

# Obtención de concentrado de óxidos de tierras raras a partir de minerales del prospecto “cerro carmen”

## Obtaining concentrate of rare earth oxides starting from ores coming from “Cerro Carmen” prospect

Pedro Orrego<sup>1</sup>, Susana Mahú<sup>1</sup>, Pilar Vega<sup>2</sup>, Miguel Molina<sup>2</sup>  
 Sección Geología y Minería,  
 Departamento de Materiales Nucleares  
 Comisión Chilena de Energía Nuclear  
 porrego@cchen.cl

### Resumen

La existencia de elementos de Tierras Raras, (ETR), en los minerales provenientes de sectores de la Tercera Región de Chile, ha incentivado el desarrollo de investigaciones por parte de la Comisión Chilena de Energía Nuclear para lograr su recuperación. El presente trabajo tiene como objetivo obtener un concentrado de óxidos de tierras raras a partir de mineral de Cerro Carmen, por lo que se diseñó y desarrolló un diagrama de procesos, donde el mineral, previa concentración gravimétrica en circuito abierto, es lixiviado con soluciones clorhídricas, posteriormente y por precipitación selectiva son separadas y eliminadas las impurezas, los lantánidos, son digeridos con HNO<sub>3</sub> y precipitados con H<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, finalmente y por calcinación en presencia de aire se obtiene un concentrado de óxidos de elementos de tierras raras. El concentrado obtenido tiene una ley del orden de 76,1% de óxido de TR. Este valor aumenta a 91,3%, al incluir el óxido de Itrio.

**Palabras Clave:** Tierras Raras, Concentración gravimétrica, Lixiviación, Concentrado, Soluciones clorhídricas.

### Abstract

The presence of rare earth elements (REE) in minerals coming from some areas of the Third Region of Chile has encouraged the development of research inside the Chilean Nuclear Energy Commission for their recovery and concentration. The present study aims to obtain a concentrate of rare earth oxides from ores coming from Cerro Carmen. A process diagram was designed and developed, where the ore undergoes a gravimetric concentration in an open circuit, then it is leached with hydrochloric solutions, and subsequently a selective precipitation stage take place where impurities are precipitated and the lanthanides are digested with nitric acid and precipitated with oxalic acid, finally, a concentrate of rare earth oxides is obtained by calcination in air. This concentrate has 76,1% REE oxides which increases to 91,3% considering the yttrium oxide.

**Keywords:** Rare earth, gravimetric concentration, Leaching, Concentrate, Hydrochloric solutions.

<sup>1</sup> Sección Geología y Minería, Departamento de Materiales Nucleares Comisión Chilena de Energía Nuclear.

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Santiago de Chile, USACH.

## Introducción

Los elementos denominados Tierras Raras, o Lantánidos, (se expresan como óxidos bajo la denominación ETR o REE, Rare Earth Elements), lo conforman 15 elementos químicamente similares con número atómico que varía desde el N° 57 hasta el 71 (Gambogi y Curier, 2010). Los procedimientos industrialmente en uso para su recuperación, están dirigidos a la obtención de concentrados de ETR a partir de minerales tales como monacita, [(Ce, La, Th) PO<sub>4</sub>], bastnasita, [(Ce, La)(F, OH)CO<sub>3</sub>], y xenotimio, [(YPO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>]. Con excepción de la bastnasita, muchos concentrados de ETR son obtenidos como sub-producto o resultado de procesos hidrometalúrgicos o pirometalúrgicos (Orrego, 1998; Orrego, 2000; Vega, 2000; Hedrick, 1999; Dwivedi, 1982; Harrah, 1967; Sunur *et al.*, 1985; Alarcon, 1998; Lapido, 1994; Sundaram, 1987; Swanina y Nair, 1989; The Humphreys Investment Co, 1970). En el ámbito mundial las TR son elementos que, gracias a sus propiedades físicas y químicas, han permitido su utilización en una serie de productos de última tecnología. En Chile existen sectores con presencia de minerales portadores de estos elementos, este conocimiento genera el interés de investigar procesos para su recuperación y posterior concentración (Orrego, 1998; Orrego, 2000; Vega, 2000; Hedrick, 1999; Dwivedi, 1982; Harrah, 1967; Sunur *et al.*, 1985; Alarcon, 1998; Lapido, 1994; Sundaram, 1987; Swanina y Nair, 1989).

Para obtener un concentrado de óxidos de ETR, inicialmente se supone que dichos elementos están presentes en la mena mineral en forma de óxido. Basado en información publicada en la literatura y experiencias realizadas con anterioridad en la Comisión Chilena de Energía Nuclear, (CCHEN), se propone desarrollar el diagrama de flujos de la Figura 1 (Orrego, 1998; Orrego, 2000; Vega, 2000).

