las muestras analizadas en base al concentrado.**

Al comparar las muestras 1 y 2, debido a que ambas se obtuvieron de pruebas realizadas a razones líquido-sólido igual a 10, en donde la muestra 1 se obtuvo de una prueba con un 25% de exceso de HCl y la muestra 2 de una con un 5% de exceso de HCl, como muestra la Figura 24, las concentraciones solo presentan unas pequeñas diferencias porcentuales menores a un 3 % a favor de la muestra 1 con excepción del caso del elemento Y el cual es un 3% mayor para la muestra 2. En base a ello es posible establecer que un exceso mayor al 5% a la razón sólido líquido 10 no traería beneficios al proceso de lixiviación estudiado, dado que la diferencia porcentual promedio es de 1 %, la cual es poco significativa y no es posible atribuirle únicamente al exceso en la concentración de HCl, sino que también puede deberse a heterogeneidad en el concentrado, errores asociados a las mediciones u otros factores.



**Figura 24. Comparación en eficacia de lixiviación de REE en las muestras 1 y 2 obtenidos a razón líquido sólido igual a 10 (M-1 con 25% exceso HCl y M-2 con 5% exceso HCl).**

En el caso de las muestras 4 y 5, que se comparan en la gráfica de la Figura 25, donde ambas muestras se obtuvieron en pruebas a razón sólido líquido igual a 5 pero la muestra 4 a una concentración de HCl estequiométrica y la muestra 5 a un déficit de HCl de un 50%. Al comparar las muestras se obtiene en promedio valores un 15% mayor en la muestra 4 en la solubilidad de elementos de tierras raras. Al comparar el caso a caso por elemento se puede identificar una tendencia que para el caso de las tierras raras livianas (LREE) los valores son semejantes y es posible decir que en ambas pruebas estas se disolvieron completamente, en el caso de los elementos de tierras raras pesadas (HREE) solo en el caso de la muestra 4 se alcanza una solubilidad total de los elementos y los valores de la muestra 5 son en promedio un 20% menores para estos elementos. De lo anterior se puede observar que las diferencias porcentuales de los elementos de tierras raras en general no presentan una diferencia notable o proporcional a la concentración de HCl de las pruebas en que se obtuvo las muestras analizadas, lo que indicaría una predilección por los elementos de tierras raras sobre otros elementos en el medio HCl. Además, existe una predilección de los LREE sobre los HREE de acuerdo con la comparación de los datos obtenidos.



**Figura 25. Comparación en eficacia de lixiviación de REE en las muestras 4 y 5 obtenidos a razón líquido sólido igual a 5 (M-4 con HCl del consumo de referencia y M-5 con 50% de déficit de HCl).**

#### 4.5.2 Comportamiento de las impurezas

En la Tabla 15 se expresa la concentración promedio de las impurezas de los PLS analizados. Notar que las impurezas que presentan una mayor concentración en la mayoría de las pruebas analizadas corresponden a Al, Ca, Fe, Si y Mn, en orden decreciente.

Otro punto importante en el proceso por razones medioambientales y de salud es la concentración de elementos radiactivos como el uranio, pero tal como se muestra en los datos obtenidos se tienen concentraciones mínimas, bajo 1 ppm, por lo cual no afectaría el proceso ni el entorno donde se pudiese desarrollar este.

**Tabla 15:** Concentración promedio de las impurezas para las muestras analizadas.

Na	199,8 ppm	Cu	20,4 ppm
Li	3,3 ppm	Zn	83,7 ppm
Be	0,8 ppm	Sr	40,2 ppm
Mg	136,6 ppm	Zr	0,5 ppm
Al	8142,7 ppm	Ag	1,0 ppm
Si	390,8 ppm	Ba	3,0 ppm
K	30,6 ppm	Hf	7,9 ppm
Ca	1779,0 ppm	Ta	1,8 ppm
Ti	2,2 ppm	W	5,4 ppm
Cr	8,5 ppm	Pb	0,9 ppm
Mn	581,1 ppm	Th	16,8 ppm
Fe	1500,4 ppm	U	0,4 ppm
Co	11,0 ppm		

A partir de lo anterior, las concentraciones de las principales impurezas se presentan en la Figura 26 y la Figura 27, visualizadas por elemento y muestra respectivamente, en ellas es posible observar que la principal impureza disuelta en las muestras es el aluminio con concentraciones entre 16.000 y 4.900 ppm, a excepción del caso de la muestra 5, donde, el principal es el calcio con una concentración cercana a los 1.900 ppm para cada elemento. Luego las concentraciones de calcio y hierro son bastante semejantes para la mayoría de las muestras entre los 3.000 y 900 ppm para la mayoría de las muestras, estos elementos pueden causar inconvenientes en la etapa de extracción

por solventes por su alto grado de extracción por los agentes comúnmente utilizados, no obstante, esto podría ser evitado mediante la remoción de impurezas en una etapa previa. Notar que en el caso de la muestra 5, la cual se obtuvo en una prueba con un déficit de HCl, las concentraciones de Fe y Al son mucho menores que en las otras, esto debido a que el pH final de la solución es cercano a 4,7, por lo cual el hierro precipita como hidróxido férrico  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  a un pH mayor a 2,2 y el aluminio a la forma de hidróxido de aluminio  $\text{Al}(\text{OH})_3$  a un pH mayor a 4,5.

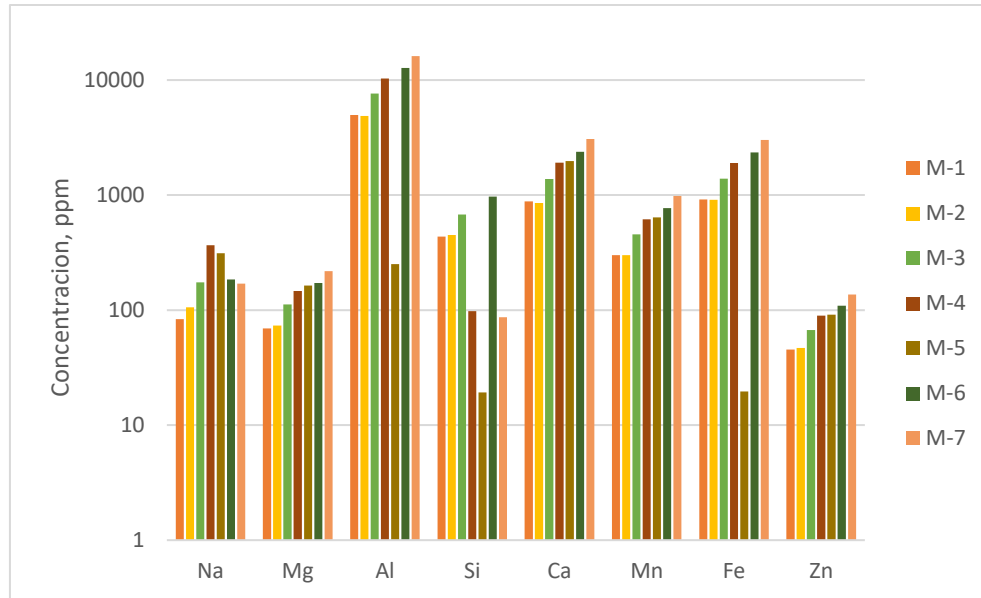


Figura 26. Concentraciones de las principales impurezas, visualizadas por elemento.

