



Situación actual del mercado de tierras raras y su potencial en Chile

DEPP 15/2016

Resumen Ejecutivo

El grupo de los elementos de tierras raras (REE) está conformado por 17 elementos químicos de la tabla periódica, 15 de ellos pertenecen al grupo de los lantánidos (lantano a lutecio), además del itrio y el escandio. Estos elementos no son menos abundantes que el plomo o el oro, solo que es poco común encontrarlos en concentraciones suficientes como para que la extracción sea económicamente viable.

Las principales potencias mundiales consideran a algunos de estos elementos como estratégicos por sus diversas aplicaciones, las principales se relacionan a tecnologías modernas como la óptica, iluminación, pantallas LED, imanes permanentes y baterías portátiles. También se utilizan como catalizador en los procesos de refinamiento de petróleo, en la fabricación de cerámicas y en la industria militar, entre muchas otras aplicaciones. Los óxidos de tierras raras (REOs) más demandados son el de neodimio, praseodimio y disprosio para la confección de imanes permanentes usados en los generadores de turbinas eólicas.

La producción global de REOs el año 2015 fue de 124.000 toneladas, de las cuales un 85% se produjo en China. Este país tiene una marcada ventaja en el mercado gracias a su contexto geológico, ya que cuenta con los mayores yacimientos conocidos del mundo y, también, gracias a su fuerte desarrollo de tecnologías de procesamiento de REE y como el desarrollo de productos, esto permite que en el país se lleven a cabo todas las etapas de la cadena de valor.

En el año 2010, China disminuyó las exportaciones de REE en un 40%, lo cual generó una crisis de suministro y una abrupta alza de los precios. Ante este escenario, surgieron múltiples iniciativas que buscaban diversificar las fuentes de REE, buscando nuevos yacimientos, reevaluando residuos mineros e industriales, reciclando chatarra electrónica y buscando posibles sustitutos. Al término del 2014, China terminó los controles a la exportación de estos metales a instancias de la Organización Mundial de Comercio contra China, regulando los precios. Dado el fin de la burbuja de precios y como respuesta a la desaceleración de la economía china los precios registran una tendencia bajista, al igual que la mayoría de los metales, estabilizándose desde el segundo semestre del 2015.

Chile es un país que históricamente se ha enfocado en la minería del cobre, hierro, oro y plata, también litio, yodo y potasio, pero la minería de las tierras raras es, hasta la fecha, bastante desconocida en el país. Sin embargo se tienen antecedentes de algunas iniciativas en Chile para la extracción y procesamiento de tierras raras, lo que hace que sea relevante comenzar a generar información y análisis respecto a estos metales.

El Plan Nacional de Geología de SERNAGEOMIN busca hacer una primera aproximación a estos elementos, incorporándolos en su análisis de geoquímica de suelos. De los resultados disponibles a la fecha, se detectan ciertas zonas interesantes por su contenido de tierras raras que sugieren blancos de exploración para futuros prospectos de tierras raras.

El Proyecto Minero El Cabrito ubicado en la comuna de Penco, Cordillera de la Costa, VIII Región, es la iniciativa de REE más avanzada en Chile, corresponde a un yacimiento de arcillas adsorbentes que además cuenta con una planta piloto de procesamiento. Actualmente se encuentra en trámite la aprobación de su DIA.

También existen tres prospectos mineros de ENAMI y CChEN: Sierra Áspera, Cerro Carmen y Veracruz en la Cordillera de la Costa, III Región, con yacimientos de REE y uranio. Además se han analizado contenidos de tierras raras en depósitos de relave de la minería del cobre, arrojando interesantes resultados.

Entre los años 2010 y 2013, en respuesta al alza de los precios, se generaron altas expectativas respecto a este mercado y se impulsaron numerosas iniciativas que buscaban entrar en él, sin embargo, actualmente, con la regulación del mercado sumado a la disminución generalizada en los precios de los commodities, las perspectivas de este mercado son menos favorables que hace tres años. A pesar de esto, aún existen algunos elementos de tierras raras con mayor retorno como el praseodimio, neodimio y disprosio. En este contexto, al evaluar los prospectos y proyectos mineros, los elementos de REE no debieran considerarse como conjunto, sino que se deben evaluar los elementos individualmente.

Se reconoce en Chile un potencial geológico interesante de tierras raras, concentrados en la Cordillera de la Costa tanto en el norte (III Región) como en el sur (VII Región), el cual se debiera continuar explorando.

La implementación de proyectos de tierras raras en Chile representa oportunidades para el país como la diversificación de la minería ampliando la cartera de productos, además permite el desarrollo de proyectos mineros en regiones que no son tradicionalmente mineras. También, este tipo de proyectos son importantes para impulsar la mediana minería. Dentro de las dificultades que enfrentan los inversionistas de proyectos de REE en Chile, se identifican las exigencias ambientales vigentes, la inversión necesaria, la baja ley de los yacimientos en comparación con los yacimientos explotados en China y la poca experiencia de profesionales en materias de geología, extracción y procesamiento de tierras raras, esto sumado a que actualmente las tierras raras se encuentran en un ciclo de precios bajos afectadas al igual que la mayoría de los commodities.



Índice

Resumen Ejecutivo...	I
1. Introducción	1
1.1. Características generales de los elementos de tierras raras	1
1.1.1. Origen del término “tierras raras”	2
1.1.2. Abundancia en la corteza terrestre	2
1.1.3. Tierras raras livianas y pesadas.....	4
1.1.4. Propiedades de los REE.....	5
1.1.5. Usos de los REE	5
1.2. Ocurrencia de depósitos de REE	6
1.2.1. Minerales con REE.....	7
1.2.2. Cómo se concentran los elementos de tierras raras en la corteza terrestre	7
1.2.3. Depósitos de REE	8
1.3. Procesamiento	11
1.4. Impacto ambiental.....	13
1.5. Reciclaje	14
1.6. Recuperación de REE a partir de residuos industriales	14
1.7. Sustitutos	15
2. Mercado mundial de REE	16
2.1. Criticidad de los REE.....	16
2.2. Cotización de los REE en los mercados mundiales	20
2.3. Producción global	20
2.4. Demanda.....	22
2.5. Precios internacionales.....	28
2.6. Reservas.....	30
3. Antecedentes de depósitos de REE en Chile	32
3.1. Plan Nacional de Geología	32
3.2. Proyecto Minero El Cabrito.....	38
3.3. Prospectos Cerro Carmen, Sierra Áspera y Veracruz.....	39
3.4. REE en residuos mineros.....	40
3.5. Depósitos de óxidos de hierro-apatito	43

4. Comentarios Finales	44
5. Referencias	46
Anexos	48

Índice de figuras

Figura 1. Abundancia relativa de elementos en la corteza terrestre (escala logarítmica).	3
Figura 2. Tabla periódica de los elementos mostrando las tierras raras livianas (LREE) y las tierras raras pesadas (HREE).	4
Figura 3. Ubicación de las minas y faenas donde se explotan tierras raras, en rojo los puntos dónde se explotan y procesan los REE como mineral primario y en azul; como mineral secundario.	11
Figura 4. Esquema de las etapas de procesamiento de REE para cada mineral.	12
Figura 5. Cuadro de criticidad de materias primas según su importancia económica y el riesgo de suministro. Puntos en rojo muestran elementos de tierras raras.	17
Figura 6. Matriz de criticidad a mediano plazo para Estados Unidos (2015-2025).	18
Figura 7. Criticidad asignada por el gobierno francés a elementos del grupo de las tierras raras.	19
Figura 8. Evolución de la Producción mundial de Tierras Raras (toneladas de óxido).	20
Figura 9. Producción Global de Tierras Raras de los últimos 6 años (toneladas de óxidos).	21
Figura 10. Evolución de los tipos de yacimientos explotados de tierras raras a nivel mundial.	21
Figura 11. Evolución de la participación en la producción mundial de REO por países.	22
Figura 12. Comparación del Mercado de las Tierras Raras con otros Metales en el 2015.	22
Figura 13. Participación de China en la Demanda Mundial de Tierras Raras.	24
Figura 14. Demanda de tierras raras por países 2015 (REO).	24
Figura 15. Distribución de la demanda de Tierras Raras al 2015 en términos de volumen y valor para sectores industriales no finales.	25
Figura 16. Demanda estimada de Tierras Raras al 2020.	26
Figura 17. Participación de las tierras raras en términos de valor en el sector imanes permanentes.	27
Figura 18. Principales destinos de las Exportaciones de Tierras Raras de China.	28
Figura 19. Índice de precios de las Tierras Raras y principales hitos (% basados en precios de diciembre 2009).	29
Figura 20. Reservas Mundiales de óxidos de tierras raras (REOs).	30
Figura 21. Distribución de las reservas de elementos de tierras raras en China.	31
Figura 22. Interpolación de concentraciones de REE en Geoquímica de Sedimentos de la Hoja Arica (Baeza y otros, 2014), en rosado los máximos y en azul los mínimos.	34
Figura 23. Interpolación de concentraciones de tierras raras en Geoquímica de Sedimentos de la Hoja Pisagua (Astudillo y otros, 2014), en rosado los máximos y en azul los mínimos.	35
Figura 24. Interpolación de concentraciones de tierras raras en Geoquímica de Sedimentos de la Hoja Iquique (Lacassie y otros, 2012), en rosado los máximos y en azul los mínimos.	36



Figura 25. Concentraciones de los elementos de tierras raras en subcuencas en Geoquímica de Sedimentos de la Hoja La Serena (Lacassie y otros, en elaboración). En verde oscuro concentraciones altas y, en verde claro, concentraciones bajas.....	37
Figura 26. (a) Ubicación proyecto Minera El Cabrito (azul) y (b) ubicación sectores de extracción (naranja), disposición (gris) y de planta (verde) del proyecto.....	39
Figura 27. Contenido promedio de tierras raras y de cobre en relaves de la minería del cobre.....	41
Figura 28. Contenido de cada elemento de tierra rara en relaves de la minería del cobre en partes por millón....	42

Índice de tablas

Tabla 1. Listados de elementos que pertenecen al grupo de los elementos de tierras raras.	2
Tabla 2. Concentraciones de elementos en la corteza terrestre según Wedepohl (1995), a escala logarítmica.	3
Tabla 3: Principales Clasificaciones de las Tierras Raras según peso atómico, en rojo se destacan los elementos clasificados como críticos.	4
Tabla 4. Usos de cada elemento del grupo de las tierras raras.	5
Tabla 5. Principales minerales de mena de REE.....	7
Tabla 6. Yacimientos donde se extraen REE como mineral primario en el mundo, su ubicación, tipo de depósito y principal mineral de mena.	10
Tabla 7. Materias Primas identificadas como críticos por Comisión Europea.	17
Tabla 8. Pronóstico del equilibrio de mercado para LREE y HREE.	17
Tabla 9. Distribución promedio de cada elemento de tierras raras en 51 depósitos.	18
Tabla 10. Principales sectores económicos que utilizan tierras raras.....	23
Tabla 11. Demanda por elemento de Tierras Raras (en toneladas).....	26
Tabla 12. Usos de las Tierras Raras en Industrias Finales.	27
Tabla 13. Precios nominales de las principales tierras raras en US\$/kg (para otros REOs ver Anexos).	30
Tabla 14. Precios de óxidos de tierras raras en 2006, 2011 y 2016.	48



1. Introducción

El grupo de los elementos de tierras raras está conformado por 17 elementos químicos de la tabla periódica, 15 de ellos pertenecen al grupo de los lantánidos (lantano a lutecio), además del itrio (Y) y el escandio (Sc). A pesar de su nombre, realmente no son menos abundantes que el plomo o el oro, solo que es poco común encontrarlos en cantidades suficientes como para que la extracción sea económicamente viable.

Las aplicaciones de los elementos de tierras raras son muy amplias, los principales usos se relacionan a tecnologías modernas como la óptica, iluminación, pantallas LED, imanes permanentes y baterías portátiles. También se utilizan como catalizador en los procesos de refinamiento de petróleo, en la fabricación de cerámicas y en la industria militar, entre muchas otras aplicaciones.

El principal productor de tierras raras en la actualidad es China, con cerca del 85% de la producción mundial en 2015 (USGS, 2016), pero ya que estos elementos tienen propiedades muy específicas y son necesarios en objetos tecnológicos, se espera que su demanda aumente en los próximos años y que los países industrializados busquen nuevas fuentes.