## Procedimiento experimental

Los procedimientos desarrollados para la recuperación y concentración de ETR e involucrados en este estudio son:

### Caracterización Metalúrgica

El análisis petrocalcográfico y metalográfico de la mena de Cerro Carmen, demostró la existencia de minerales tipo magnetita, titano-magnetita en el interior de cristales de esfeno y desarrollo posterior de cristales elongados de ilmenita, teniendo como

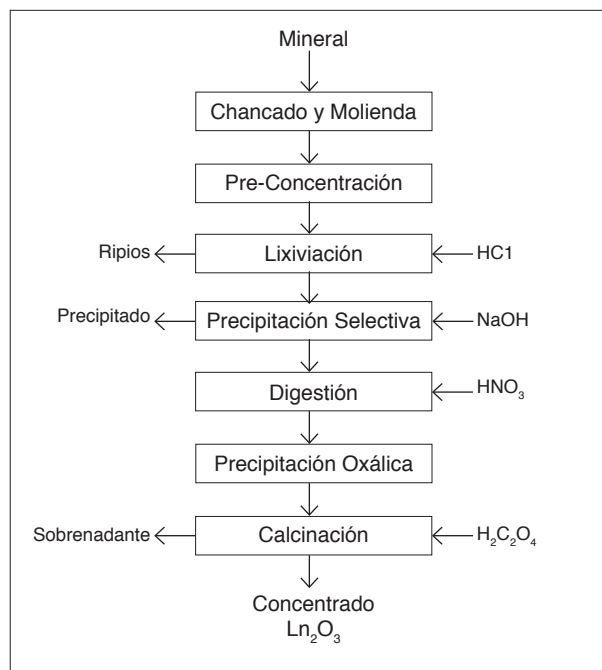


Figura 1: Diagrama de Flujos para la obtención de concentrados de ETR (Orrego, 1998; Orrego, 2000).

producto final minerales oxidados y silicatados. Además, se identificaron elementos como Y, La, Ce, Nd, Yd, Yb, en el orden de  $\mu\text{g/g}$ ; presenta un contenido de sílice moderado; mineral con propiedades magnéticas como Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en el orden de 10%, en un volumen del orden de 20% CaCO<sub>3</sub> y

Tabla I. ETR e impurezas presentes en la muestra de mineral del prospecto Cerro Carmen.

Elemento	%	Elemento	%
Y	0,1058	Si	17,2900
La	0,2207	Fe	6,2900
Ce	0,2096	Al	5,2900
Pr	0,0112	Ca	7,1400
Nd	0,0237	Ti	12,5800
Sm	0,0044	Mg	1,8000
Eu	0,0007	Na	1,1700
Gd	0,0089	Ni	0,0020
Tb	0,0017	Sr	0,0460
Dy	0,0155	Zr	0,0470
Ho	0,0440	Th	0,0450
Er	0,0173	U	0,0110
Tm	0,0032	Nb	0,0071
Sc	0,0599	Ba	0,0720
Yb	0,0246	<b>Total ETR</b>	<b>0,7556</b>
Lu	0,0044		

Tabla II. Distribución granulométrica del mineral de Cerro Carmen.

Malla ASTM	F <sub>i</sub> (%)*	F <sub>i</sub> (%)*
10	2,6	97,4
14	4,0	96,0
20	15,1	84,9
25	22,6	77,4
45	50,8	49,2
60	60,4	39,6
120	75,3	24,7
170	81,3	18,7
230	87,9	12,1
-230	100,0	0,0

(\*) fi representa el retenido acumulado y Fi al pasante acumulado.

TiO<sub>2</sub>, principalmente en menas del tipo titano-magnéticas, ilmenita, rutilo y esfeno. El contenido de ETR e impurezas presentes en la mena de Cerro Carmen son mostradas en la tabla I y en la tabla II su distribución granulométrica, posterior a una etapa de molienda.

### Concentración gravimétrica

La baja recuperación metalúrgica en la etapa de lixiviación, obtenida en trabajos anteriores (Orrego, 1998; Orrego, 2000), asociado al alto costo que implica una etapa de concentración mediante líquidos densos, fue la causa que motivo el análisis de una técnica que permitiera aumentar el contenido de los ETR en la mena, para ello se implementó una etapa de concentración gravimétrica, utilizando espiral Humphrey (The Humphreys Investment Co, 1970), Figura 2.

Esta técnica permite que los ETR se concentren preferentemente en las fracciones de especies de mayor densidad, pesadas. Como consecuencia de esta operación se tiene que la ley de los ETR, que son alimentados a la etapa de lixiviación, aumenta considerablemente (Orrego, 1998; Orrego, 2000; Vega, 2000; Hedrick, 1999; Dwivedi, 1982; Harrah, 1967; Sunur *et al.*, 1985; Alarcon, 1998; Lapido, 1994; Sundaram, 1987; Swanina y Nair, 1989). Por lo tanto, se planificó un test denominado ciclo abierto, que comprende básicamente una etapa rougher y dos etapas cleaner. Posterior a la ejecución de estas pruebas se desarrolló un modelo matemático, simulando circuitos cerrados de concentración gravitacional, compuestos por etapas Rougher, cleaner y scavenger.

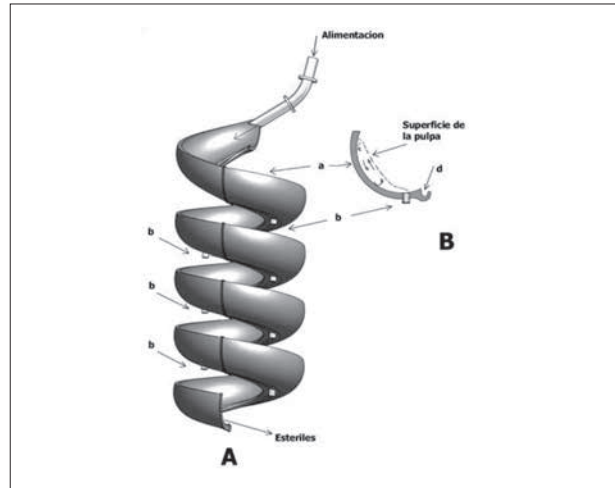


Figura 2: Espiral Humphrey.[14]

Tabla III. Variables estudiadas en la pre-concentración gravimétrica.