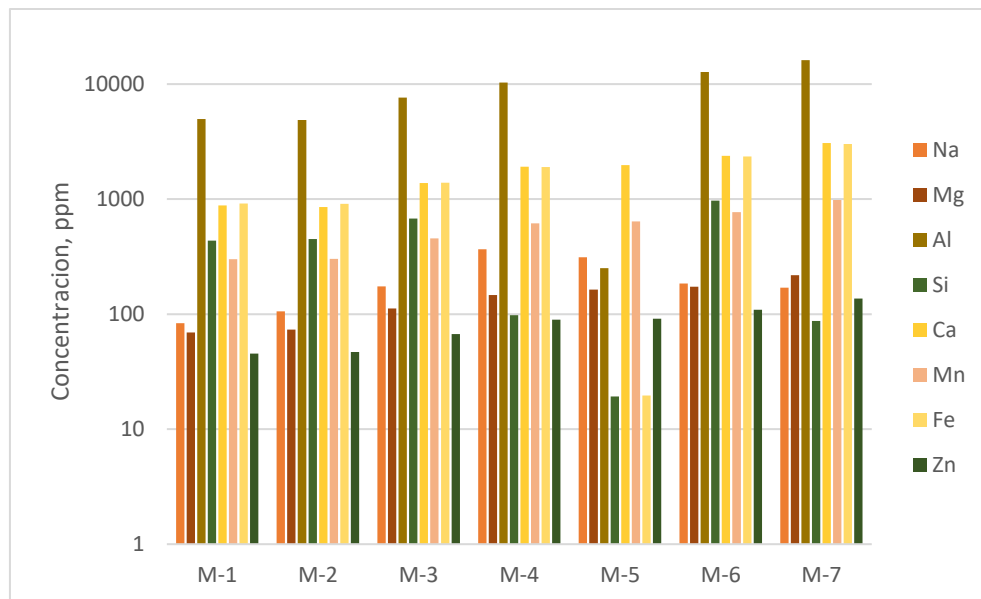


Figura 27. Concentraciones de las principales impurezas, visualizadas por muestra.

## 5. Conclusiones

- Para el concentrado de tierras raras estudiado en la etapa de lixiviación se estimó un consumo aproximado de 585 [kg HCl/ t Concentrado] o lo que es equivalente a unos de 16,05 mol HCl/ kg Concentrado para lograr la extracción global máxima del concentrado.
- Se determinó que la extracción de las tierras raras desde el concentrado depende solo de la cantidad de ácido y la razón líquido/sólido se debe definir de tal forma de no sobresaturar la solución y que el PLS obtenido tenga un pH lo más cercano posible al requerido en la etapa siguiente de extracción por solvente.
- En las pruebas a diferentes razones líquido-sólido se logró evidenciar que un exceso respecto a la concentración de consumo de HCl en la solución no presenta beneficios al proceso respecto a la masa lixiviada, debido a que la masa de residuo no se veía disminuida por ello.
- Para las razones líquido sólido igual a 5/1 y 10/1, fue posible encontrar concentraciones de ácido clorhídrico óptimas en el proceso, que corresponderían a 1,72 mol HCl/L y 3,31 mol HCl/L respectivamente, y con las cuales se obtiene un PLS de pH igual a 0,8. En dichas condiciones no se ve afectada la masa lixiviada por lo cual no representaría problemas para el proceso y es el pH adecuado para la etapa posterior de SX, evitando el consumo de reactivo si se tuviera que ajustar dicho pH.
- En pruebas con déficit de HCl con respecto al consumo de 585 kg/t de concentrado, se comprobó que hay una lixiviación preferencial de los elementos de tierras raras con respecto de las impurezas y dentro de las tierras raras, se lixivian con más preferencia las tierras raras livianas.
- A una razón líquido-sólido igual a 10/1 se evaluó la cinética del proceso, consiguiendo resultados bastante alentadores ya que a los 10 minutos se alcanzó la máxima disolución de masa que corresponde a un 99,40%. Esto indica una cinética rápida de la disolución de los elementos del concentrado en el medio HCl, por ende, a escala productiva esto permitiría operar a flujos altos o en equipos más pequeños.
- Los elementos de tierras raras con mayores concentraciones en los PLS analizados fueron el Y, Nd y La, estos junto al Cerio son los REE más abundantes en la corteza terrestre. Y los que presentaron menores concentraciones fueron Sc, Eu, Lu y Tm.

- En todos los elementos de tierras raras se obtuvo altas eficacias de disolución en medio HCl, incluso en la mayor parte de los elementos se puede considerar una disolución total de estos en las condiciones analizadas.
- Las principales impurezas en el PLS de las pruebas fueron el Al con cerca de 50.000 ppm, Ca con cerca de 9.200 ppm, Fe con cerca de 9.000 ppm y el Mn con cerca de 3000 ppm. Elementos de metales pesados y radioactivos solo se detectaron en pequeñas concentraciones, las cuales no son perjudiciales con el proceso.

## 6. Bibliografía

- Aclara Resources. (Diciembre de 2023). *Aclara*. Obtenido de <https://www.aclara-re.com/>
- Avendaño Corvalán, P. J. (2017). Evaluación de factibilidad técnico-ambiental de una planta de extracción de tierras raras en Chile. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/150686>
- Castor, S., & Hedrick, J. (2006). Rare Earth Elements. *Industrial Minerals Volume*, 769-792.
- Chakhmouradian, A. R., & Zaitsev, A. N. (2012). Rare earth mineralization in igneous rocks: sources and processes. *Elements*.
- Chi, R. (1989). Extraction of rare earths from a low-grade, kaolinitic ore by percolation leaching. *Rare Earths: Extraction, Preparation and Applications*, 227-234.
- Cochilco. (2016). *Situación actual del mercado de tierras raras y su potencial en Chile*.
- Domic Mihovilovic, E. (2001). *Hidrometalurgia: fundamentos, procesos y aplicaciones*.
- Fu, S. (2009). Rare earth extraction technologies. *Metallurgical industry publishing*, 55-57.
- Gupta, C., & Krishnamurthy, N. (2005). *Extractive Metallurgy of Rare Earths*. Boca Raton: CRC PRESS.
- Hanchar, J., & Westrenen, W. (2007). Rare Earth Element Behavior in Zircon-Melt System. *Elements*, 37-42.
- Kuzmin, V., Pashkov, G., Lomaev, V., & Voskresenskaya, E. a. (2012). Combined approaches for comprehensive processing of rare earth metal ores. *Hydrometallurgy*, 129-130.
- Merritt, R. (1990). High temperature methods for processing monazite: I. Reaction with calcium chloride and calcium carbonate. *J. Common Met.*, vol. 166, 197–210.
- Moldoveanu, G. A., & Papangelakis, V. G. (2013). Recovery of rare earth elements adsorbed on clay minerals: II. *Hydrometallurgy*, 131–132,158–166.
- Moldoveanu, G. A., & Papangelakis, V. G. (2013). *Tantalus Report January*. Toronto: University of Toronto.