Ante esta situación, han surgido diversas iniciativas en el mundo en búsqueda de nuevos yacimientos y apertura de nuevas minas, y por otra parte, iniciativas de reciclaje de aparatos electrónicos, recuperación de elementos a partir de residuos mineros, entre otras alternativas.

Aún no existen estudios que estimen el potencial en Chile para explotar estos elementos, sin embargo se tienen antecedentes de la presencia de estos en concentraciones anómalas que es necesario analizar. En este contexto el presente estudio se propone revisar el estado actual del mercado internacional de tierras raras y compilar antecedentes que den una idea del potencial que tiene Chile para entrar a este mercado.

1.1. Características generales de los elementos de tierras raras

Los elementos de tierras raras (ETR), en inglés *rare earth elements* (REE), son un grupo que incluye a los 15 elementos de la tabla periódica conocidos como lantánidos (desde el lantano al lutecio; $Z=57$ a $Z=71$ ¹) además del escandio ($Z=21$) y el itrio ($Z=39$), ambos con propiedades físico-químicas similares a los lantánidos (Ver Tabla 1).

¹ "Z" corresponde al número atómico, es decir el número de protones presentes en el núcleo de un átomo.

Tabla 1. Listados de elementos que pertenecen al grupo de los elementos de tierras raras.

Lantánidos					
Lantano	(₅₇ La)	Cerio	(₅₈ Ce)	Praseodimio	(₅₉ Pr)
Neodimio	(₆₀ Nd)	Prometio²	(₆₁ Pm)	Samario	(₆₂ Sm)
Europio	(₆₃ Eu)	Gadolinio	(₆₄ Gd)	Terbio	(₆₅ Tb)
Disprosio	(₆₆ Dy)	Holmio	(₆₇ Ho)	Erbio	(₆₈ Er)
Tulio	(₆₉ Tm)	Yterbio	(₇₀ Yb)	Lutecio	(₇₁ Lu).
Otros					
Escandio	(₂₁ Sc)	Itrio	(₃₉ Y)		

1.1.1. Origen del término “tierras raras”

La expresión “tierras raras” no proviene de su escasez en la superficie terrestre, este término fue adoptado por científicos en los años 40’s ya que los procesos metalúrgicos necesarios para separar las especies de metal individuales son complejos, y la tecnología de la época no permitía la producción a gran escala de estos. En consecuencia, los metales lantánidos u óxidos metálicos (en inglés *rare earth oxides*, REOs) eran difíciles de obtener y por lo tanto se consideraban raras (Gupta y Krishnamurthy, 2004). La palabra “tierras” se debe a que así fue como llamaron a los óxidos que contienen estos elementos.

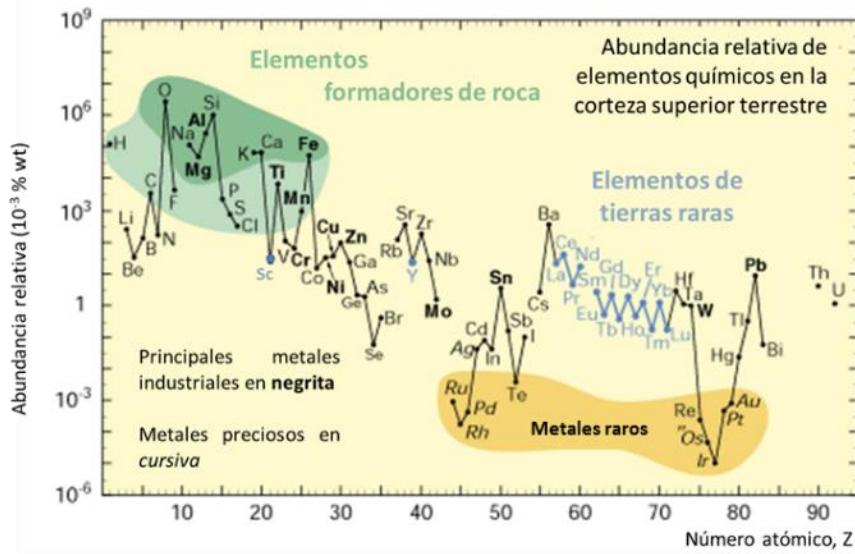
1.1.2. Abundancia en la corteza terrestre

A pesar de su nombre, “tierras raras”, no son elementos poco abundantes en la corteza terrestre comparándolos con otros metales. Por ejemplo el cerio (Ce), lantano (La) y neodimio (Nd) son más abundantes que el plomo (Pb) en la corteza y todas las tierras raras, con excepción del prometio (Pm) que es el elemento más escaso del grupo, son más abundantes que cualquiera de los metales preciosos (Au, Ag, Rh, Pd y Pt) o el mercurio (Hg) (Ver Figura 1 y Tabla 2). Además Los REE con número atómico par son hasta siete veces más abundantes en la corteza terrestre que las con número atómico impar (Castor y Hendrick, 2006).

El prometio (Pm) se produce artificialmente como subproducto de las reacciones de fisión de uranio (EPA, 2012). Se han detectado cantidades mínimas de prometio en la naturaleza (10^{-18} ppm en la corteza terrestre), este valor se debe a que este elemento no tiene isótopos estables (su isótopo más estable, ^{145}Pm , tiene una vida media de 17,7 años).

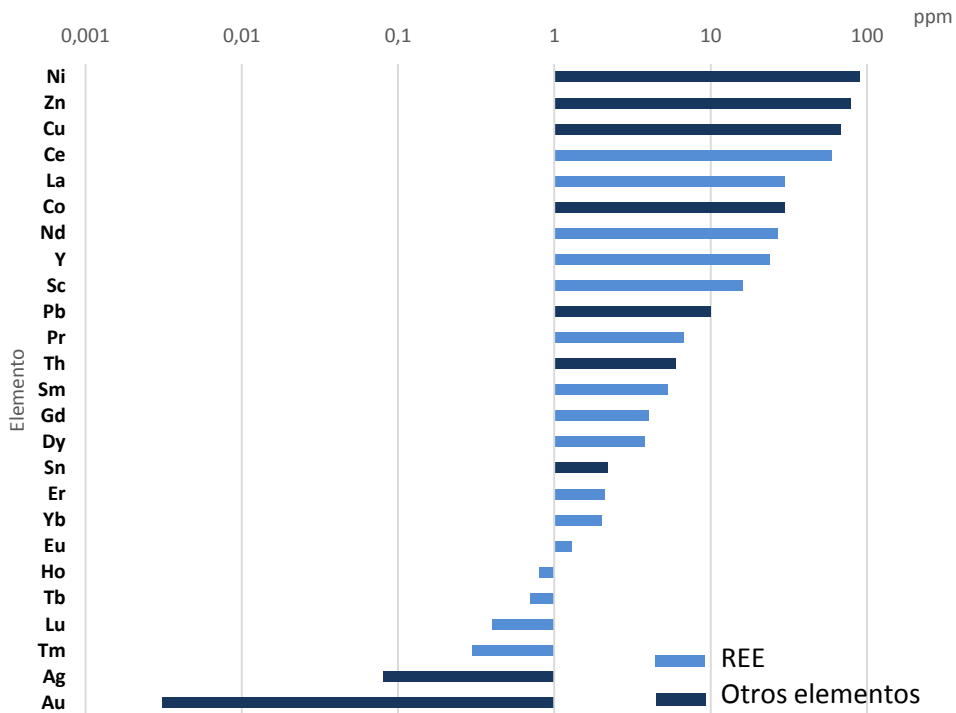
² Único elemento de tierras raras de origen artificial.

Figura 1. Abundancia relativa de elementos en la corteza terrestre (escala logarítmica).



Fuente: Modificado de USGS, Rare Earth Elements—Critical Resources for High Technology (2002).

Tabla 2. Concentraciones de elementos Fe en la corteza terrestre según Wedepohl (1995), a escala logarítmica.



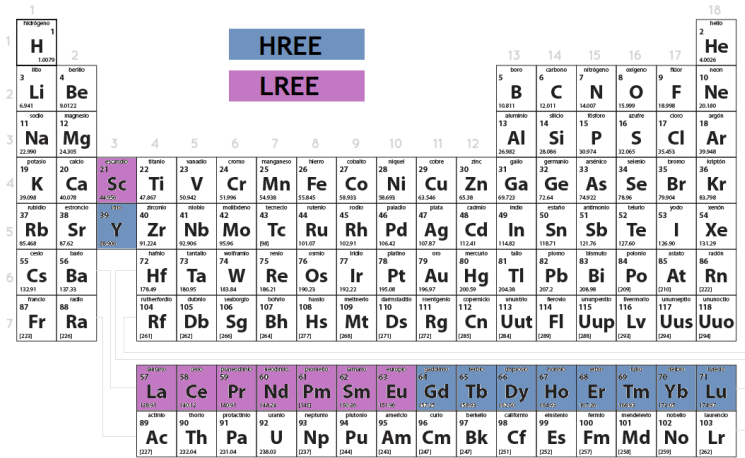
Fuente: Cochilco basado en Wedepohl (1995).



1.1.3. Tierras raras livianas y pesadas

Los lantánidos con menor número atómico son generalmente más abundantes que los con mayor número atómico, de esto surge la subdivisión de los elementos de tierras raras en dos grupos: tierras raras livianas (en inglés *light rare earth elements*, LREE), relativamente más abundantes, y tierras raras pesadas (*heavy rare earth elements*, HREE) (Figura 2). El itrio, a pesar de tener un número atómico menor que las LREE, es considerado del grupo de la HREE por sus similitudes en las propiedades físico-químicas y por tender a presentarse junto a ellas en la naturaleza.

Figura 2. Tabla periódica de los elementos mostrando las tierras raras livianas (LREE) y las tierras raras pesadas (HREE).



Fuente: Schüler y otros (2011).

Algunos investigadores consideran la existencia de un grupo intermedio comprendido por el samario, europio, gadolinio y terbio llamado "tierras raras intermedias" y otras fuentes incluyen una cuarta según nivel de criticidad, lo cual se base en el riesgo de suministro e importancia para el desarrollo de energías limpias que tenga cada una de ellas (Tabla 3).

Tabla 3: Principales Clasificaciones de las Tierras Raras según peso atómico, en rojo se destacan los elementos clasificados como críticos.

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

Fuente: Cochilco basado en USGS y TMR³.

³ Technology Metals Research.



1.1.4. Propiedades de los REE

Los REE aparecen juntos en la naturaleza ya que tienen propiedades físico químicas similares: todos son iones trivalentes (estado de oxidación +3), con excepción del Ce^{+4} y el Eu^{+2} y tienen radios iónicos similares. Esta similitud permite la sustitución de los REE entre sí en varias redes cristalinas, por esto se presentan múltiples elementos de este grupo en un mismo mineral.

Este conjunto de elementos químicos tienen propiedades magnéticas, ópticas, conductivas, específicas que los hacen únicos, y por lo mismo tan requeridos por la industria.

1.1.5. Usos de los REE

Los usos de los elementos de tierras raras son múltiples y van desde usos en cerámicas y pigmentos a piezas para equipos de alta tecnología (ver Tabla 4).

Los REE se usan para hacer imanes permanentes ocupados en motores, generadores, discos duros, micrófonos, parlantes, refrigeración magnética y equipamiento militar. También se generan aleaciones metálicas con contenidos de tierras raras para la industria aeroespacial, baterías portátiles, entre otros. Los óxidos de tierras raras (REOs) también se utilizan como catalizadores en procesos químicos (e.g. refinación de petróleo, tratamiento de aguas) y también; en la elaboración de cerámicas y vidrios.

Tabla 4. Usos de cada elemento del grupo de las tierras raras.

Elemento	Aplicaciones
Escandio	Aleaciones metálicas para industria aeroespacial, para equipos deportivos y equipos de defensa.
Itrio	Cerámicas, aleaciones metálicas, láseres, eficiencia de combustibles, comunicación por microondas para industria de satélites, televisores de color, monitores de ordenador, sensores de temperatura.
Lantano	Baterías, catalizadores en refinación de petróleo, baterías de vehículos eléctricos, cámaras digitales de alta tecnología, cámaras de video, baterías de portátiles, películas de rayos X, láseres.
Cerio	Catalizadores, aleaciones de metales, pulido (de vidrio, espejos, placas frontales de televisión, cristales ópticos, microprocesadores de silicio, lentes), baterías.
Praseodimio	Mejora resistencia a la corrosión de imanes, pigmento, reflectores, lentes para señales de aeropuertos, filtros fotográficos.
Neodimio	Imanes de alta potencia para ordenadores portátiles, motores de vehículos híbridos, generadores de turbinas de viento; láseres; catalizadores para fracturamiento hidráulico, pulido de vidrios..
Prometio	Fuente de radiación beta, catalizadores para fracturamiento hidráulico.
Samario	Imanes de alta temperatura, barras de control de reactores.