Variables	Rangos		
Granulometría	-60 +125 #ASTM	- 140 #ASTM	
% Cp	25	30	35
Flujo pulpa (L/min)	40		60

Las variables estudiadas y analizadas en la implementación del circuito abierto, son indicadas en la tabla III.

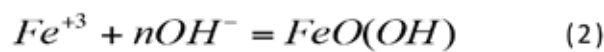
### Lixiviación

Inicialmente se admite que los ETR, en la mena mineral, están presentes como óxidos dada su estabilidad y fuerte afinidad. Una vez incrementada la ley de los ETR en el mineral, mediante la concentración gravimétrica, la disolución de estos puede realizarse por medio ácido a objeto de recuperar dichos elementos. Estudios anteriores (Orrego, 2000; Harrah, 1967) avalan el uso de HCl para la lixiviación de los ETR, debido a que se consiguen mayores recuperaciones (Orrego, 1998; Orrego, 2000; Vega, 2000; Hedrick, 1999; Dwivedi, 1982; Harrah, 1967; Sunur *et al.*, 1985; Alarcon, 1998; Lapido, 1994; Sundaram, 1987; Swanina y Nair, 1989; The Humphreys Investment Co, 1970), por ello con éste ácido se estudian los efectos de la razón (S/L): 1/1, 1/2 y 1/3; dosificación ácida: 200 y 300 [kg /t] y tiempos de lixiviación de 1, 4, 8 y 10 horas. La reacción se muestra en la ecuación (1).



### Precipitación selectiva

Considerando que la matriz de la mena está compuesta mayoritariamente por hierro, este elemento está presente en los PLS obtenidos y es interferente en los procesos posteriores, por lo tanto, este es eliminado de las soluciones mediante precipitación. Las precipitaciones para eliminar el  $Fe^{3+}$ , son realizadas a pH 3,5 - 4,5. La reacción se muestra en la ecuación (2).



Con el objeto de obtener los lantánidos en ambiente nítrico, recomendable para lograr buenos resultados en la precipitación oxálica, los sobrenadantes son tratados con soluciones básicas hasta pH 7 - 8. La reacción se muestra en la ecuación (3).



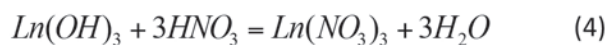
Las variables estudiadas en ambas precipitaciones, son mostradas en la tabla IV.

Tabla IV: Variables estudiadas en la etapa de precipitación, de hierro y lantánidos.

Variables	
pH	3,5 - 4,5 - 5,5 - 6,5 - 7,5 - 8,5
Reactivo	NaOH - $NH_4OH$
Temperatura	25°C - 95°C

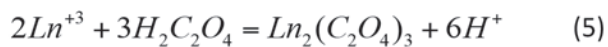
### Digestión ácida

Para garantizar una alta efectividad en el proceso con ácido oxálico, el precipitado de hidróxidos de ETR es digerido con ácido nítrico utilizando durante esta etapa diferentes razones S/L (1/2, 1/3, y 1/4), y concentraciones de 20 y 30% v/v de  $HNO_3$ . La reacción se muestra en la ecuación (4).

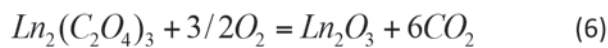


### Precipitación oxálica

La precipitación con ácido oxálico permite obtener los ETR como oxalatos en estado sólido, en este trabajo se evalúa la incidencia del pH, (0,4 - 0,5 y 0,7), para la obtención de oxalato de lantánidos de alta pureza. La reacción se muestra en la ecuación (5).



Finalmente los oxalatos son convertidos a óxido puros al ser sometidos a una calcinación en presencia de aire a temperatura de 850°C por 2 horas, obteniendo finalmente un concentrado de óxidos de TR. La reacción se muestra en la ecuación (6).



La aplicación de estos procesos permitió obtener un concentrado de óxido de ETR.

## Reactivos y materiales utilizados

Los reactivos utilizados en el desarrollo de todas las experiencias son de calidad técnica y las soluciones fueron preparadas con agua desionizada, las pruebas de lixiviación, digestión y de precipitación fueron realizadas en un reactor de vidrio cerrado con agitación mecánica, la temperatura de trabajo se obtuvo mediante el uso de un manto calefactor. Los reactivos eran adicionados mediante bomba peristáltica a la solución de trabajo.

## Resultados experimentales y discusiones

Los resultados obtenidos en el desarrollo de estas operaciones son mostrados y discutidos a continuación.

### Concentración Gravimétrica

Las pruebas de concentración gravimétrica en circuito abierto permitieron obtener un concentrado rico en ETR al someter la fracción pesada a reiteradas pasadas por el espiral Humphrey, la Figura 3, muestra los resultados obtenidos y la Figura 4 el esquema de operación aplicado.