- Peelman, S., Sun, Z. H., Sietsma, J., & Yang, Y. (2016). Leaching of Rare Earth Elements: Review of Past and Present Technologies. *Rare Earths Industry*, 319-334.
- Roskill. (2021). *Rare Earths: Outlook to 2030. Twentieth Edition*. Londres.
- Ruiz, M. C. (2020). *HIDROMETALURGIA*. Concepción: Universidad de Concepción.
- Sanematsu, K., Kon, Y., Imai, A., Watanabe, K., & Watanabe, Y. (2013). Geochemical and mineralogical characteristics of ion-adsorption type REE mineralization in Phuket, Thailand. *Mineralium Deposita*, 437-451.
- The United States Geological Survey. (02 de Diciembre de 2023). Obtenido de USGS: <https://www.usgs.gov/news/national-news-release/us-geological-survey-releases-2022-list-critical-minerals>
- Tran, T. (1991). New developments in the processing of rare earths. *Materials Science Forum Vol. 70*, 337 - 354.
- U.S. Geological Survey. (2023). *MINERAL COMMODITY SUMMARIES 2023*. Reston, Virginia.
- USGS. (2002). *Rare Earth Elements: Critical Resources for High Technology*. United States.
- Vaughan, J., Gontijo, V. L., Valenta, R., & Alonso, E. (2023). Rare earth element sources, end-use demand trends, and hydrometallurgical separations. *26th World Mining Congress (WRC 2023)*, (págs. 713-723). Brisbane, Australia.
- Velde, B. B., & Meunier, A. (2008). The origin of clay minerals in soils and weathered rocks. *Springer Science & Business Media*.
- Xie, F., Zhang, T. A., Dreisinger, D., & Doyle, F. (2014). A critical review on solvent extraction of rare earths from aqueous solutions. *Minerals Engineering Vol 56*, 10-28.
- Zepf, V. (2013). *Rare Earth Elements*. Berlin: Springer.
- Zhang, J., Zhao, B., & Schreiner, B. (2016). Mechanical Separation Hydrometallurgy of Rare Earth Elements. *Rare Earth Solvent Extraction Systems*, 79 - 102.

Zhang, J., Zhao, B., & Schreiner, B. (2016). *Separation Hydrometallurgy of Rare Earth Elements*. Saskatoon: Springer.

Zhao, J., Tang, X., & Wu, C. (2001). Status of mining and recovering technologies for ion-adsorbed rare earth deposits in China. *Yunnan Metallurgy*, 9-13.

## 7. Anexos

### 7.1. Resultados análisis químicos generales

**Tabla 16:** Concentraciones de los LREE en las muestras analizadas, expresadas en mg/L.

	<i>Sc</i>	<i>La</i>	<i>Ce</i>	<i>Pr</i>	<i>Nd</i>	<i>Sm</i>	<i>Eu</i>
<i>Muestra-1</i>	92,7	63237,3	9068,4	18900,6	88702,6	14647,7	819,2
<i>Muestra-2</i>	93,3	62423,8	8953,2	18528,1	86189,3	14336,7	803,8
<i>Muestra-3</i>	98,5	66451,5	9514,0	19748,4	92628,2	15465,0	878,8
<i>Muestra-4</i>	99,3	68535,7	9813,3	20320,4	96077,4	15982,5	905,5
<i>Muestra-5</i>	7,3	67878,2	9324,4	19315,8	89211,5	14015,0	784,2
<i>Muestra-6</i>	99,6	68708,3	9897,3	20314,7	96135,4	15994,0	909,5
<i>Muestra-7</i>	94,1	63644,0	9794,0	19857,4	94211,2	15580,5	882,1

**Tabla 17:** Concentraciones de los HREE en las muestras analizadas, expresadas en mg/L.

	<i>Gd</i>	<i>Tb</i>	<i>Dy</i>	<i>Ho</i>	<i>Er</i>	<i>Tm</i>	<i>Yb</i>	<i>Lu</i>
<i>Muestra-1</i>	16173,7	3014,6	21679,9	5013,1	15524,8	2215,6	13298,5	2067,1
<i>Muestra-2</i>	15895,8	2972,6	21447,9	4984,9	15340,8	2181,2	13184,7	2038,1
<i>Muestra-3</i>	17458,8	3239,8	23265,1	5360,8	16517,7	2351,8	14150,0	2178,2
<i>Muestra-4</i>	18140,4	3354,3	23970,9	5514,9	16997,6	2409,3	14457,6	2214,4
<i>Muestra-5</i>	15743,0	3345,5	23878,6	5501,2	17033,3	2404,5	14420,8	2188,2
<i>Muestra-6</i>	18333,0	3253,7	23257,6	5358,1	16454,0	2319,2	13850,3	2096,0
<i>Muestra-7</i>	14718,5	2884,0	20647,2	4753,6	14297,3	1926,9	10789,3	1653,8

## 7.2 Resultados análisis químicos por elementos

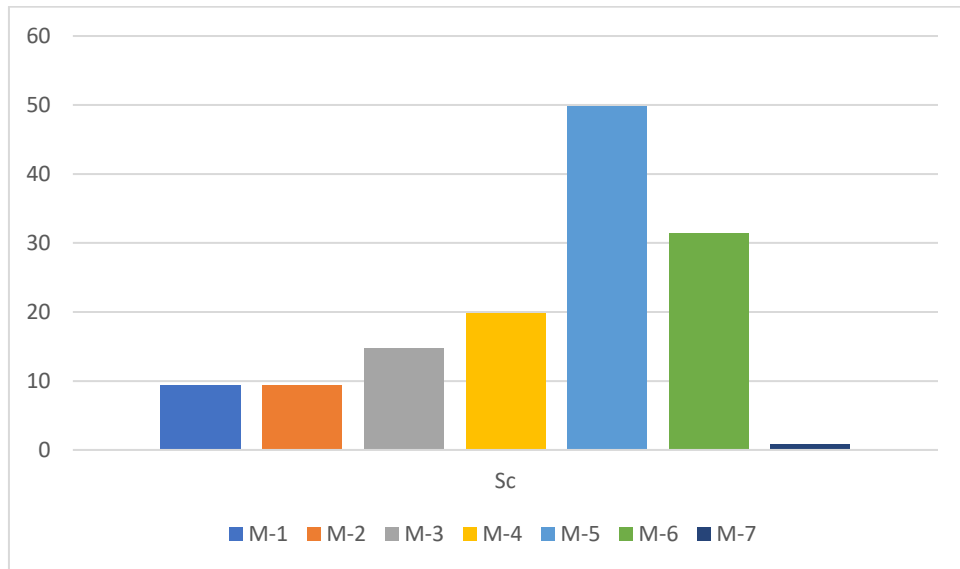


Figura 28. Concentración del elemento escandio en las 7 muestras analizadas, expresadas en mg/L.