Europio	LCDs, luces fluorescentes, aditivos para el vidrio.
Gadolinio	agente de contrastes para formación de imágenes por resonancia magnética, aditivo para vidrios
Terbio	Baterías, fósforos para tubos de TV y lámparas fluorescentes.
Disproσιο	Imanes de alta potencia, láseres, baterías.
Holmio	Imanes más poderosos conocidos.
Erbio	Láseres, colorante de vidrio.
Tulio	Imanes de alta potencia.
Yterbio	Tecnología de fibra óptica, paneles solares, aleaciones metálicas (acero inoxidable), láseres, fuente de radiación para unidades de rayos X portátiles
Lutecio	Fósforo de rayos X.

Fuente: Cochilco basado en EPA (2012), Castoy Hendrick (2006) y EURARE.

1.2. Ocurrencia de depósitos de REE

A pesar de no ser poco abundantes, es poco común encontrar elementos de tierras raras en concentraciones suficientes como para que la extracción sea económicamente viable. Los REE tienen baja tendencia a concentrarse en depósitos minerales explotables, en consecuencia, la mayor parte del suministro mundial proviene de sólo unas pocas fuentes.

Los elementos de tierras raras no se presentan en la naturaleza como elementos nativos, como sí lo hacen otros metales (e.g. oro, cobre o plata), en cambio, se presentan como componentes, menores o mayores, de ciertos minerales.

El itrio ocurre típicamente en yacimientos con concentraciones económicas junto con los lantánidos mientras que el escandio, pese a ser químicamente similar a los lantánidos y frecuentemente presentarse en los depósitos de tierras raras, sus concentraciones económicas se generan en condiciones geológicas diferentes a los yacimientos de itrio y lantánidos.



1.2.1. Minerales con REE

Los REE se encuentran en altas concentraciones en varios minerales, los más importantes para la explotación económica son (Tabla 5):

Tabla 5. Principales minerales de mena de REE.

Grupo	Mineral	Fórmula química
Carbonatos	Bastnasita	$(Ce, La)(CO_3)F$
	Parisita	$Ca(Ce, La)_2(CO_3)_3F_2$
	Cebaita	$Ba_3(Ce, Nd)_2(CO_3)_5F_2$
	Huanghoita	$Ba(Ce, La, Nb)(CO_3)_2F$
Fosfatos	Monacita	$(Ce, La, Nd, Th)PO_4$
	Xenotima	YPO_4
	Apatito	$Ca_5(PO_4)_3(F, Cl, OH)$
Silicatos	Cerita	$(Ce, Ca)_9(Mg, Fe)(SiO_4)_3(HSiO_4)_4(OH)_3$
	Gadolinita	$(Ce, La, Nd, Y)_2FeBe_2[O_4SiO_4]_2$
	Allanita	$(Ca, Ln)_2(Al, Fe)_3(SiO_4)_3(OH)$
Óxidos	Euxenita	$(Ln, Ca, U, Th)(Nb, Ta, Ti)_2O_6$
	Loparita	$(Na, Ce, Ca, Sr, Th)(Ti, Nb, Fe)O_3$

Los minerales de bastnasita y monacita contienen principalmente LHREE, con una mayor concentración de HREE en la monacita (Kanazawa y Kamitani, 2006). Por su parte la xenotima es la principal fuente de HREE en el mundo.

1.2.2. Cómo se concentran los elementos de tierras raras en la corteza terrestre

En los sistemas magmáticos⁴, el gran tamaño de los iones de los elementos del grupo de las tierras raras impide que entren en las redes cristalinas de los minerales formadores de roca más comunes (silicatos como el feldespato, piroxeno y anfíbola), donde entran con facilidad elementos de menor tamaño como el Si, Al, Fe, Ca, Na, Mg, K, entre otros. En consecuencia, a medida que cristalizan los minerales más comunes, la mayor parte de los elementos de tierras raras tienden a permanecer en la fase fluida, aumentando la concentración de estas. En las últimas etapas de cristalización del magma, el fluido restante tiene altas concentraciones de tierras raras, lo que permite la cristalización de minerales de tierras raras. Los elementos químicos de este grupo, al ser tan parecidos, pueden sustituirse entre ellos en las estructuras cristalinas de los minerales, y varios elementos de tierras raras pueden ocurrir juntos en un mismo mineral.

⁴ Procesos relacionados a grandes volúmenes de roca fundida (magma) en la corteza terrestre a altas temperaturas.

Posterior a esto, procesos de superficiales de meteorización o de erosión producen la concentración de elementos de tierras raras, ya sea por medios químicos (meteorización) o físicos (erosión).

1.2.3. Depósitos de REE

Los depósitos asociados a los elementos de tierras raras son pocos y muy diversos, es por esto que su clasificación se hace difícil y algunos tipos de yacimientos no tienen más que un ejemplo conocido, además, algunos yacimientos tienen sobreimposición de procesos, por lo que caben en más de una categoría. Los principales depósitos explotados durante los últimos años se encuentran en China, además hay en Rusia, Australia, USA y Kasajistán (Figura 3 y Tabla 6).

A continuación se describen los principales yacimientos de tierras raras conocidos.

Rocas ígneas alcalinas

Las rocas ígneas alcalinas⁵ se forman a partir de procesos geológicos que extraen y concentran elementos que no encajan en la estructura de los minerales comunes formadores de rocas. Existen magmas alcalinos extraordinariamente raros y enriquecidos en elementos tales como Zr, Nb, Sr, Ba, Li y elementos de tierras raras. En su ascenso a través de la corteza sufren cambios adicionales, generándose una gran diversidad de rocas, algunas de ellas enriquecidas en elementos económicos.

Las concentraciones económicas de minerales que contienen tierras raras ocurren en algunas rocas alcalinas, skarn⁶ y reemplazo de carbonatos asociados con intrusiones alcalinas, vetas y diques cortando complejos ígneos alcalinos y rocas circundantes y también en los suelos y otros productos de meteorización de las rocas alcalinas (depósitos residuales).

Los yacimientos de este tipo son empobrecidas en sílice respecto al sodio, potasio y calcio, pero ricas en HREE, Y y Zr. Un ejemplo de yacimiento de este tipo es Lovozero en Rusia, asociado a intrusiones alcalinas ultrabásicas⁷(USGS).

Carbonatitas

Las carbonatitas son rocas ígneas poco comunes derivadas de magmas ricos en carbonatos⁸ en contraste a las rocas ricas en sílice (SiO₂) y se caracterizan, además, por ser ricas en LREE. En estas rocas, los carbonatos, principalmente calcita y dolomita, corresponden a más del 50% de la composición de las rocas. El principal mineral contenedor de tierras raras presente es la bastnasita.

⁵ Rocas de origen magmático con composiciones químicas pobres en sílice (SiO₂) y ricas en álcalis (Na₂O+ K₂O).

⁶ Depósitos formados por reemplazo metasomático, caracterizados por presentar minerales calcosilicatados (silicatos cálcicos como wollastonita, granate grosularia y piroxeno diópsido).

⁷ Ultrabásico se refiere a una roca compuesta principalmente por minerales ferromagnesianos (silicatos con hierro y/o magnesio) y un contenido de sílice (SiO₂) bajo, inferior al 45% del peso de la roca.

⁸ Minerales formadas por el anión CO₃²⁻, por ejemplo: calcita CaCO₃, dolomita CaMg(CO₃)₂, siderita FeCO₃, magnesita MgCO₃.

Algunos ejemplos son los depósitos Mountain Pass en USA y Maoniuping y Xishan en China, dónde la mineralización se encuentra en vetas. También el depósito Mount Weld en Australia corresponde a una zona alterada que sobreyace a una carbonatita.

Óxidos de hierro-REE

También existen depósitos de óxidos de hierro (principalmente magnetita) con altos contenido de tierras raras. Estos depósitos pueden ser dos subtipos: óxidos de hierro-cobre-oro (IOCG: *Iron oxide-copper-gold deposit*) y magnetita-apatito (IOA: *Iron oxide-apatite*). Los minerales con REE presentes en estos son el apatito, monacita, allanita, xenotima y fluorocarbonatos.

Se han identificado numerosos depósitos IOCG en el mundo: Olympic Dam en Australia; Bayan Obo en China, Candelaria y Mantoverde en Chile. Ejemplos del segundo grupo, IOA, son Kiruna en Suecia y Romeral, Algarrobo y Los Colorados en Chile. Con excepciones como Olympic Dam y Kiruna, aún no existe suficiente información respecto al contenido de tierras raras en estos depósitos.

A pesar de que se conocen las altas concentraciones de elementos de tierras raras en estos yacimientos, aún no se ha desarrollado un procedimiento económico para recuperarlos.

Pegmatitas graníticas

Las pegmatitas son un grupo de rocas ígneas de grano muy grueso. El grupo de pegmatitas con mayor contenido de elementos es la familia NYF (enriquecidas en Nb, Y, F), son de composición granítica y se ubican generalmente en la periferia de grandes intrusivos graníticos. Estos depósitos no han sido explotados para extracción de tierras raras, pero sí de otros minerales industriales como el feldespato.

Un ejemplo de este tipo de pegmatitas es del depósito Strange Lake en Canadá (Linnen y otros, 2012), proyecto aún en etapa de factibilidad, con leyes de hasta 9330 ppm de REOs. Con excepción de este último, las pegmatitas de esta familia son cuerpos generalmente pequeños y el interés económico es solo para coleccionistas de minerales.

Depósitos residuales

Estos depósitos se forman por la meteorización profunda de rocas ígneas, formando un único perfil de suelo de decenas de mREEos. El proceso de formación de suelos concentra minerales pesados, formando una capa enriquecida en metales sobre la roca no meteorizada que subyace al suelo. Cuando un depósito de elementos de tierras raras de baja ley, como carbonatitas o rocas ígneas peralcalinas, sufre este tipo de meteorización, se forma una capa enriquecida en REE con concentraciones económicas. Estas condiciones suelen darse en suelos lateríticos (ricos en hierro y aluminio) y en bauxitas (suelos arcillosos ricos en aluminio).

Arcillas iónicas

Corresponden a grandes depósitos de arcillas con bajas concentraciones de REE(0,04-0,25%REOs) que se forman en zonas tropicales con precipitaciones medias a altas. El proceso de formación de estos yacimientos comienza con la meteorización de granitos, dando origen a suelos ricos en arcillas sobre el granito. A la vez, las aguas subterráneas lixivian los elementos de tierras raras de las rocas graníticas, las movilizan, hasta que se fijan débilmente, por adsorción iónica, a las arcillas formadas.



A pesar de su baja concentración de elementos de tierras raras son económicamente explotables ya que el proceso de aislamiento de las REE es más sencillo, utilizando ácidos débiles, y los costos de operación son más bajos.

Los ejemplos más conocidos de este tipo de depósitos son las minas de tierras raras del sur de China (South China Clays).

Placeres o paleo Placeres de minerales pesados

Este fue el tipo de yacimientos de tierras raras más importante para la extracción económica hasta los 60's. Corresponden a depósitos de playa actuales o antiguos en los que los minerales pesados fueron mecánicamente separados y acumulados. Los minerales de mena son la monacita y, en menor medida, xenotima, los cuales generalmente se recuperan como subproducto de la extracción de minerales pesados como ilmenita (FeTiO_3), rutilo (TiO_2) y circón (ZrSiO_4). Estos yacimientos son fuente de LREE y torio (Th).

Algunos ejemplos son Beihai en China, Chavra en India y Buena en Brasil.

Depósitos en vetas

Corresponden a pequeños depósitos de vetas con carbonatos y/o fosfatos de REE (principalmente monacita y bastnasita). En el mundo han sido explotadas en África y China. Los ejemplos más conocidos de estos depósitos son Maoniuping y Xishan en China.

Tabla 6. Yacimientos donde se extraen REE como mineral primario en el mundo, su ubicación, tipo de depósito y principal mineral de mena.