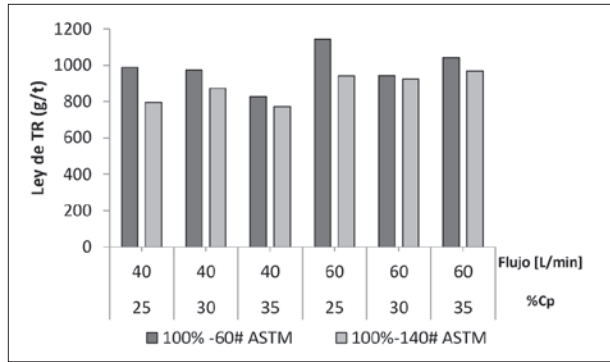


Figura 3: Ley de los ETR en la fracción pesada, para dos tamaños de partículas.

Los mejores resultados, Tabla V, al desarrollar un circuito abierto son obtenidos al aplicar un flujo de pulpa de 60 L/min, una granulometría de 100% bajo malla 60 ASTM y pulpas con un Cp de 25%. El concentrado rougher alcanza una ley de ETR de 1,14 kg/t, es decir, un aumento del orden de 41% con respecto a la ley de cabeza y una eficiencia de 79%.

El concentrado final alcanza una ley de 2,373 kg/t de ETR, lo que es equivalente a un aumento del 213%. Este aumento es considerado beneficioso, ya que haría la explotación del prospecto Cerro Carmen económicamente factible. Por otro lado, la ley de relave del 2° cleaner es 0,806 kg/t de ETR, mayor que la ley de cabeza, representando un aspecto negativo del ciclo abierto, al no cumplir con condiciones propias de relave para su descarte.

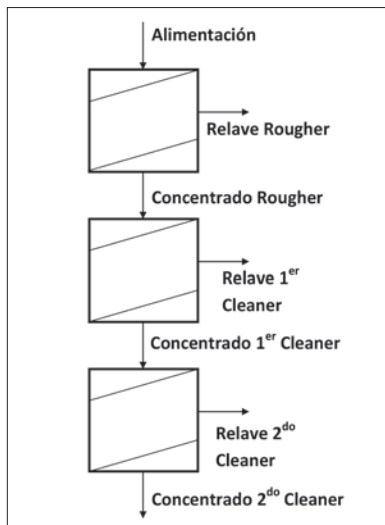


Figura 4: Diagrama de flujos, circuito abierto de concentración gravimétrica, utilizando espiral Humphrey.

Tabla V. Resultado obtenido al aplicar test en circuito abierto, mostrando sólo el La y Ce por su mayor presencia.

	La [Kg/t]	Ce [Kg/t]	Total [Kg/t]
Aliment. (1)	0,21	0,208	0,758
Con. Rou. (2)	0,341	0,355	1,143
Rel. Rou. (3)	0,157	0,143	0,518
Conc. 1° Cl. (4)	0,454	0,452	1,423
Rel. 1° Cl. (5)	0,175	0,177	0,577
Conc. 2° Cl. (6)	0,780	0,761	2,373
Rel. 2° CL. (7)	0,241	0,238	0,806

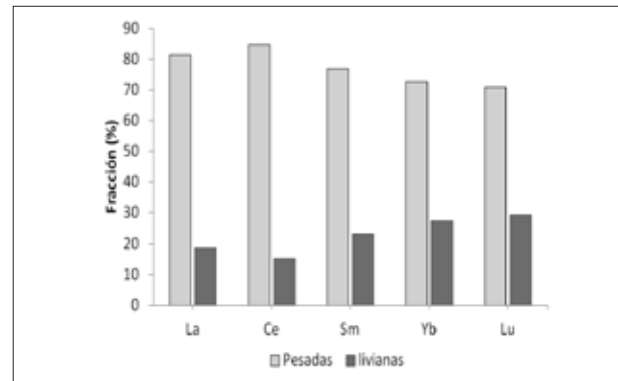


Figura 5. Distribución de algunos ETR en fracciones pesada y liviana, etapa Rougher.

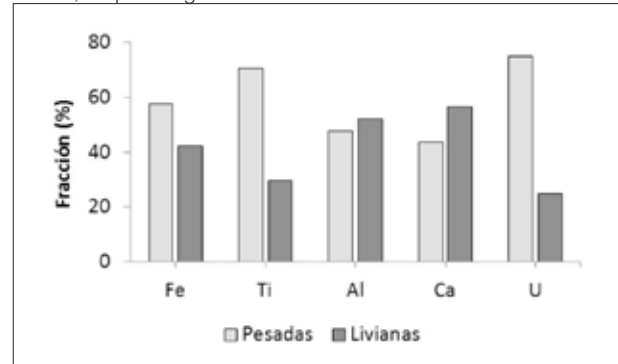


Figura 6. Distribución de impurezas en fracciones pesada y liviana, etapa Rougher.

Las Figura 5 y 6 muestran tanto la distribución de ETR, como la de las principales impurezas presentes en las fracciones livianas y pesadas, en la etapa rougher.