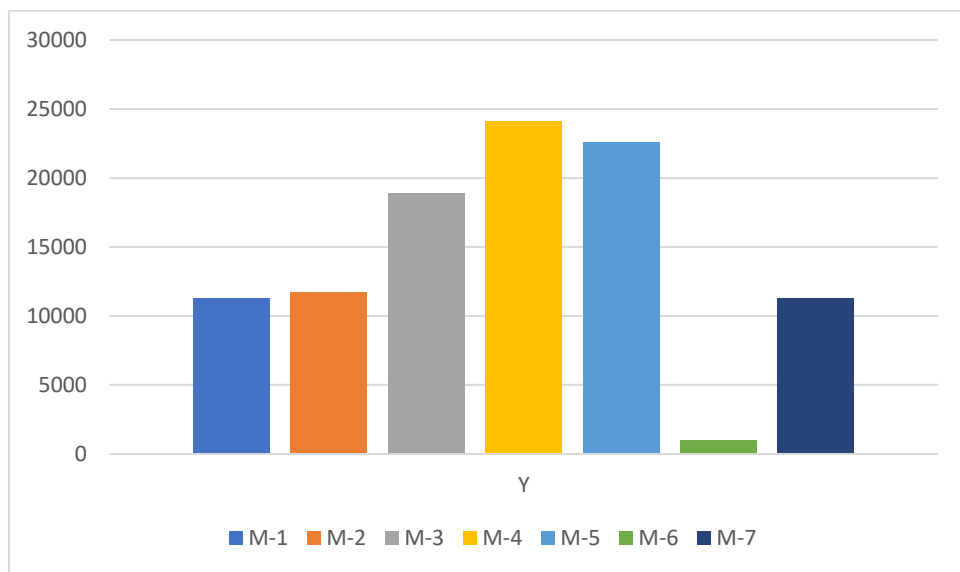
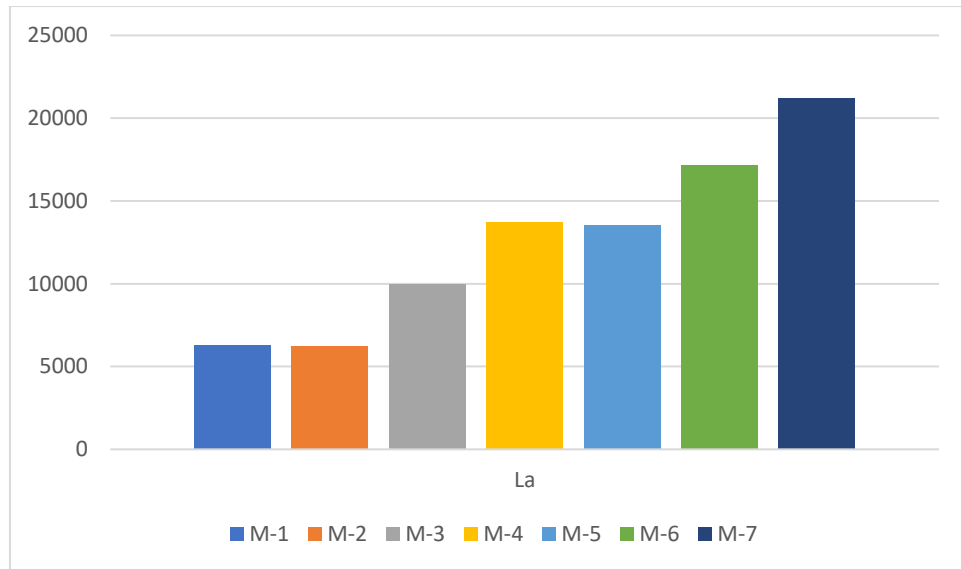
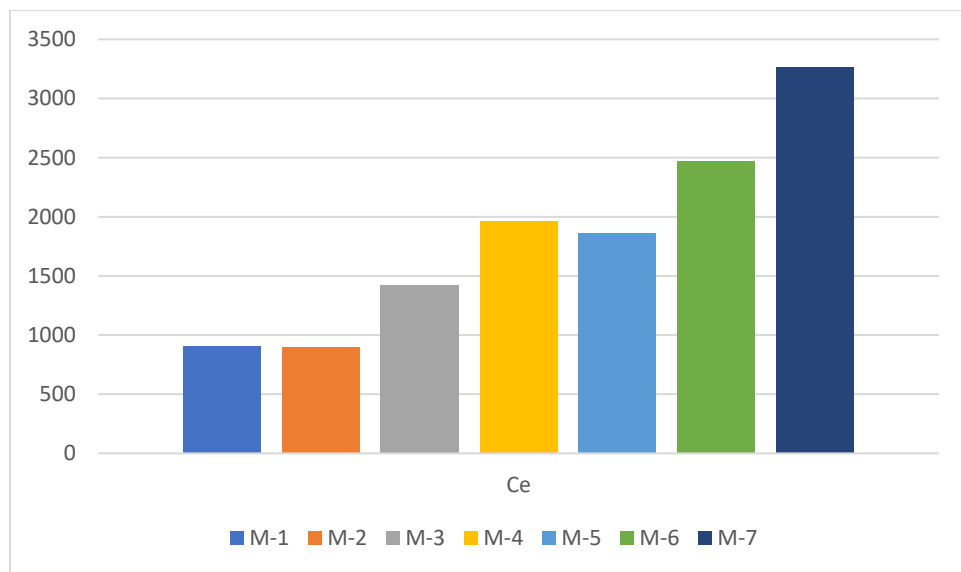


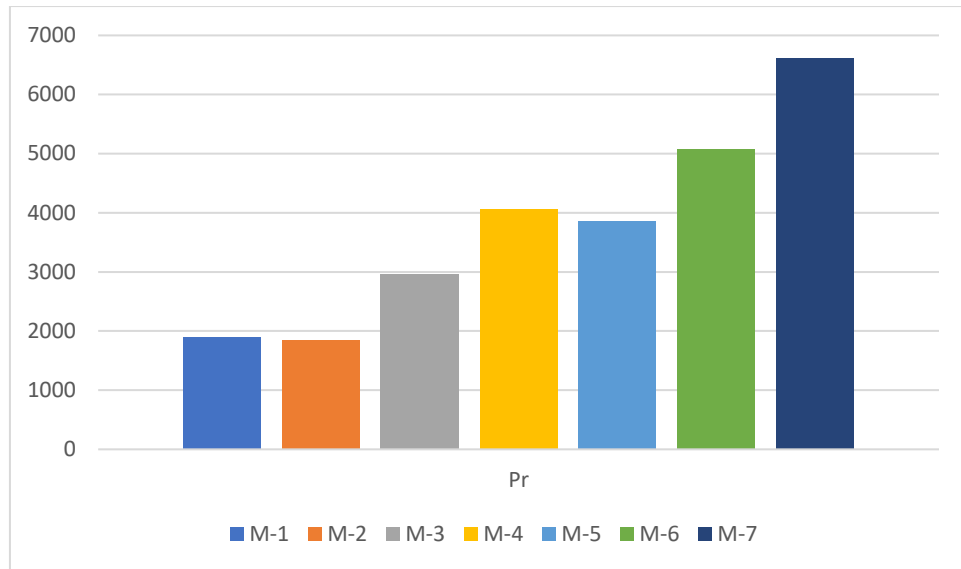
Figura 29. Concentración del elemento itrio en las 7 muestras analizadas, expresadas en mg/L.