Depósitos	Ubicación	Tipo de depósito	Mineral
Maoniuping	China; Sishuan.	Depósito en vetas (carbonatos)	Bastnasita
Xishan	China; Shandong.	Depósito en vetas (carbonatos)	Bastnasita
Bayan Obo	China; Mongolia Interior.	Óxidos de hierro-REE-Nb	Bastnasita y monacita
South China Clays	China; Guangxi, Jiangxi, Juandong y Hunan.	Arcillas iónicas	Arcillas
Beihai	China; Guangxi	Placer con xenotima	Monacita
Mountain Pass	EE.UU.; California	Depósito en vetas (carbonatos)	Bastnasita
Lovozerkoye	Rusia; Oblast de Murmansk	Complejo peralcalino	Loparita
Mt Weld	Australia; Western Australia	Carbonatita lateritizada	Bastnasita

Figura 3. Ubicación de las minas y faenas donde se explotan tierras raras, en rojo los puntos dónde se explotan y procesan los REE como mineral primario y en azul; como mineral secundario.



Fuente: Cochilco basado en SNL Metals & Mining.

1.3. Procesamiento

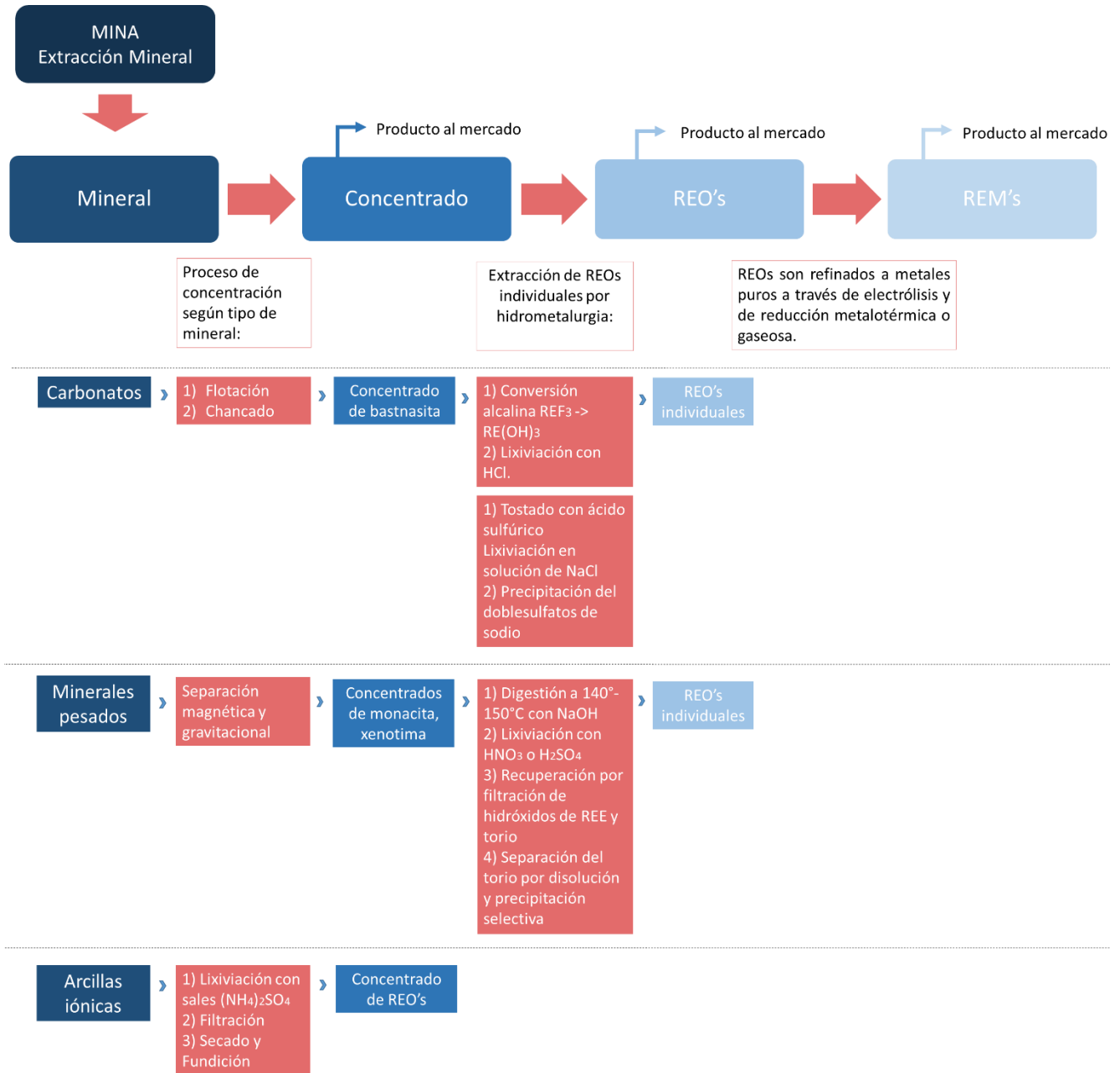
El procesamiento de las tierras raras es bastante más complejo que los procesos más conocidos en Chile para el cobre, dónde pocos minerales concentran toda la mena (e.g. calcopirita) y solo se deben separar estos minerales para obtener un concentrado y finalmente el metal a partir de él. En el caso de las tierras raras, los depósitos pueden contener varios minerales con elementos de este grupo y, a su vez, los minerales en los concentrados se pueden contener varios elementos de interés, los que deben separarse uno a uno por cientos de procesos químicos.

Hasta la fecha, la producción de óxidos de tierras raras ha provenido de yacimientos con un solo mineral de interés, tales como bastnasita (en Mountain Pass y Bayan Obo), monacita (en Behiai, Chavra) o minerales de arcilla (en South China Clays).

Para cada mineral existe un proceso diferente, pero en términos generales, el procesamiento consiste en una primera etapa de concentración en la que los minerales pasan a concentrados, una segunda etapa de formación de óxidos de tierras raras, los cuales pueden ser comercializados como óxidos (lo más común), o bien, pasar por una tercera etapa de procesamiento en la que se obtienen metales puros de elementos de tierras raras.



Figura 4. Esquema de las etapas de procesamiento de REE para cada mineral.



Fuente: Cochilco basado en Zhi Li y Yang (2014) y Peelman y otros (2014).



1.4. Impacto ambiental

Existen riesgos ambientales asociados a la extracción y al procesamiento de los REE, la magnitud de estos riesgos es muy variable y depende de la naturaleza del depósito, los minerales de los que se extraigan los elementos, los minerales de ganga presentes en el depósito y la toxicidad de los contaminantes en los residuos mineros. Durante la extracción y procesamiento se producen emisiones al aire (material particulado fino con posible contenido de metales y elementos radioactivos) y emisiones de metales radioactivos, ácidos y turbidez hacia el agua. Otro tema importante es la contaminación por amonio: la lixiviación in-situ con adsorción iónica de REE utiliza grandes cantidades de sulfato de amonio, lo cual queda en las aguas de descarte (Wübbecke, 2013). Se estima que para producir una tonelada de toxido de tierras raras por adsorción iónica, se remueven 300 m² de vegetación y suelo, se generan 2.000 toneladas de relaves y 1.000 toneladas de aguas de descarte con altas concentraciones de amonio y metales pesados. Cuando el proceso de adsorción iónica se hace in situ, la remoción de vegetación es menor, pero se incrementan los impactos de contaminación de agua subterránea, erosión y colapso de la mina, además, la remediación del sitio post actividad minera se hace mucho más difícil por las contaminantes agregados (Yang, y otros, 2013).

El principal riesgo ambiental está asociado al colapso de relaves, ya que se trata de residuos radioactivos ricos en torio, uranio, metales pesados, ácidos y fluoruros. Asociado también a los relaves existe el riesgo a la contaminación de aguas superficiales o subterráneas por drenaje y de contaminación atmosférica por acción del viento.

La principal impureza perjudicial en los minerales de REE es el torio (Th), elemento radioactivo, producido durante la extracción y procesamiento, contenido naturalmente en minerales de REE, especialmente en la monacita. Este mineral contiene entre 4 a 10% de ThO₂, mientras que la bastnasita contiene menos de 1000 ppm en Mountain Pass e incluso más baja en China (Mariano 1989a). El costo de manejo y desecho de materiales radiactivos es un obstáculo importante para la extracción económica de los minerales radioactivos más ricos en REE.

Caso chino

En el contexto ambiental, resulta interesante analizar el caso de China ya que es el país con mayor experiencia la materia. Las autoridades ambientales de China han encontrado altos niveles de radioactividad y de contaminación en los tranques de relaves y en las aguas cercanas a faenas mineras de REE, tales como las fábricas Baotou (procesadoras del mineral extraído de Bayan Obo), donde la contaminación ha llegado al río Amarillo (más conocido como Huang He). Autoridades de Baotou han declarado que si el tranque de relaves llegara a colapsar amenazaría la seguridad de agua potable del poblado. No obstante, debido a los altos niveles de radiación, los pobladores han declarado que en los últimos años han aumentado los casos de cáncer y ha disminuido la productividad de los cultivos, es decir, incluso si el tranque no falla, el medio ambiente se ve afectado por dispersión de contaminantes a través del viento y el drenaje (Wübbecke, 2013).

El vice ministro de China Zhu Zhigang ha declarado que en los lugares donde operan las minas ya niquiera crece la hierba, y si la situación no mejora, la producción de tierras raras no es sustentable. Por otro lado, el vice ministro Su Bo, hace notar que otras minas extranjeras han cerrado por problemas de contaminación ambiental, mientras que China ha abastecido el 90% de la demandada a expensas de una severa contaminación ambiental del país (Wübbecke, 2013).

1.5. Reciclaje

Dado un mercado limitado y una alta concentración de la producción en China, diversos países desarrollados presentan riesgos de suministro de REE. Es por esto que existen diversas iniciativas e investigaciones enfocadas en desarrollar métodos efectivos y económicos de reciclaje. Las faenas de reciclaje más comunes son la obtención de REE a partir de lámparas de fósforos, imanes permanentes, baterías NiMH (*nickel metal hibride*), entre otros (Biennemans y otros, 2013).

Los principales minerales objetivos del reciclaje de REE son el disprosio y el neodimio ya que se espera que su demanda aumente en 700 y 2600% respectivamente en los próximos 25 años (estimado por Alonso y otros, 2012) y son esenciales para el desarrollo de las energías limpias.

Además existe un “problema de balance” (Elshkaki y Gaerdel, 2014) respecto a la extracción primaria de elementos más escasos pero con alta demanda como el disprosio o el neodimio, ya que esta actividad produce una sobreoferta de metales más abundantes, como lantano y cerio, y, en respuesta a esta situación, el reciclaje de neodimio ayudaría a disminuir la cantidad de mineral que debe ser extraído en minería primaria y a la vez satisfacer la demanda por los metales.

El reciclaje de tierras raras no es un proceso sencillo como el reciclaje de plástico o de vidrio, esto debido a que el contenido de elementos de tierras raras en los productos siempre es bajo y extraerlos de ellos se hace a través de procesos complejos de muchas etapas.

Otra dificultad para el reciclaje de tierras raras es la disminución del tamaño de los equipos tecnológicos que usan REE los últimos años (smartphones, laptops, etc), que produce una disminución en los volúmenes de material disponible para el reciclaje. Sumado a esto, no existen campañas significativas de recolección de chatarra electrónica, por lo que el suministro de material no está asegurado para las compañías que realizan esta labor.

Una buena opción para el reciclaje de materiales con REE son los magnetos utilizados en las turbinas eólicas, ricas en disprosio y neodimio, ya que representan una fuente de grandes volúmenes en un solo lugar, lo que asegura el suministro de material. Como las turbinas eólicas tienen una vida útil de 20-30 años, en la actualidad aún no hay material disponible para hacerlo, pero es importante de tener en cuenta a futuro.

1.6. Recuperación de REE a partir de residuos industriales

También han surgido iniciativas que buscan reprocesar residuos industriales y mineros para recuperar los elementos de tierras raras contenidas en ellos (Biennemans y otros, 2015).

Un ejemplo de esto es la recuperación de estos elementos a partir de fosfoyeso, un residuo de la producción de ácido fosfórico, del cual, a través de un proceso de lixiviación seguido de sucesivas filtraciones y calcinaciones, se puede recuperar un importante porcentaje de REE.

Los residuos de la extracción de aluminio a partir de bauxitas son otro ejemplo, el proceso de concentración de aluminio produce un residuo enriquecido en REE, en torno al doble de su contenido en la roca original.