Con el objeto de mejorar aún más la eficiencia del proceso y disminuir la ley de los relaves, a partir de los resultados obtenidos, en el ciclo abierto, se simuló matemáticamente con el método del *Split Factor* tres tipos de circuitos, asumiendo una ali-

mentación constante de 1.000 kg/h. El circuito que entrega los mejores resultados corresponde a la Figura 7.

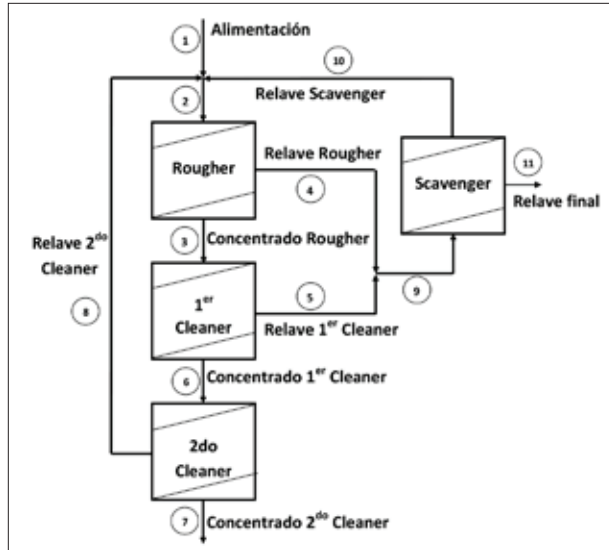


Figura 7. Diagrama de flujo de circuito cerrado de cuatro etapas.

Algunos de los valores, considerando los elementos más relevantes obtenidos mediante la simulación a dicho circuito, se muestran en la tabla VI.

Tabla VI. Simulación mediante *Split Factors* de un test, para circuito cerrado con cuatro etapas, sólo se muestran los resultados del La y Ce por su mayor presencia.

Flujo	Peso (kg/h)	La(kg/t)	Ce kg/t)	Total (kg/t)
1	1.000,0	0,210	0,208	0,758
2	1.787,3	0,200	0,205	0,791
3	685,2	0,244	0,280	1.242
4	1.102,1	0,173	0,158	0,511
5	458,1	0,288	0,346	1.594
6	227,1	0,153	0,148	0,534
7	180,4	0,497	0,606	2.540
8	277,7	0,153	0,177	0,980
9	1.329,2	0,170	0,156	0,515
10	509,6	0,206	0,214	0,755
11	819,6	0,147	0,121	0,365

Los resultados de la tabla VI, muestran una ley de concentrado final, (flujo 7), de 2,54 kg/t de ETR, lo que representa un 236% de aumento respecto a la ley de cabeza, el relave, (flujo 11), obtenido es 0,365 kg/t de ETR, esta concentración, desde el punto de vista metalúrgico y económico, se considera alta y factible de ser mejorada. La recuperación metalúrgica,

de este circuito, es de 61%. Industrialmente, para mejorar esta eficiencia se recurre a baterías conformadas por 4 o más espirales, lo que asegura un mejor rendimiento metalúrgico.

### Lixiviación

Los resultados obtenidos al variar la dosis de ácido y razón s/l, se muestran en la Figura 8, en ella la recuperación está referido al La y Ce por tener mayor presencia, y el Fe por ser la principal impureza presente.

Las recuperaciones de los ETR, obtenidas en estas pruebas, se consideran bajas, siendo de 38 y 42% para el La y Ce respectivamente, y la cantidad de hierro disuelto llega a 39%, estos resultados son para partículas de tamaño entre 100-200 #ASTM, dosis de ácido de 300 kg/t y razón s/l de 1.

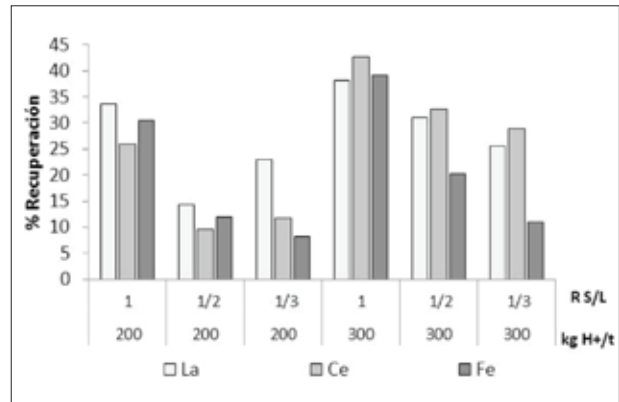


Figura 8. Porcentaje de recuperación de La y Ce, al lixiviar a 90°C por un periodo de 4 horas con distintas relaciones sólido/líquido y dosis de HCl.

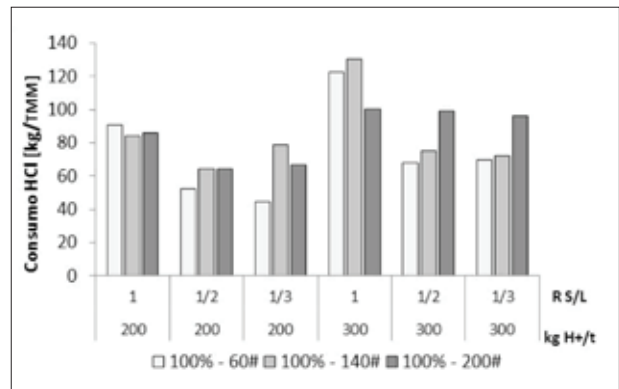


Figura 9. Consumo de HCl por tonelada de mineral tratado en la lixiviación, a 90°C por un periodo de 4 horas con diferentes razones sólido/líquido y dosis de HCl.