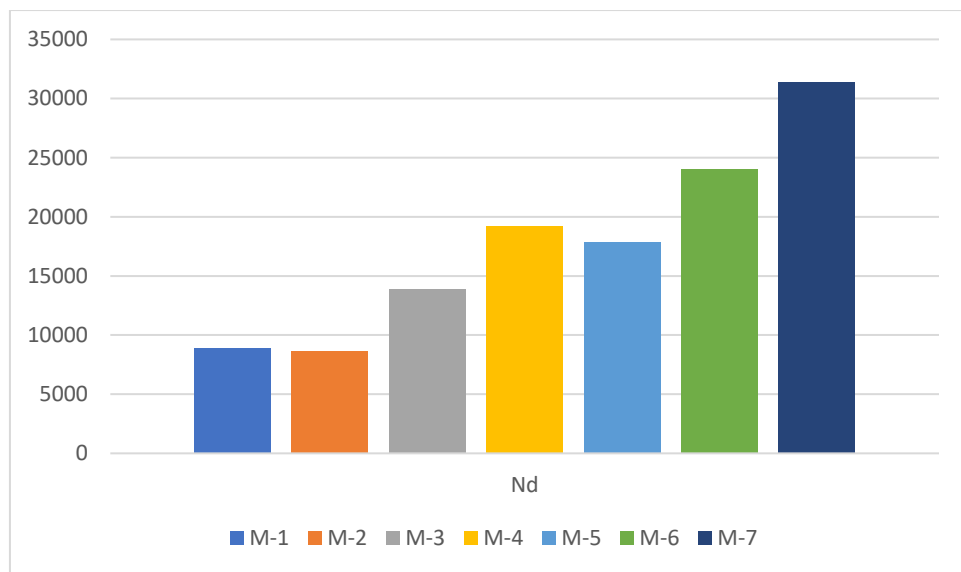
**Figura 30.** Concentración del elemento lantano en las 7 muestras analizadas, expresadas en mg/L.



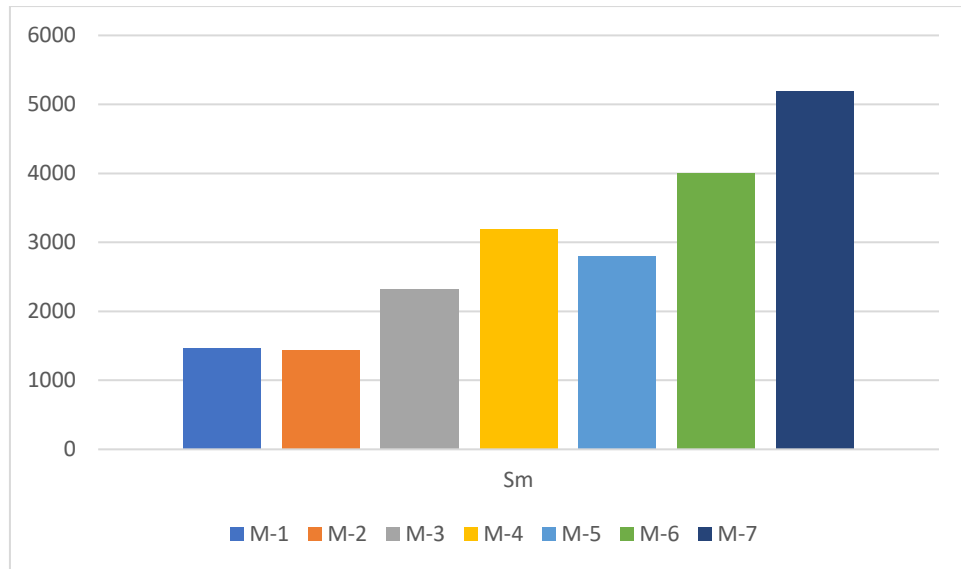
**Figura 31.** Concentración del elemento cerio en las 7 muestras analizadas, expresadas en mg/L.



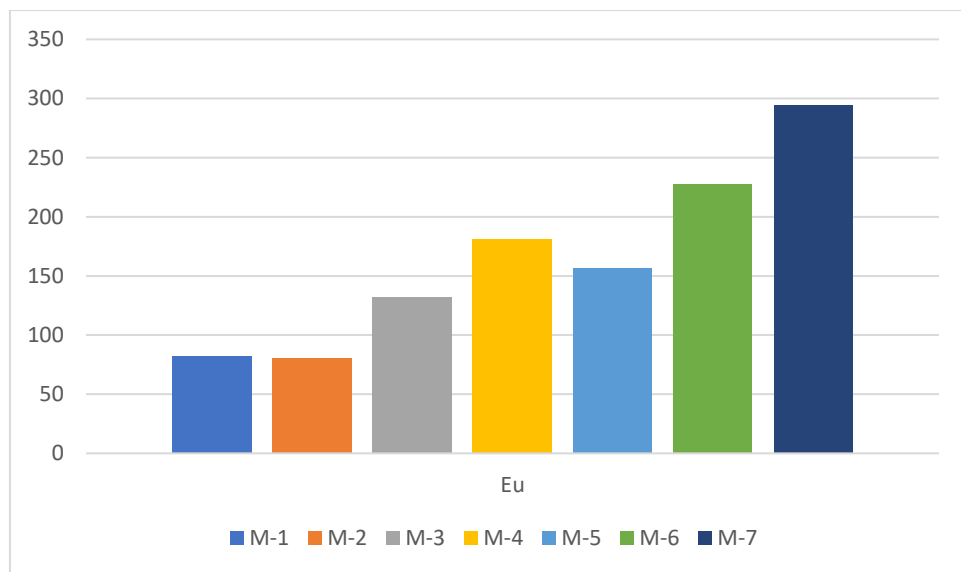
**Figura 32.** Concentración del elemento praseodimio en las 7 muestras analizadas, expresadas en mg/L.