También se ha planteado la posibilidad de reprocesar los relaves tanto de minería primaria de tierras raras, como de relaves de minería de otros minerales. Por ejemplo, los relaves de Mountain Pass tienen aún entre 3-5% de



REOs, en Bayan Obo los procesos son poco eficientes y solo recuperan el 10% de los REOs, dejando el otro 90% en los relaves.

Relaves de minería primaria de otros minerales pueden resultar atractivos, sobre todo los que contengan material extraído de yacimientos de hierro con presencia de apatito, ya que en el interior de los cristales de apatito, o en sus microfracturas crecen pequeños cristales de monacita, bastnasita y/o xenotima.

También es posible encontrar altos contenidos de REE en relaves de minería de uranio, titanio y estaño. El escandio también puede estar presente en relaves del procesamiento de tungsteno

Por último, cabe destacar que existen tecnologías para extraer elementos de tierras raras a partir de cenizas de chimeneas de carbón, con un proceso simple de lixiviación ácida. Si bien se considera económicamente viable la extracción de tierras raras directamente del carbón, siempre y cuando contenga leyes superiores a 800-900 ppm, tratar las cenizas es más simple y no con lleva costos de extracción y chancado por lo tanto podría ser económicamente viable con leyes aún más bajas (Elsevier, 2014).

1.7. Sustitutos

Ante la escasez de tierras raras en el mercado y la alta demanda de estos productos para el desarrollo de nuevas tecnologías y de las energías limpias, desde aproximadamente el año 2011 se han desarrollado numerosos proyectos de investigación que buscan sustituir estos elementos pero que, hasta la fecha, presentan pocos resultados que proporcionen soluciones convenientes.

Entre los programas para sustitución de algunos elementos, LumiSands anunció el desarrolló la tecnología *silicon quantum dot* (SiQD) que es una alternativa a los fósforos de REE utilizados en aplicaciones LED. Por su parte, Showa Denko⁹ desarrolló un nuevo imán permanente que requiere mínimas cantidades de disprosio.

Para sustituir los imanes permanentes utilizados en los generadores de las turbinas eólicas y en baterías de vehículos eléctricos o híbridos, que requieren cantidades de disprosio y neodimio, se han buscado sustitutos. Las baterías de litio, por ejemplo, pueden sustituir a las baterías que usan imanes permanentes.

En el caso de las turbinas eólicas, se pueden utilizar generadores de inducción, que no requieren imanes, no obstante la eficiencia energética en los generadores que utilizan imanes permanentes es más alta (Elsevier, 2014).

⁹ Empresa japonesa de tecnologías químicas.



2. Mercado mundial de REE

2.1. Criticidad de los REE

Las principales potencias mundiales como Estados Unidos, Alemania, Francia y Japón consideran a algunos de estos elementos como estratégicos por diversos motivos como su uso en la industria y sector de tecnología. Para Estados Unidos, su utilización en la industria de armamento es un factor relevante también y otras naciones con potencial minero para explotar tierras raras como Canadá ven estos metales como una fuente importante de desarrollo económico.

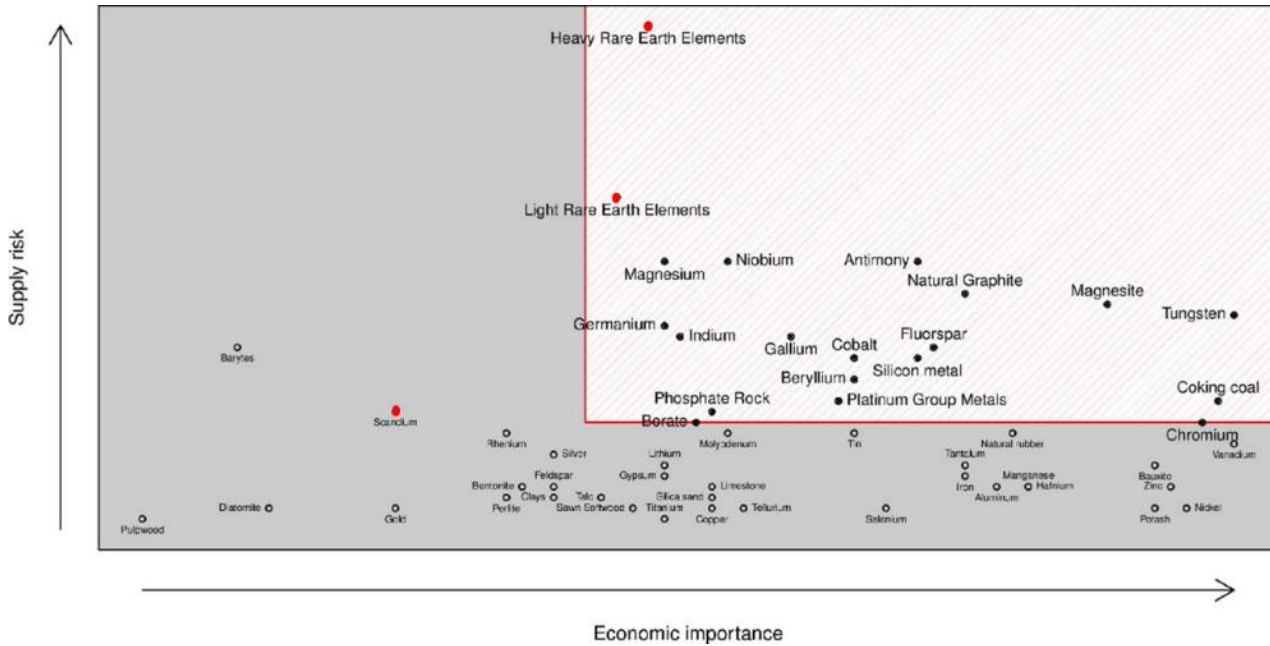
A continuación se exponen por países los elementos de las tierras raras que son considerados críticos y sus principales razones. Cabe destacar que la mayoría de los análisis de criticidad fueron realizados entre el 2011 y 2014, período donde las tierras raras tenían pronósticos de déficit en la oferta y mejores perspectivas de precios, escenario que no se ha dado en la actualidad, salvo para un grupo menor de metales de este grupo como por ejemplo el neodimio, praseodimio y disprosio.

Unión Europea

Desde el año 2010 la Comisión Europea trabaja definiendo un listado de las materias primas críticas para la Unión Europea según su importancia económica y el riesgo de suministro del mismo. Para este bloque de países, según lo consignado en el informe “Report On Critical Raw Materials for the EU” de mayo 2014, las materias primas son fundamentales para la economía, el crecimiento y el empleo en Europa por lo que es importante asegurar su acceso sostenible de aquellas materias primas consideradas como críticas de acuerdo a los características: riesgo de suministro e importancia económica. De las 54 materias primas consideradas en este reporte, tres de ellas contenían a los elementos de tierras raras: Sc, LREE (La, Ce, Pr, Nd, Sm) y HREE (Eu, Gd, Tb, Dy, Er, Y, Ho, Er, Tm, Yb, Lu). De estas 54 materias primas, la Comisión Europea consideró a 20 de ellas bajo el concepto de críticas, entre ellas las HREE y LREE, siendo las primeras de mayor grado de criticidad que las segundas debido a su alto riesgo de suministro (Ver Figura 5 y Tabla 7). El escandio por su parte se consideró no crítico. Según este reporte el aumento de la demanda anual hasta el año 2020 es de aproximadamente 8% para las HREE y de cerca de 6% para las LREE.



Figura 5. Cuadro de criticidad de materias primas según su importancia económica y el riesgo de suministro. Puntos en rojo muestran elementos de tierras raras.



Fuente: Comisión Europea.

Tabla 7. Materias Primas identificadas como críticos por Comisión Europea.

Antimonio	Berilio	Boratos	Cromo	Cobalto	Carbón de Coque	Fluorita
Galio	Indio	Germanio	Magnesita	Magnesio	Grafito	Niobio
Fosforita	HREE	LREE	Silicio	Tungsteno	Metales del Grupo del Platino	

Fuente: Comisión Europea.

Los pronósticos al 2020 plantean que habrá un exceso de oferta de tierras raras livianas y, a la vez, un déficit en la oferta de tierras raras pesadas (Tabla 8).

Tabla 8. Pronóstico del equilibrio de mercado para LREE y HREE.

Materia prima	2012	2015	2020
LREE	Gran exceso	Gran exceso	Gran exceso
HREE	Gran déficit	Balance	Pequeño déficit

Fuente: Comisión Europea.



Los datos demuestran que en los yacimientos de REE la abundancia de cada elemento es muy variable, siendo más abundantes las LREE y más escasas las HREE. Desafortunadamente, la distribución de la demanda mundial por estos elementos no coincide con la distribución de su abundancia natural. Por ejemplo el disprosio, europio y terbio tienen una alta demanda para la fabricación de magnetos y para el uso de luces, pero su abundancia es significativamente menor al cerio o lantano (Tabla 9).

Tabla 9. Distribución promedio de cada elemento de tierras raras en 51 depósitos.

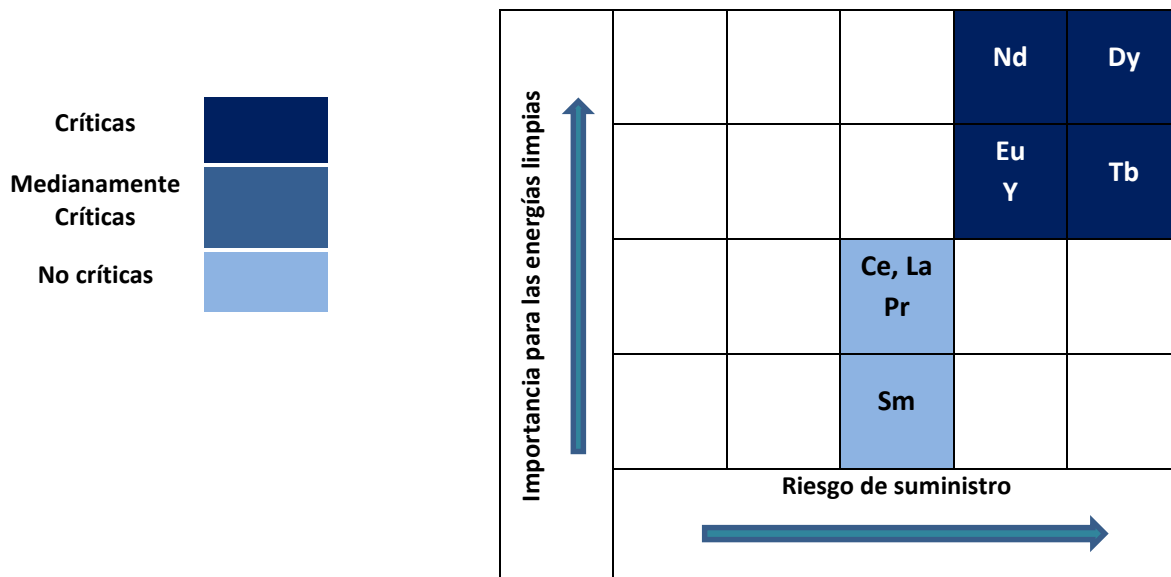
Tierras raras livianas		Tierras raras pesadas			
La	24,9%	Eu	0,3%	Er	0,5%
Ce	43,2%	Gd	1,4%	Tm	0,1%
Pr	4,6%	Tb	0,2%	Yb	0,4%
Nd	16,2%	Dy	0,9%	Lu	0,1%
Sm	2,2%	Ho	0,2%	Y	4,9%

Fuente: Comisión Europea

Estados Unidos

El Departamento de Energía de Estados Unidos indican que Nd, Dy, Y, Eu y Tb serían críticos por su importancia en el uso para las energías limpias y por alto riesgo de suministro (Figura 6). Para este país igualmente son muy relevantes para la industria de armamento, sumado al riesgo geo-político que la producción esté concentrada en China.