La Figura 9 muestra el consumo por tonelada de mineral tratado en función del tamaño de partículas, para diferentes razones S/L y dosis de ácido, a

partir de esta Figura y la anterior, se aprecia que la mejor recuperación de ETR se logra a mayor dosis de ácido para 4 horas de agitación a 90° C. Para mejorar la recuperación de La y Ce se estudió el efecto del tiempo de agitación, los resultados obtenidos se muestran en la Figura 10.

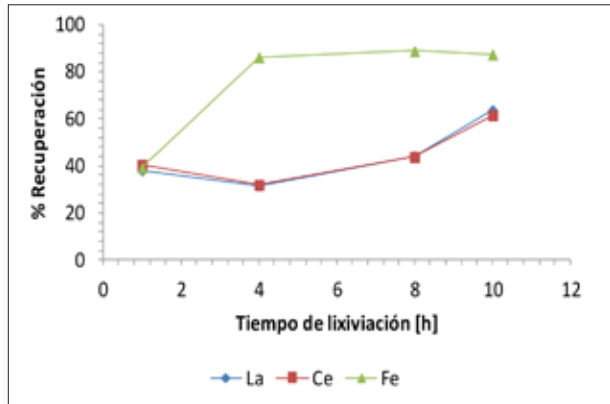


Figura 10. Porcentaje de recuperación de La, Ce y Fe, para distintos tiempos de lixiviación, a 90° C.

Al aumentar el tiempo de lixiviación se favorece la disolución de los ETR pero también existe un aumento en el contenido de impurezas en la solución, esto debido a la matriz que compone la roca huésped. A 10 horas de agitación se logra una recuperación de 60% para La y Ce, y de 80% en el caso del hierro, lo anterior demuestra que para lograr una mayor recuperación de los ETR, necesariamente se debe disolver una mayor cantidad de Fe.

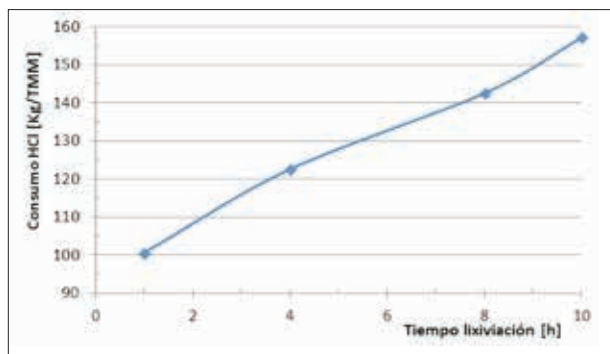


Figura 11. Consumo de ácido [kg/TMM] para distintos tiempos de lixiviación, a 90°C.

En la Figura 11 se observa que el consumo de ácido aumenta paulatinamente con el tiempo de lixiviación, alcanzando los 157 kg/t de HCl. Este fenómeno puede ser atribuible a que la reacción este controlada difusionalmente en el interior de la partícula, por lo que a mayor tiempo de tratamiento es generada una mayor superficie de reacción, implicando mayor consumo de ácido y por ende una

mayor disolución de los elementos que componen la mena mineral.

Al lixiviar mineral del Prospecto Cerro Carmen, la mejor recuperación se obtiene con los parámetros operacionales indicados en la tabla VI.

Tabla VI. Resultados y condiciones de operación para lixiviar mineral de Cerro Carmen con HCl.

Dosis kg /t HCl	T °C	Tpo h	R s/l	Recuperación %		
				La	Ce	Fe
300	90	10	1/3	63,1	57,7	56,7

Posterior a la etapa de lixiviación, queda una partícula porosa, como se puede observar en la Figura 12.

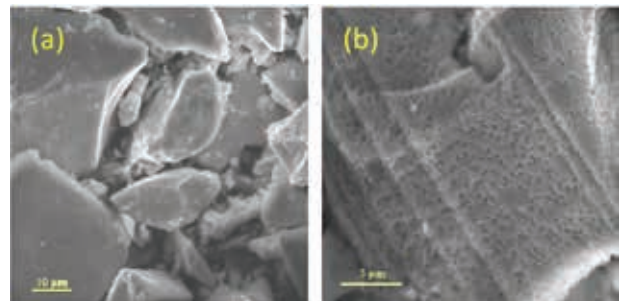


Figura 12. (a) Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) a una partícula de mineral Cerro Carmen sin lixiviar. (b) MEB a una partícula de mineral de Cerro Carmen lixiviado.[14]

### Precipitación selectiva

Los ETR están contenidos en una matriz de hierro, según fue mencionado en el estudio petrocalográfico, quedando demostrado en las pruebas de concentración gravitacional y en las pruebas de lixiviación, en este último proceso al aplicar condiciones destinadas a lograr altas recuperaciones de los ETR, trae como consecuencia una alta disolución de hierro, efecto negativo para la etapa de concentración de los ETR. Por ello se hace necesaria la eliminación del hierro desde la solución de lixiviación previa a la precipitación de los lantánidos con oxalato.