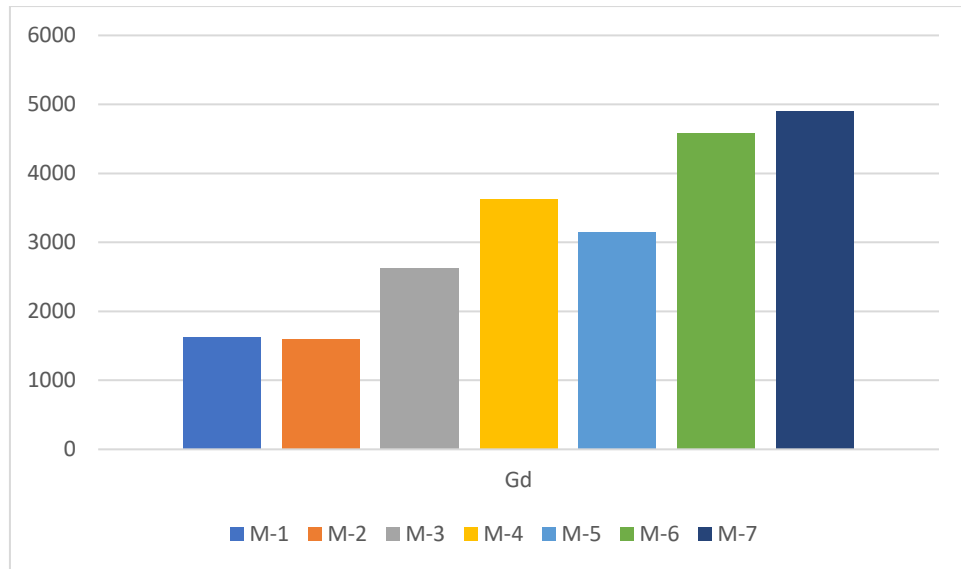
**Figura 33.** Concentración del elemento neodimio en las 7 muestras analizadas, expresadas en mg/L.



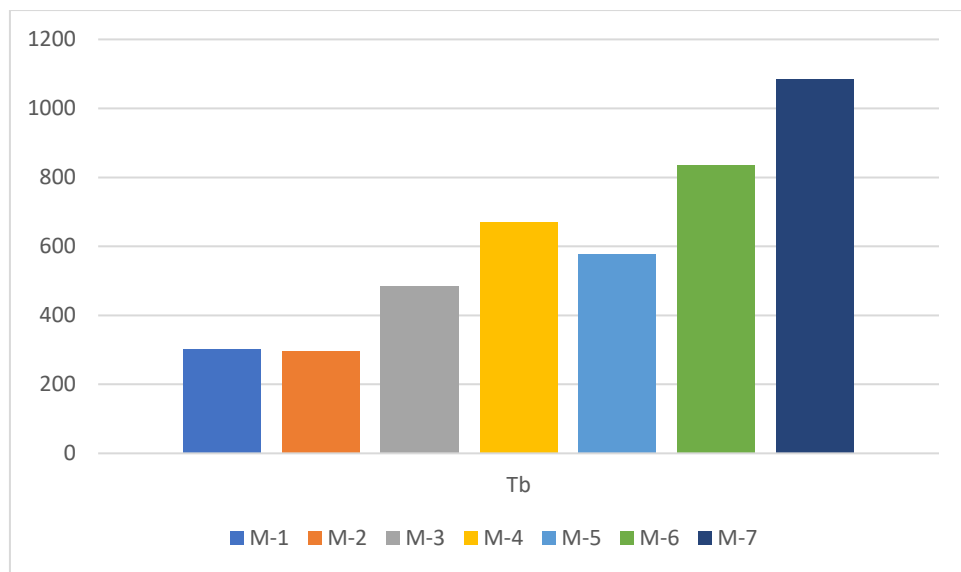
**Figura 34.** Concentración del elemento samario en las 7 muestras analizadas, expresadas en mg/L.



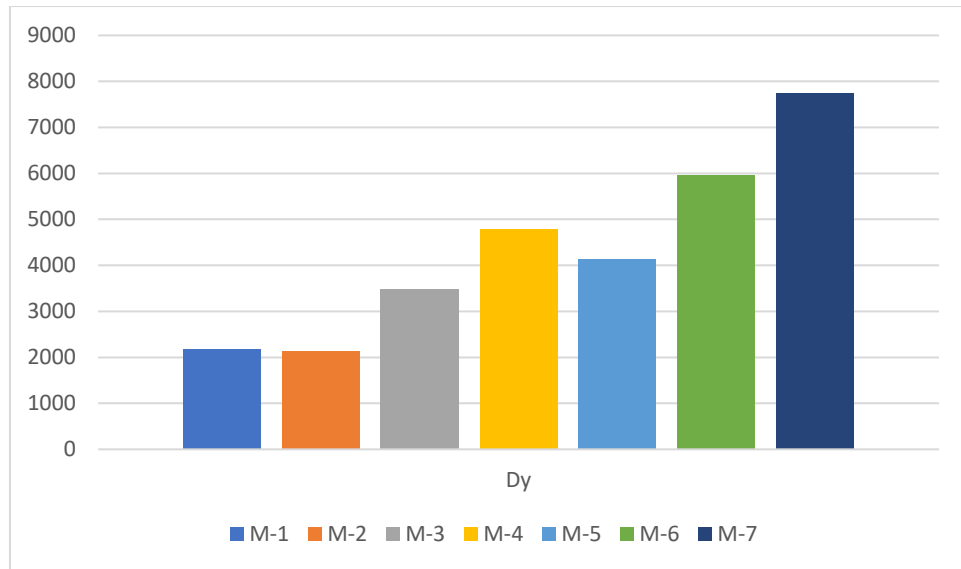
**Figura 35.** Concentración del elemento europio en las 7 muestras analizadas, expresadas en mg/L.



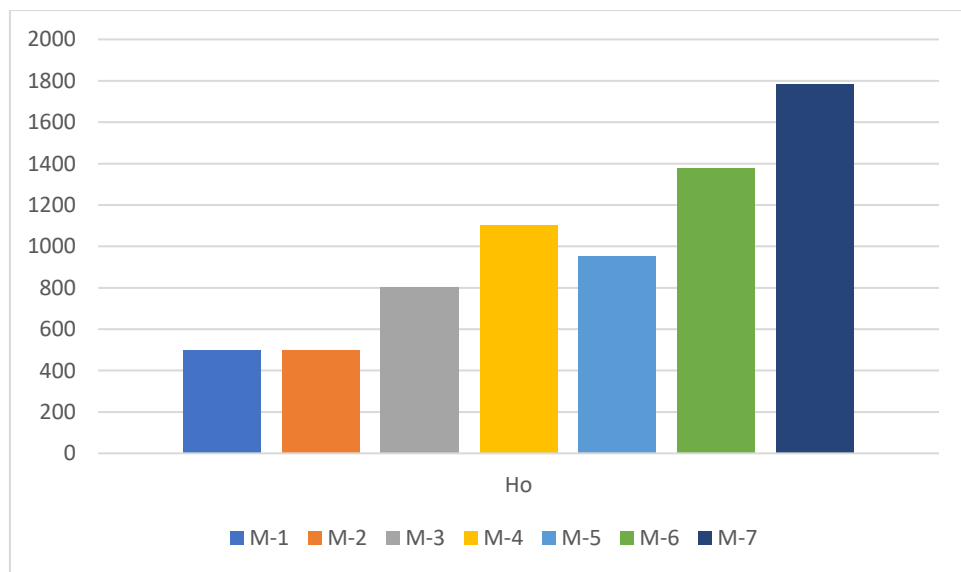
**Figura 36.** Concentración del elemento gadolinio en las 7 muestras analizadas, expresadas en mg/L.