Figura 6. Matriz de criticidad a mediano plazo para Estados Unidos (2015-2025)



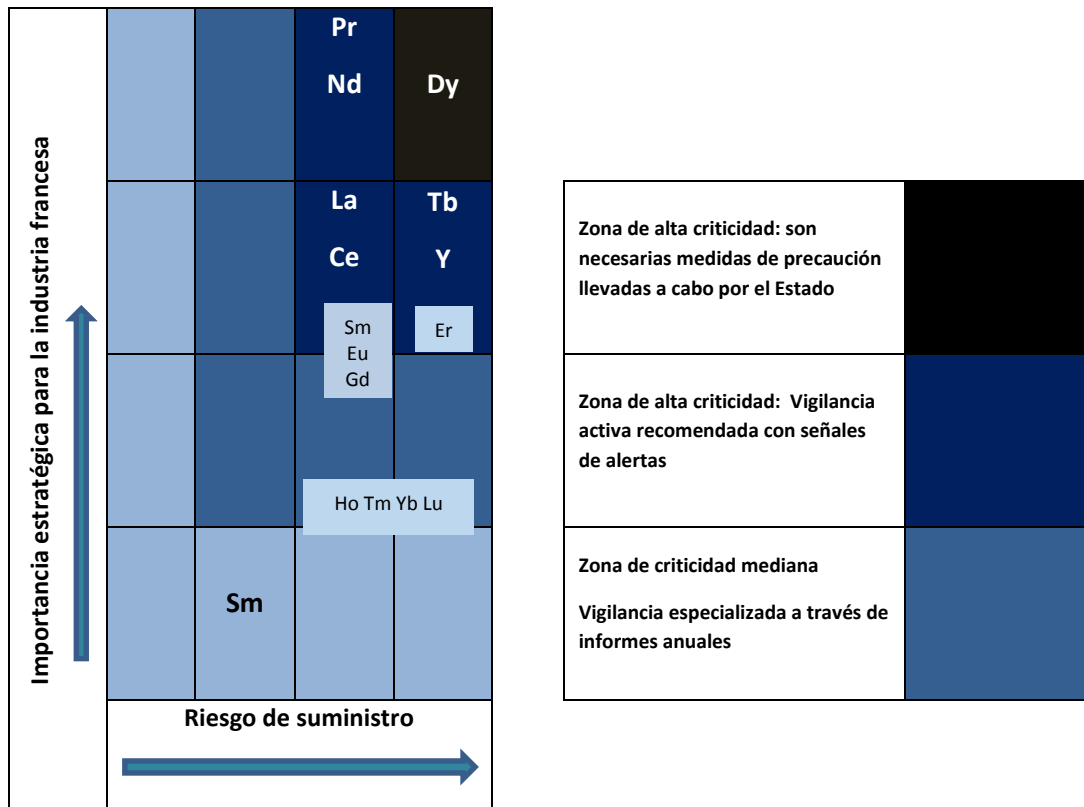
Fuente: U.S. Department of Energy Critical Materials Strategy (2011).



Francia

Para Francia las tierras raras también tienen una importancia estratégica debido a su utilización en el sector industrial y tecnológico: fabricantes de imanes permanentes y aerogeneradores, empresas automotrices, refinerías de petróleo, fabricantes de luces y baterías y compañías francesas de las áreas de la aeronáutica, defensa y nuclear (Bureau de Recherches Géologiques et Minières, 2015). En la matriz de la Figura 7 se representa la criticidad asignada por el gobierno francés a estos metales.

Figura 7. Criticidad asignada por el gobierno francés a elementos del grupo de las tierras raras.



Fuente: Panorama 2014 du marché des Terres Rares.

Canadá

Para Canadá, dadas las reservas y depósitos de tierras raras que dispone el país, la explotación y producción de estos elementos es una oportunidad estratégica lo cual permitiría desarrollar su propia fuente de abastecimiento y además con capacidad exportar. Ello generaría significativos beneficios económicos para la economía.

De acuerdo a la cámara de los comunes del parlamento canadiense en informe del Comité Permanente de Recursos naturales de junio de 2014¹⁰, el consumo mundial de elementos de tierras raras se incrementaría entre 8% y 12% por año. Sobre la base de dicho reporte, las tierras raras con mayor escasez serían el Nd, Eu, Tb, Dy e Y debido a su escasez, alta demanda y la criticidad de su uso en alta tecnología.

¹⁰ The Rare Earth Elements Industry in Canada – Summary of Evidence, June 2014.

2.2. Cotización de los REE en los mercados mundiales

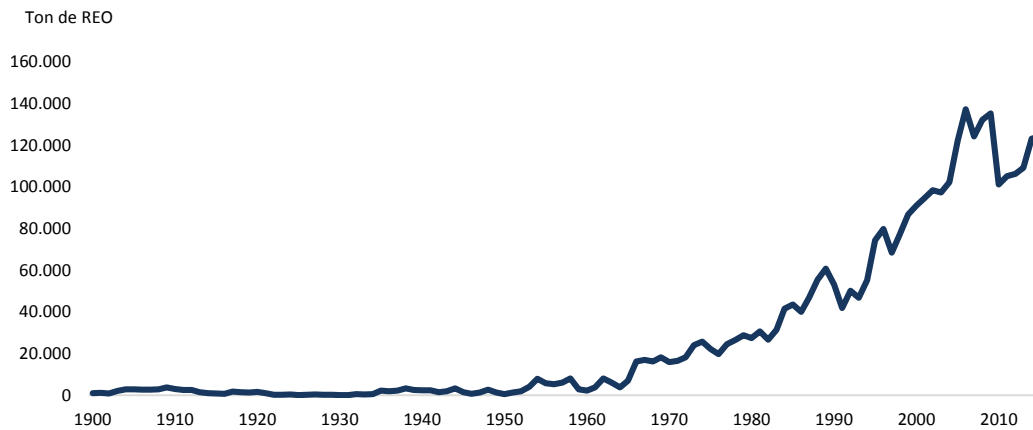
Las tierras raras no son negociadas en mercados abiertos al igual que otros metales tales como el oro, plata, cobre, zinc o aluminio. Estos elementos son transados generalmente a través de negociaciones privadas, lo cual dificulta monitorear sus precios. Otra complejidad adicional estriba en que las tierras raras son negociadas con diferentes niveles de pureza, lo cual implica que un mismo elemento puede dar cuenta de diferentes precios (JHA, 2014). En general estos metales son transados como óxidos de tierras raras (REOs).

Es por ello que las fuentes de información de precios son revistas o suscripciones especializadas como Argus o Asia Metal que publican valores de las tierras raras periódicamente de los precios sobre la base de encuestas a *dealers*, consumidores, productores y otros participantes del mercado. Las proyecciones de precios y estudios de mercado son realizadas por empresas y consultoras de research como Adamas Intelligence, Stormcrow Capital y Technology Metals Research (Matich, 2015).

2.3. Producción global

Desde el año 1900 en adelante la producción mundial de tierras se mantenía un promedio de 2.000 toneladas anuales como óxidos (REO), medida utilizada en este informe para su métrica en tonelaje. No obstante, desde 1966 registró un importante impulso, al superar las 10.000 toneladas (Figura 8). Desde dicho año la producción mundial ha crecido a una tasa anual promedio de 4,2% al 2012 (110.000 toneladas). En los últimos 6 años, la producción de tierras raras oxidadas se ha mantenido entre las 110.000 y 130.000 toneladas, específicamente, en el 2015 la producción mundial alcanzó las 124.000 toneladas (Figura 9).

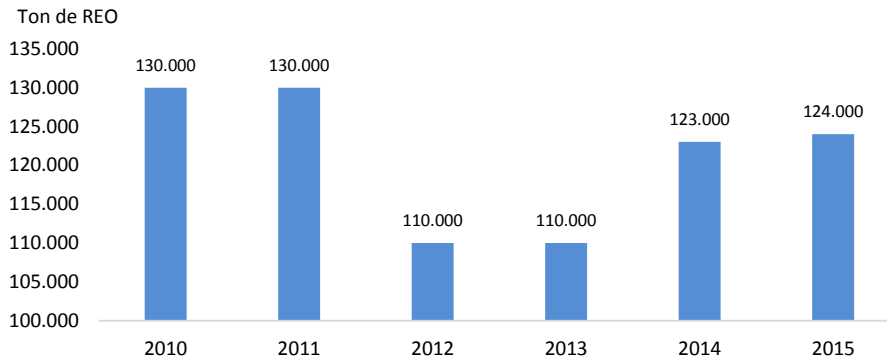
Figura 8. Evolución de la Producción mundial de Tierras Raras (toneladas de óxido).



Fuente: USGS.



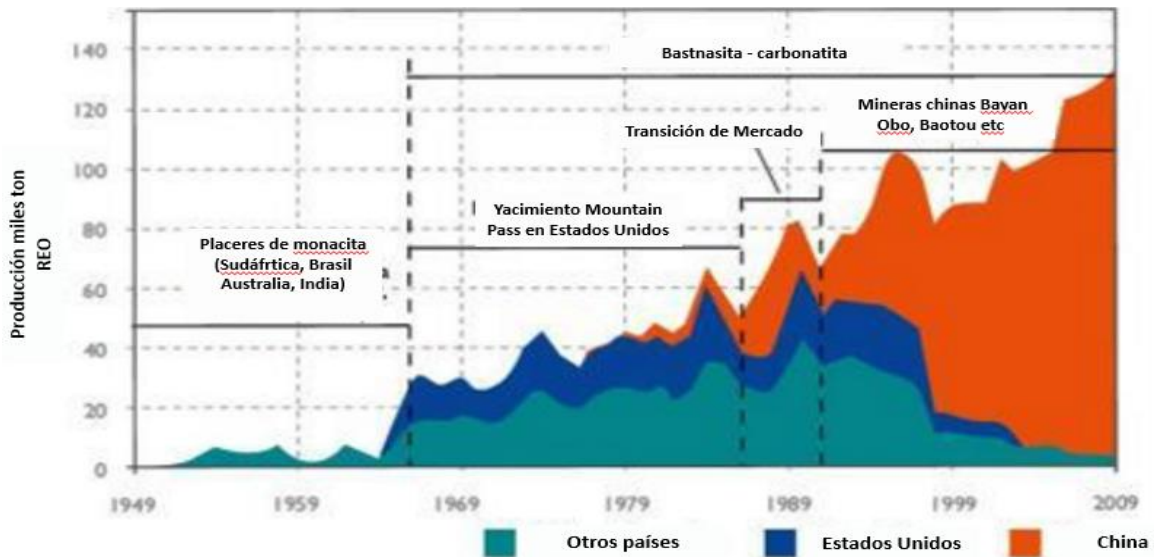
Figura 9. Producción Global de Tierras Raras de los últimos 6 años (toneladas de óxidos).



Fuente: USGS.

Analizando qué países han sido los principales productores históricos, se puede ver que en el período 1966-1984, Estados Unidos fue el productor líder de REE con alrededor del 64% de la producción mundial, siendo el yacimiento Mountain Pass uno de los mayores proveedores mundiales de tierras raras en el mundo (Figura 10). No obstante, desde el año 1985, su participación comenzó a reducirse gradualmente, comenzando una etapa de transición donde China comenzó a surgir como potencia indiscutida en la producción de estos metales. La caída de la producción norteamericana obedece principalmente a la menor competitividad de Mountain Pass en comparación a los costos de las tierras raras importadas de China (United Nations, 2014).

Figura 10. Evolución de los tipos de yacimientos explotados de tierras raras a nivel mundial.



Fuente: figura tomada de Conexiones (2016), basada en información de USGS.

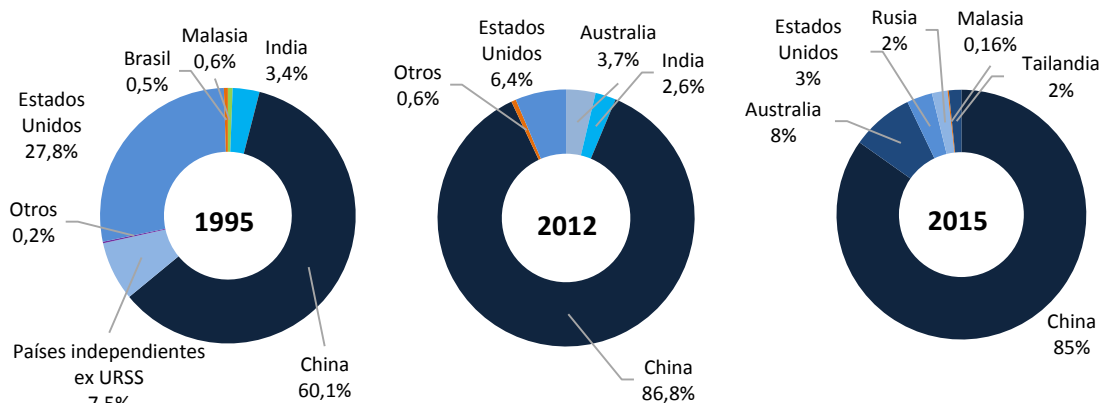
En el periodo 1980-1998 el gobierno chino fomentó las exportaciones de tierras raras a través de políticas de reducción de impuestos y créditos subvencionados, sumando a ello un contexto de bajos costos laborales y menores regulaciones ambientales. De esta forma China pasó desde el 21% del total mundial de la producción REE en 1985 al 60% en el 1995.