A partir de la Figura 13, se observa que el hierro es precipitado en un 100% con NaOH o NH<sub>4</sub>OH a pH 5,5. La precipitación de los lantánidos presenta una eficiencia de precipitación del 100% al utilizar NaOH 1M a pH 8,8 y a pH 7,5 al utilizar NH<sub>4</sub>OH 15% V/V. Sin embargo, junto al hierro precipitan ETR, lo que no es recomendable, lo anterior

se puede atribuir a un efecto de ion común, por otro lado, también se presenta hierro al precipitar los lantánidos, debido a la presencia de  $Fe^{2+}$  en la solución de lixiviación, ion que precipita a pH mayores que el  $Fe^{3+}$ .

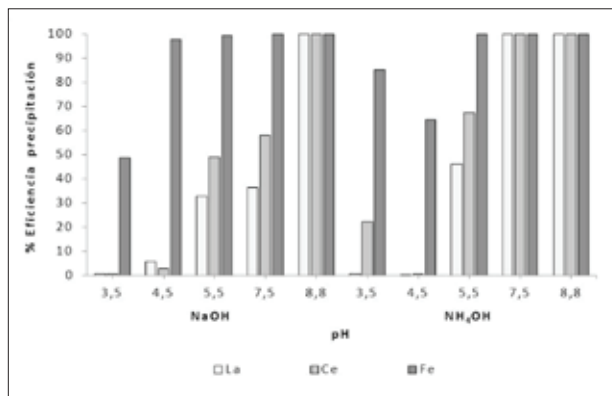


Figura 13. Eficiencia de precipitación, de La, Ce y Fe, al utilizar NaOH 1 M y NH<sub>4</sub>OH 15% v/v, a 95° C.

## Digestión

La precipitación de los oxalatos es más efectiva en medio nítrico, por lo tanto, los hidróxidos obtenidos al precipitar los lantánidos fueron digeridos en éste ácido, durante estas pruebas queda demostrado que la variación de la razón sólido/HNO<sub>3</sub> no es significativa, digiriéndose en todos los casos el 100% del sólido alimentado. Los resultados de estas experiencias se muestran en la Figura 14.

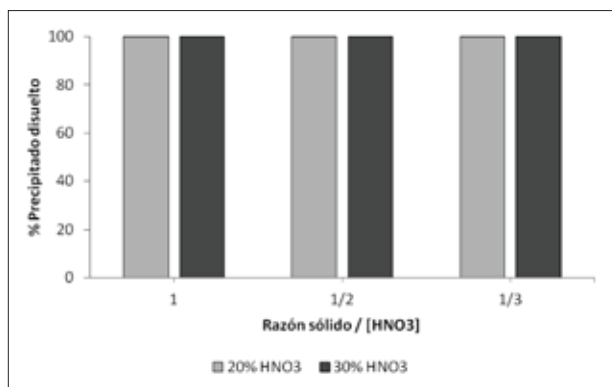


Figura 14. Porcentaje de precipitado disuelto para distintas razones Sólido/[HNO<sub>3</sub>], 25° C.

## Precipitación con ácido oxálico

En estas pruebas fue evaluada la incidencia del pH, para ello se experimentó con valores de 0,4; 0,5 y 0,7. La acidez requerida se logra adicionando una solución de H<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, la Figura 15 muestra los resultados de estas experiencias. Las recuperaciones de los ETR, a estos niveles de pH, son bajas,

lo que obliga a introducir mejoras al proceso en algunos de los parámetros analizados. En la solución sobrenadante quedan elementos tales como Fe, Al, Ni, U, entre otros.

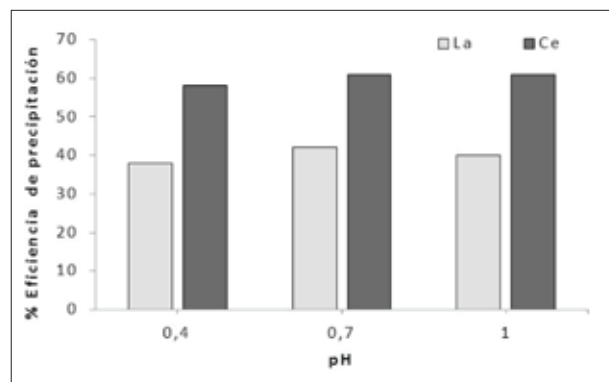


Figura 15. Porcentaje de eficiencia en precipitación de La y Ce, con H<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, para distintos pH, tiempo 1 hora, temperatura de 70° C.

## Calcinación

Los precipitados obtenidos posteriores a la etapa de precipitación oxálica, son calcinados a 850° C por espacio de dos horas en presencia de aire a fin de transformarlos en óxidos. En la tabla VII se muestran las leyes finales de los óxidos de TR presentes en el concentrado final.

El concentrado obtenido corresponde a 76,1% de óxidos de ETR, ese porcentaje aumenta a 91,3% al considerar el óxido de Itrio.

Tabla VII. Porcentaje de óxidos de ETR e Itrio presentes en el concentrado final.