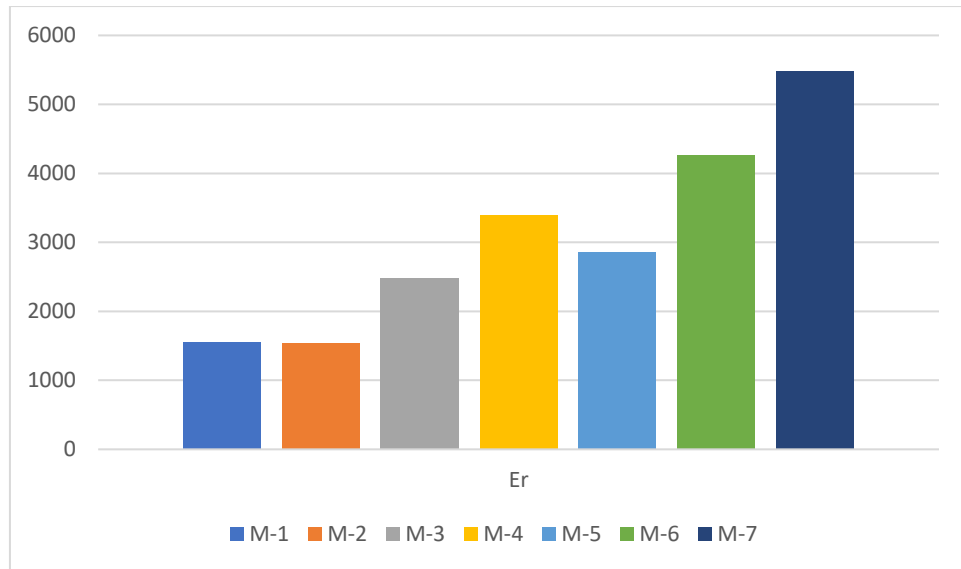
**Figura 37.** Concentración del elemento terbio en las 7 muestras analizadas, expresadas en mg/L.



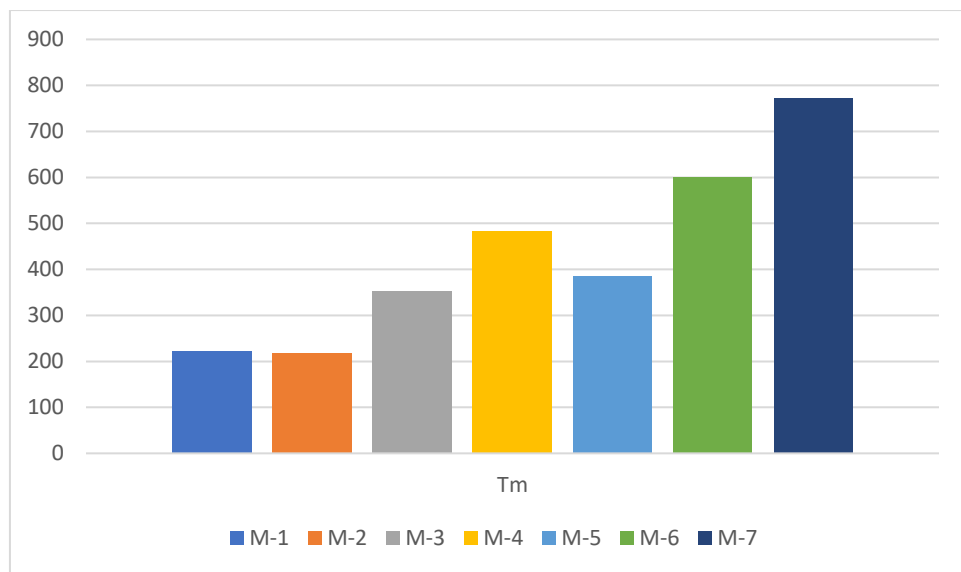
**Figura 38.** Concentración del elemento disprosio en las 7 muestras analizadas, expresadas en mg/L.



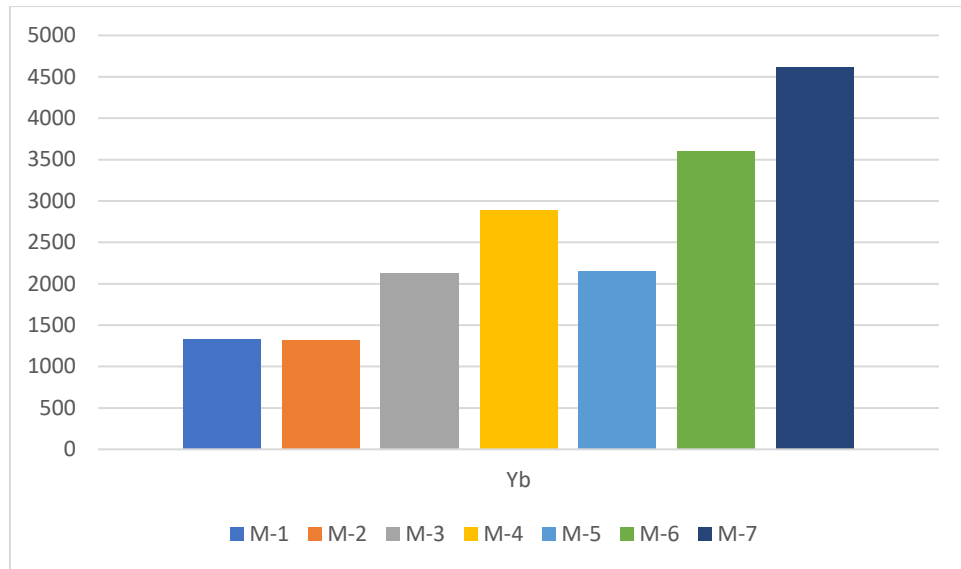
**Figura 39.** Concentración del elemento holmio en las 7 muestras analizadas, expresadas en mg/L.



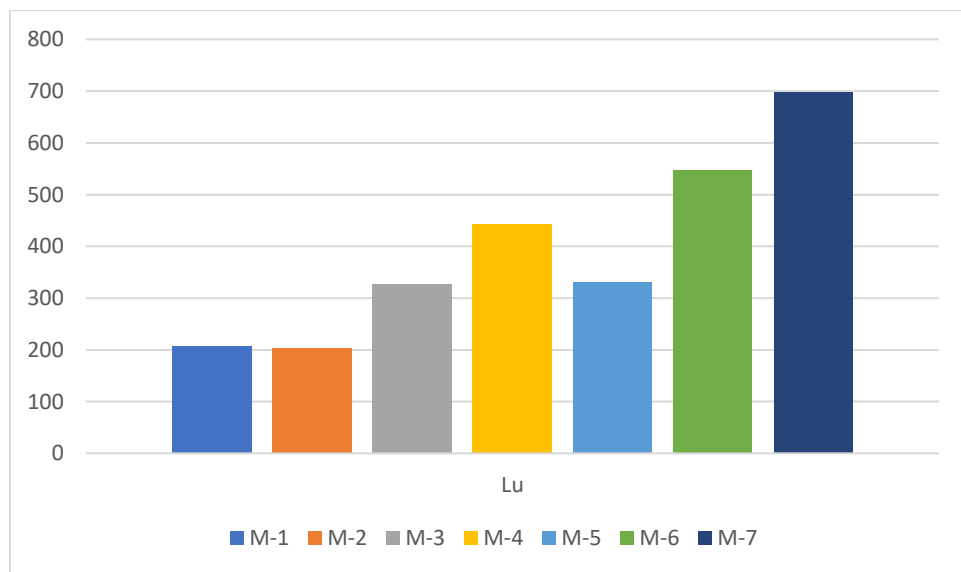
**Figura 40.** Concentración del elemento erbio en las 7 muestras analizadas, expresadas en mg/L.