Durante el 1995-2012, China representó en promedio el 88% de la producción mundial (United Nations, 2014), siendo en el 2015 de 85% (Figura 11).

En el 2005, la empresa estadounidense Mollicorp decidió reabrir la mina Mountain Pass, dado el incremento de precios, sin embargo, se declaró en quiebra el 2015 debido a la fuerte caída de los precios desde el 2012, siendo un reflejo de las dificultades que han tenido los productores de estos metales.

Figura 11. Evolución de la participación en la producción mundial de REO por países.



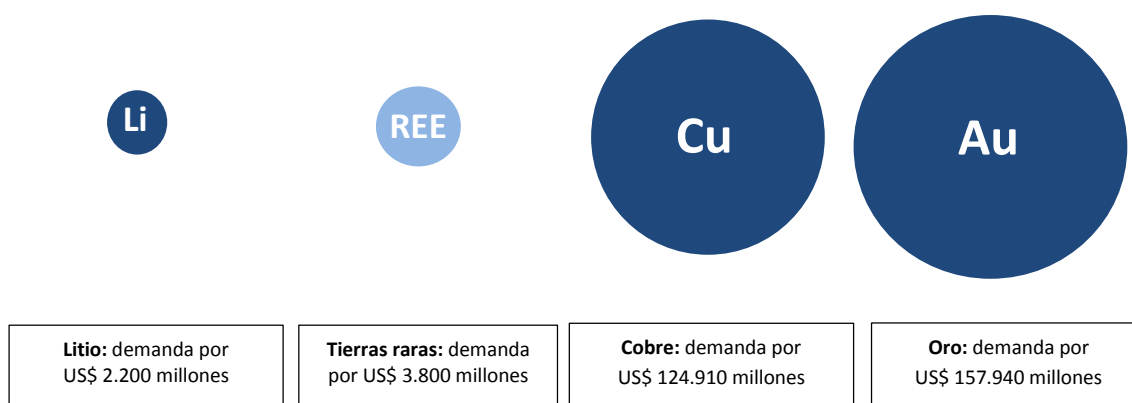
Fuente: UNCTAD y USGS.

2.4. Demanda

Las tierras raras son utilizadas en diversos sectores, como el craqueo catalítico¹¹, óptica, desarrollo de imanes permanentes, cerámica, aleaciones de metales, baterías y en la industria militar, entre otras muchas aplicaciones.

Es necesario indicar que, en términos de tamaño, este mercado es pequeño en relación al de otros metales como lo son el del cobre o del oro, aunque mayor que el mercado del litio (Figura 12).

Figura 12. Comparación del Mercado de las Tierras Raras con otros Metales en el 2015.



Fuente: GéoméGA y elaboración Cochilco. Para el litio cifras al 2013.

¹¹ Proceso de refinación de petróleo que consiste en la descomposición termal de los componentes del petróleo en presencia de un catalizador.

El escenario previo al 2010 en que los precios de las tierras raras se situaban en un bajo nivel y no se vaticinaban riesgos significativos de suministro generó que la investigación y desarrollo sobre estos elementos fuera menos atractiva (United Nations, 2014). El desarrollo de sustitutos y métodos de reciclado de tierras raras no se visualiza como prioridad para las empresas y países, sin embargo luego del fuerte incremento de precios del 2011 y las restricciones de la exportaciones de China, principal proveedor en el mundo, las empresas comenzaron a buscar soluciones para limitar la dependencia de estos elementos. Cabe señalar que la tasa de sustitución de las tierras raras es de 0,87, lo cual indica que es baja y con alto costo (United Nations, 2014).

Los principales sectores económicos que utilizan como insumo las tierras raras para elaborar partes o productos utilizados otros bienes finales se exponen en la Tabla 10.

Tabla 10. Principales sectores económicos que utilizan tierras raras.

Industria	Tierra raras utilizadas
Imanes permanentes	Nd, Pr, Dy, Sm
Catalizadores de combustible y aditivos	La, Ce
Cerámica, pigmentos y esmaltes	Y, Nd, Sm, La, Pr, Ce
Aplicaciones metalúrgicas y aleaciones	Ce, La, Nd, Gd, Y, Pr, Ho, Sm, Dy, Tb, Eu
Convertidores Catalíticos	Ce, La, Nd, Pr
Pantallas de equipos y dispositivos	Y, La, Ce, Tb, Eu
Pulido y aditivos para vidrio	Ce, La, Y, Gd, Pr, Nd
Aleaciones de Baterías	Ce, La, Pr, Nd

Fuente: Geomega.

El número de industrias que utilizan los REE pesados (HRRE) es más limitado, incluyéndose en éstas al sector de los imanes, aditivos para vidrio, cerámica y pantallas de equipos (United Nations, 2014). En cuanto a sus versatilidad, destacan el cerio y el lantano (Tabla 10) que se utilizan en casi todas las actividades económicas que demandan REE.

En general es complejo estimar la demanda de tierras raras, ya que es un mercado pequeño y usualmente las proyecciones de consultoras son utilizadas como fuentes (United Nations, 2014).

Las cifras de finales de demanda para el 2015 se estiman en 125.000 toneladas aproximadamente y para el 2020 se esperan 150.000 toneladas (GéoMégA, 2016).

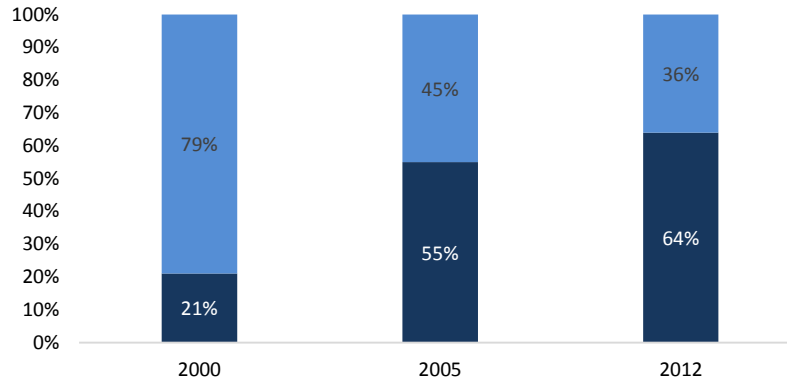
Las proyecciones de demanda de tierras raras dan cuenta de un crecimiento, pero a ritmo menor que el pronosticado previamente, ya que se ha visto afectada negativamente por la desaceleración de la economía china, al igual que la mayoría de los metales.

El país con mayor consumo de tierras raras ha sido históricamente China. Su participación en la demanda global ha ido aumentando acorde al fuerte desarrollo de la manufactura y electrónica en dicho país. Es así como en el



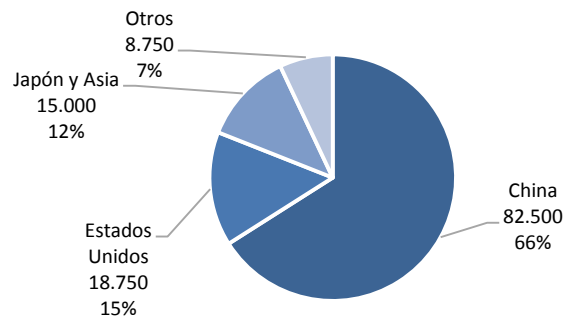
año 2000 alcanzó a 21% y en el 2012 anotó un importante avance registrando 64% (Figura 13). En el 2015 la participación de China habría alcanzado el 66%, Estados Unidos con el 15% y Asia (incluido Japón) con el 12% (Figura 14).

Figura 13. Participación de China en la Demanda Mundial de Tierras Raras.



Fuente: UNCTAD.

Figura 14. Demanda de tierras raras por países 2015 (REO).



Fuente: Estimación Cochilco en base a datos de TMR y GéoMégA Mining Company.

Se espera que la demanda de REE de China alcance el 70% del total para el 2020. La mayor participación de China se basa en el aumento de su población, mejoras en la calidad de vida, políticas por atraer inversiones de industrias de alta tecnología en el país e incremento en la participación de las energías renovables como suministro energético del país (United Nations, 2014).

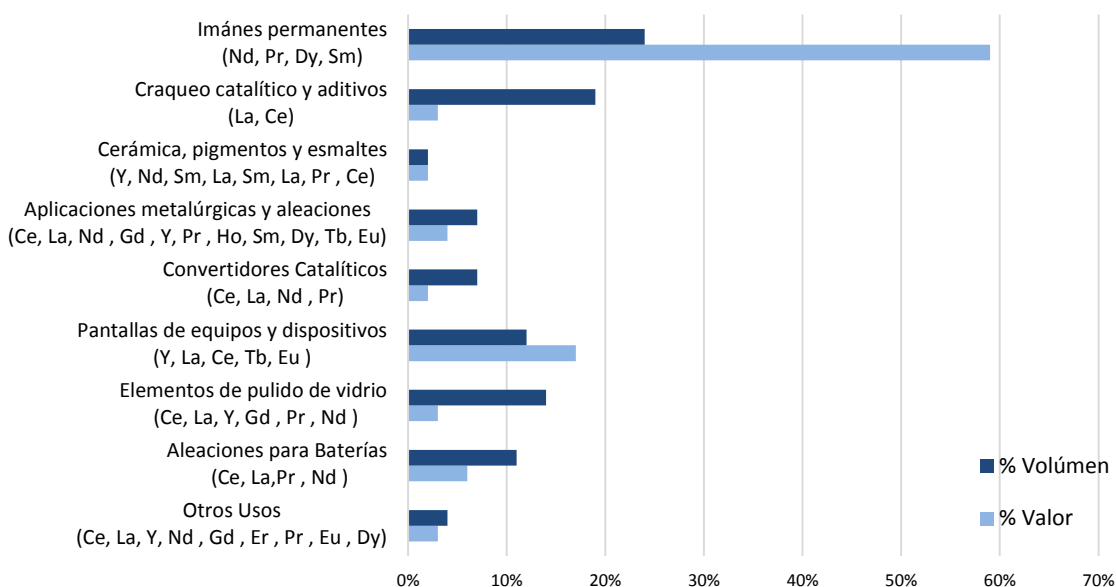
La principal demanda en el 2015 en términos de volumen provino del sector de la industria de imanes permanentes, pantallas de equipos y dispositivos, craqueo catalítico y pulido de vidrios.

El sector de imanes permanentes que utiliza neodimio, praseodimio, disprosio y samario es aquel que evidencia mayor participación al 2015 en términos de volumen con el 24% del total demandado (Figura 15).



En cuanto a la valorización de la demanda de tierras raras, ésta dio cuenta de US\$ 3.800 millones. La industria los imanes permanentes y las pantallas de equipos y dispositivos son los con mayor cuantía representado el 88% del total (GéoMégA, 2016) (Figura 15).

Figura 15. Distribución de la demanda de Tierras Raras al 2015 en términos de volumen y valor para sectores industriales no finales.



Fuente: GéoMégA.

Los pronósticos para el 2020 señalan que la demanda estaría en torno a las 150.000 toneladas aproximadamente, creciendo 3,9% por año a partir del 2015. La valorización de la demanda fluctuaría entre US\$ 8.300 millones a US\$ 9.500, dependiendo del escenario de mercado, fundamentalmente de la demanda china, principal consumidor (Adamas Intelligence, 2015).