%La	%Ce	%Eu	%Nd	%Lu	%Y	%Sm
26,0	31,9	0,3	5,0	0,5	15,2	1,0
%Yb	%Ho	%Tb	%Dy	%Gd	%Er	%Pr
3,2	0,7	0,3	2,3	0,1	2,3	2,5
<b>Total ETR = 91,3%</b>						

## Conclusiones

Las principales conclusiones que se obtienen de este trabajo son:

- La especie mineral portadora de los ETR, es un tipo de Davidita, ( $AB_3(O, OH)_7$ ), donde  $A = Fe^{2+}$ ,  $TR, U, Ca, Na, Zr, Th$  y  $B = Ti^{4+}, Fe^{3+}, U, V^{3+}, Cr^{3+}$ ; además, presenta variedades de Anatasa con Ti, U, La, Ce, Nd y minerales magnéticos con U, Th, La y Ce.



**Concentración Gravimétrica:**

- Para un circuito abierto de tres etapas, se logra un aumento de concentración de 213%, respecto a la ley de cabeza, llegando a una ley de concentrado de 2,4 kg/t.
- De los circuitos simulados, mediante Split Factors, el que entregó el mejor aumento en la ley de los ETR corresponde al mostrado en la Figura 7, con una ley final de 2,5 kg/t de ETR y de 0,37 Kg/t en los relaves, la recuperación metalúrgica es de 61%, que puede ser mejorada al operar con un sistema de baterías de espirales.

**Lixiviación:**

- Las mayores recuperaciones de Lantano, (64%), y Cerio, (62%), son obtenidas al lixiviar el mineral a una granulometría de 100% -200# ASTM, razón S/L igual a 1, una dosificación ácida de 300 kg/t de HCl, temperatura de 95° C y 10 horas de agitación.
- El consumo de ácido, durante la lixiviación, muestra una tendencia creciente en función del tiempo de agitación, causada por la generación de mayor superficie de reacción creada por la acción del ácido al disolver el mineral.

**Precipitación Selectiva**

- Las mejores condiciones para la precipitación del hierro se logran a pH 5,5, manteniéndose en solución los ETR.
- Para un pH mayor a 7,5 se logra el mayor porcentaje de precipitación de los ETR alcanzando el 100%.

**Digestión**

- Durante la digestión ácida se disolvió el 100% de los hidróxidos en medio nítrico, para las razones sólido/ácido estudiadas.

**Precipitación Oxálica**

- La precipitación de los oxalatos de ETR es favorecida a valores de pH menores que 1.

**Calcinación**

- Al aplicar el diagrama de proceso propuesto es posible obtener un concentrado con ley de 76,1% de óxido de ETR, aumentando a 91,3% al considerar el óxido de Itrio.

**Agradecimientos**

Los autores agradecen a la Empresa Nacional de Minería, ENAMI, y a la Comisión Chilena de Energía Nuclear, CCHEN, por el apoyo técnico y económico brindado para la realización de este trabajo.

**Referencias**

Alarcón B. 1998. Estudio petro-calcográfico de sectores anómalos Sierra Áspera, Veracruz y Cerro Carmen. Departamento de Materiales Nucleares, Sección Geología y Minería, Santiago.

Dwivedi RK. 1982. Determination of the thermodynamic properties of rare earth-oxygen-sulfur systems at high temperatures. Tesis PhD, McMaster University.

Gambogi J, Cordier D. 2010. Rare Earths, USGS Minerals Information.

Harrah HW. 1967. Rare earth concentration at Molybdenum Corporation of America. Deco Trefoil 9 -16.

Hedrick JB. 1999. Rare Earths 1, USGS Minerals Information.

Lapido F. 1984. Terras-raras no Brasil, 1º Edición, Electrónica Ed., Brasil.

Orrego P. 1998. Estudio metalúrgico preliminar para la recuperación de elementos de tierras raras a partir de un mineral nacional radiactivamente anómalo, Informe Técnico, CCHEN, DMN, SGM, Santiago, Chile.

Orrego P. 2000. Estudio metalúrgico preliminar para la recuperación de Cerio y Lantano a partir de un mineral nacional radiactivamente anómalo en Tierras Raras, Informe Técnico, CCHEN, Departamento de Materiales Nucleares, Sección Geología y Minería, Santiago, Chile.

Sundaram CV. 1987. Química y metalurgia de extracción de metales de Tierras Raras y aplicaciones. Indira Gandhi Centre for Atomic Research 40: 457.

Sunur A, Saygi Z, Yildiz H. 1985. Recuperación y purificación de elementos de Tierras Raras y Torio. Turkish Journal of Nuclear Sciences 12: 5-12.

Swaminathan TW, Nair VR. 1989. Stepwise hydrochloric acid extraction of monazite hydroxides for the recovery of cerium lean rare earths, cerium, uranium and thorium, Rare earth extraction, Preparation and Applications 207-212.

The Humphreys Investment Co., 1970. The Humphreys Spiral Concentrator Closed Circuit Test Unit, Manual of Operating Instructions.

Vega PH. 2000. Obtención de un concentrado de Lantano y Cerio a partir de minerales nacionales. Tesis para optar al título de Ingeniero Ejecución en Metalurgia, Santiago de Chile.

Zamorano C. 2003. Estudio cinético de lixiviación ácida de un mineral de Davidita. Trabajo de titulación para obtener título de Ingeniero Civil en Metalurgia, Universidad de Santiago de Chile.