**Figura 41.** Concentración del elemento praseodimio en las 7 muestras analizadas, expresadas en mg/L.



**Figura 42.** Concentración del elemento iterbio en las 7 muestras analizadas, expresadas en mg/L.



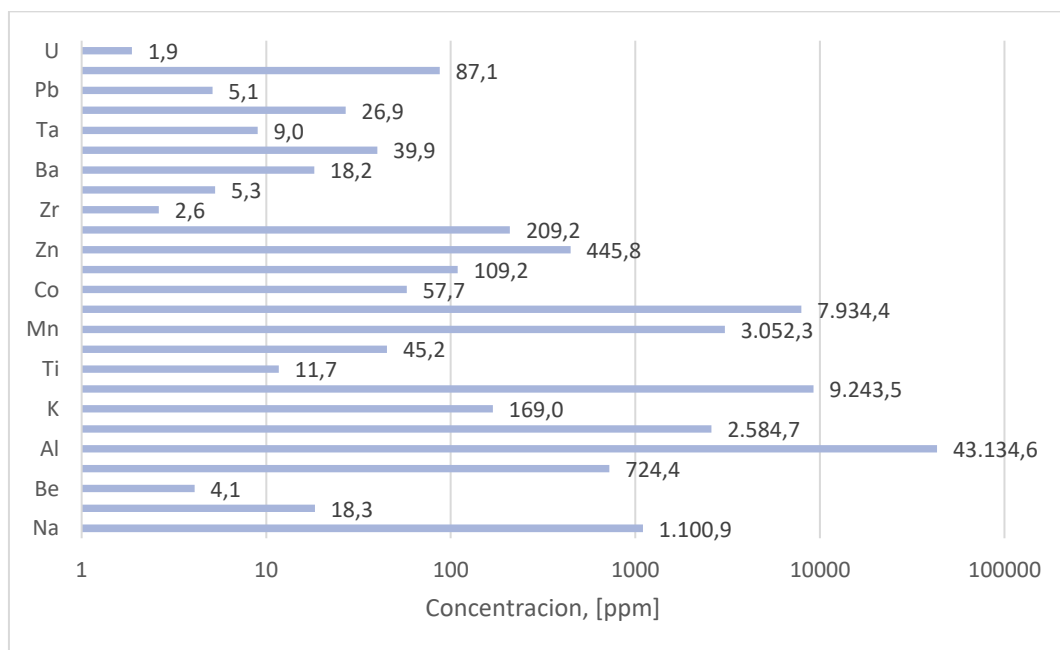
**Figura 43.** Concentración del elemento lutecio en las 7 muestras analizadas, expresadas en mg/L.

## 7.2 Grado de extracción de los REE

**Tabla 18: Grado de REE lixiviado en las muestras analizadas en base al concentrado, expresado en porcentaje.**

	Sc	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
M-1	92,7%	90,2%	95,3%	97,4%	101,3%	105,7%	102,5%	102,3%	89,4%	96,7%	100,0%	96,4%	98,7%	94,6%	101,2%	100,3%
M-2	93,3%	93,4%	94,0%	96,2%	99,3%	102,7%	100,3%	100,3%	87,9%	95,4%	98,9%	95,9%	97,5%	93,2%	100,3%	98,9%
M-3	98,5%	100,5%	100,1%	102,2%	105,8%	110,4%	108,2%	109,7%	96,5%	104,0%	107,3%	103,1%	105,0%	100,5%	107,6%	105,7%
M-4	99,3%	96,3%	103,2%	105,4%	108,9%	114,5%	111,8%	113,0%	100,3%	107,6%	110,6%	106,1%	108,1%	102,9%	110,0%	107,5%
M-5	94,1%	2,4%	95,9%	105,2%	106,4%	112,3%	109,0%	110,1%	81,3%	104,4%	107,3%	103,0%	104,6%	99,1%	105,4%	101,7%
M-6	100,0%	90,2%	102,2%	100,2%	103,5%	106,3%	98,1%	97,9%	87,0%	92,6%	95,2%	91,4%	90,9%	82,3%	82,1%	80,3%
M-7	99,6%	103,0%	103,5%	106,3%	108,8%	114,6%	111,9%	113,6%	101,3%	107,4%	110,1%	105,8%	108,3%	102,7%	109,7%	106,2%

## 7.3 Resultados análisis químico de impurezas



**Figura 44. Concentración promedio de las principales impurezas presentes en el PLS.**

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**Departamento de Ingeniería Metalúrgica**  
Hoja Resumen Memoria de Título

**Título:** Optimización de la lixiviación de carbonatos de tierras raras en medio HCl para la empresa Aclara

**Nombre Memorista:** Carlos Alejandro Sepúlveda Benítez

<b>Modalidad</b>	Investigación	<b>Profesor(es) Patrocinante(s)</b>  <b>Prof. Fernando Antonio Parada Luna</b>
<b>Concepto</b>		
<b>Calificación</b>		
<b>Fecha</b>	08.08.2024	
Prof. <sup>a</sup> Eugenia Araneda H.		<b>Ingeniero Supervisor:</b>
		<b>Institución: Universidad de Concepción</b>

**Comisión (Nombre y Firma)**

Prof. Eduardo R. Balladares Varela	Prof. Rodrigo A. Yepsen Ferreira
------------------------------------	----------------------------------

**Resumen**

En el presente trabajo se evaluó el proceso de lixiviación en medio ácido clorhídrico del concentrado de carbonatos de tierras raras producido por el módulo Penco de la empresa Aclara, lo que se enmarca en el propósito de evaluar un tratamiento al concentrado generado con el fin entregar valor agregado.

Se tuvo por objetivos, evaluar la eficacia del proceso de lixiviación de los elementos de tierras raras bajo diferentes condiciones, determinar el consumo de ácido clorhídrico en el proceso y optimizar la eficacia de extracción de los elementos de interés y la acidez del PLS generado en el proceso. Para lo anterior se realizaron múltiples pruebas a nivel de laboratorio bajo diferentes parámetros con el concentrado de carbonatos de tierras raras proporcionado, para posteriormente realizar un análisis con los datos obtenidos y los resultados de los análisis químicos realizados a las muestras obtenidas.

De los resultados se determinó que el proceso estudiado presenta indicios favorables, debido que se tiene alto grado de solubilidad de los elementos de interés, una cinética rápida en la lixiviación y altas concentraciones de los elementos de interés en la solución generada, junto a ello se determinaron óptimos de acidez del PLS generado para etapas posteriores.