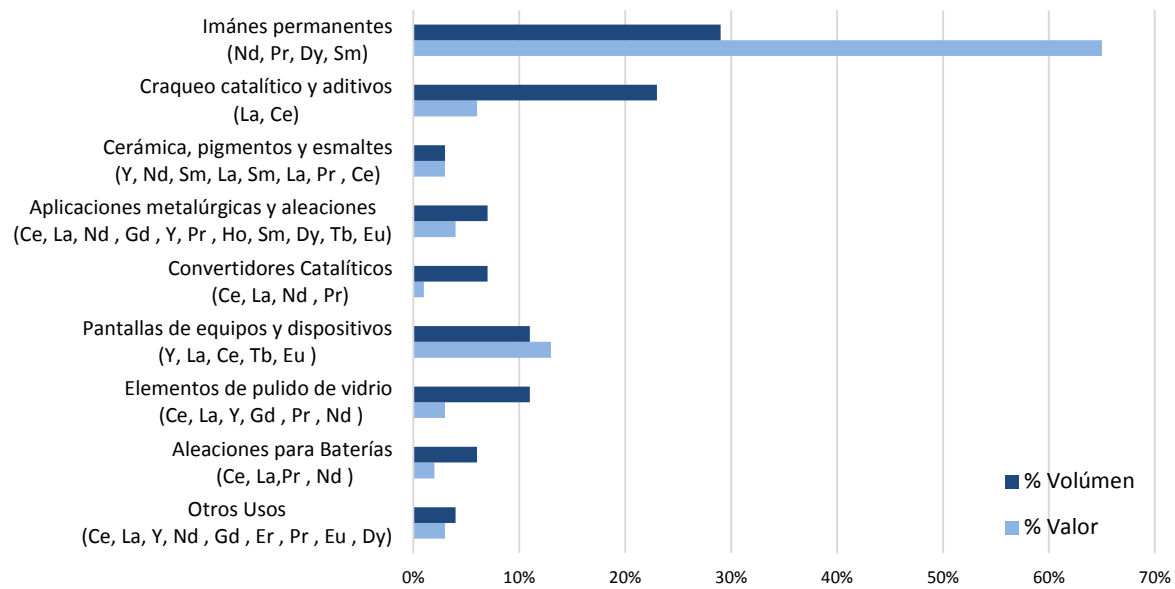
Los pronósticos actuales para la demanda al 2020 son más conservadores que los efectuadas en el 2013, donde se preveía un escenario optimista para las tierras raras, proyectando una demanda de entre 200.000 y 240.000 toneladas.

Los imanes permanentes en base a tierras raras son materiales que poseen una gran capacidad de almacenamiento de energía magnética y con alta duración en el tiempo, permitiendo su aplicación en diversos campos como aerogeneradores, discos duros, motores de alto rendimiento, linternas de alimentación propia, turbinas, dinamos, parlantes y auriculares de audio entre otros usos (Los Imanes, 2016)

El craqueo catalítico es un proceso utilizado por la industria del petróleo para mejorar la eficiencia de la refinación de petróleo crudo a través de la ruptura de las moléculas más grandes para transformarlas en otras más pequeñas.

En cuanto a las proyecciones al 2020 en términos de volumen y valor (Figura 16) el sector de imanes permanentes es aquel que presenta mayores potencialidades con el 29% y 65% respectivamente, seguido del mercado de craqueo catalítico y pantallas de equipos y dispositivos.



Figura 16. Demanda estimada de Tierras Raras al 2020.

Fuente: GéoméGA.

En la Tabla 11 se presenta los elementos de tierras raras con mayor potencialidad de crecimiento en su demanda, esto son el neodimio, praseodimio, disprosio, los que se utilizan en diversas aplicaciones.

Tabla 11. Demanda por elemento de Tierras Raras (en toneladas).

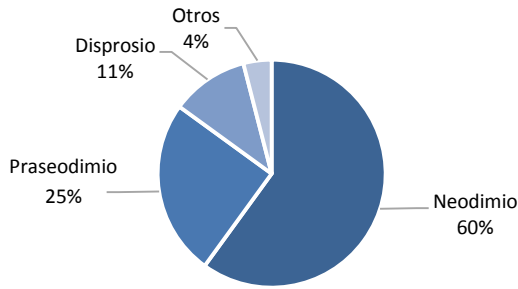
REO	2014	2020
Disprosio	1.200	2.000
Neodimio	21.000	36.500
Praseodimio	7.000	12.000

Fuente: Quest Rare Minerals Ltd. (2014).

Asimismo, el neodimio, el praseodimio y el disprosio tienen una participación importante en el sector de imanes permanentes, teniendo una participación de 60%, 25% y 11% respectivamente (Figura 17). De acuerdo a la consultora Adamas Intelligence son los metales con mayores perspectivas de crecimiento en su demanda.



Figura 17. Participación de las tierras raras en términos de valor en el sector imanes permanentes.



Fuente: Peak Resources Limited.

La mayor utilización de tierras en bienes finales se presenta en tres grandes sectores: energías verdes, bienes de consumo diario y defensa (ver Tabla 12).

Tabla 12. Usos de las Tierras Raras en Industrias Finales.

Sector	Uso	Elementos	
		1	2
Energía Verde	Iluminación	Eu	
		Y	
	Baterías Recargables	La	
		Ce	
	Energía Eólica	Nd	
		Pr	
		Dy	
	Vehículos Híbridos	Nd	
		Pr	
		Dy	
Sm			
Tb			
Defensa	Láser	Dy	
		Tb	
	Materiales para aviones	Y	
		Otros	
	Comunicaciones por microonda	Nd	
		Pr	
		Dy	
		Tb	
		Eu	
	transductores de sonar	Y	
La			
Eu			
Otros			
Nd			
Bienes de uso diario	Pantallas de LCD/PDP		Ce
			Y
			Eu
			Tb
	Imágenes de Resonancia magnética		Nd
			Gd
	Fuentes de energía sin cables		Nd
			Pr
			Dy
			Tb
Celulares, Tablet		Nd	
		Pr	
		Ce	
		La	
Defensa	Dispositivos de orientación y control		Nd
			Pr
			Dy
			Tb
			Sm
	Vigilancia y protección		Nd
			Y
			La
	Óptica		Eu
			Otros
	Y		
	Tb		
	Eu		

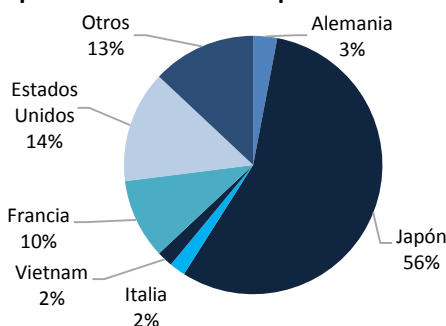
Fuente: Commodities at a glance 2014.



2.5. Precios internacionales

Si bien desde el 2005 China comenzó a restringir sus exportaciones de tierras raras a través de un sistema de cuotas, en el 2010 disminuyó los despachos al exterior fuertemente en 40% en relación al año anterior, lo cual generó una crisis de suministro y una burbuja de precios. Asimismo, a fines de ese mismo año, China suspendió totalmente las exportaciones a Japón a causa de una disputa geo-política por la detención del capitán de un barco pesquero chino que colisionó con barcos patrulleros japoneses en un área geográfica reclamada por ambos países. Estas restricciones a la oferta de tierras raras provocaron que el 2012 Estados Unidos, Japón y la Unión Europea interpusieran una queja ante la Organización Mundial de Comercio contra China, debido a que el sistema de cuotas era una violación a las reglas del comercio internacional. Estos países son los mayores destinos de las exportaciones de tierras raras chinas (Information Office of the State Council, 2012).

Figura 18. Principales destinos de las Exportaciones de Tierras Raras de China.



Fuente: Situation and Policies of China's Rare Earth Industry (2012).

El 2012 comenzaron a caer fuertemente los precios a causa de diversos factores como el inicio de importantes proyectos mineros de tierras raras, reducción de la actividad económica de Japón por el tsunami de marzo 2011 y por mejoras en la eficiencia o reemplazo en el uso de tierras raras en los productos realizadas por las propias empresas consumidoras de estos elementos (United Nations, 2014).

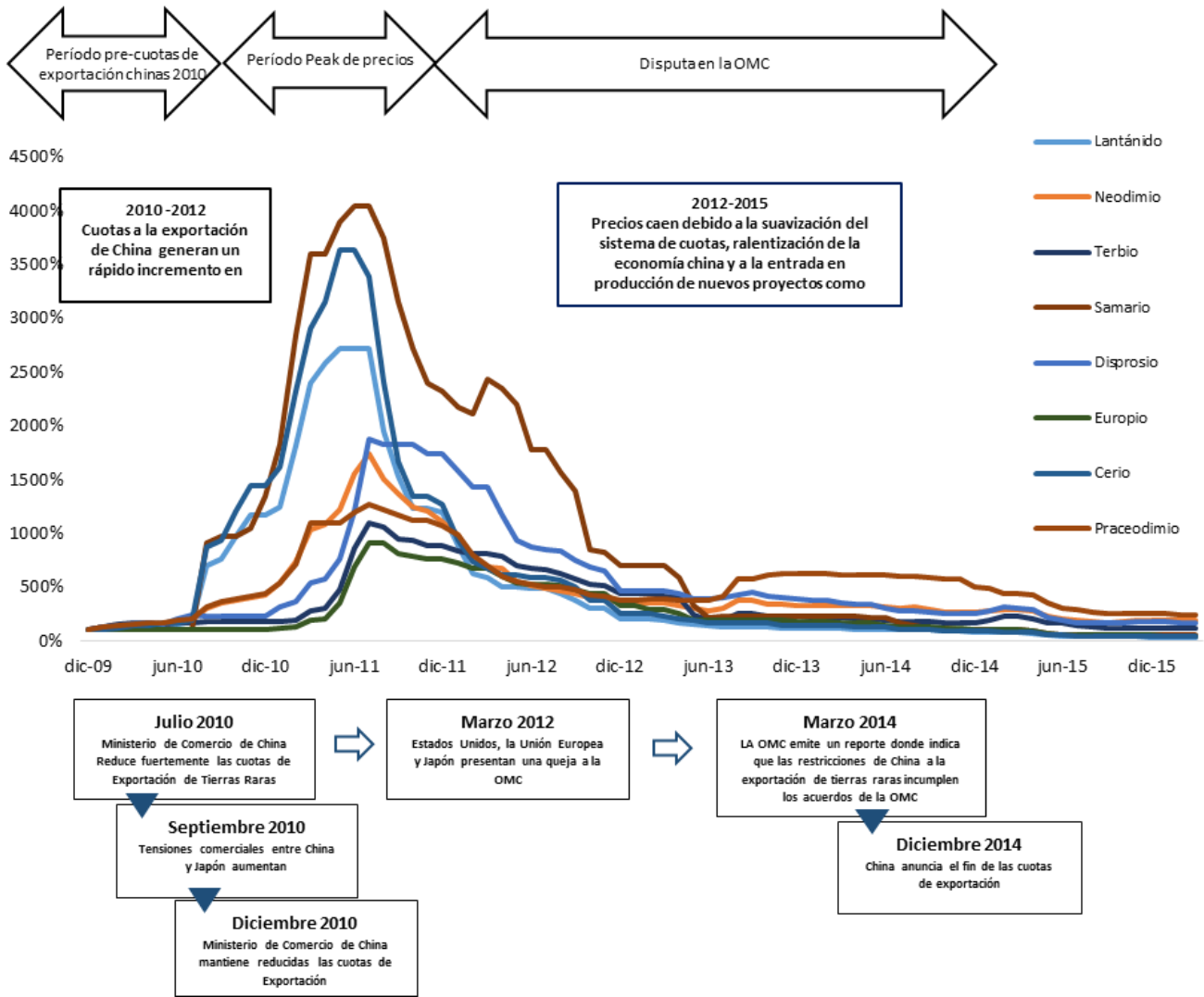
En el 2013 los precios se estabilizaron, sin embargo el 2014 nuevamente anotaron una tendencia bajista acorde a la ralentización de la economía china, lo cual disminuyó la demanda por artículos electrónicos, equipos de alta tecnología, sectores donde los elementos de tierras raras tienen mayor aplicación.

Finalmente, en marzo de 2014 la Organización Mundial de Comercio respaldó la queja de Japón, Estados Unidos y la Unión Europea, instando a China a realizar medidas correctivas sobre la restricción de sus exportaciones de tierras raras, ya que su sistema de cuotas violaba las reglas del comercio internacional. Al término del 2014, China terminó los controles a la exportación de estos metales.

En la Figura 19 se presentan, las tasas de variación de precios desde el 2005 y los principales hitos que han afectado los valores de las tierras raras.



Figura 19. Índice de precios de las Tierras Raras y principales hitos (% basados en precios de diciembre 2009).



Fuente: Reuters, series Base Diciembre 2009=100 y Tantalus Rare Earths AG.

En términos de precios nominales en la Tabla 13 se presentan los precios de los principales elementos de tierras raras en tres diferentes momentos del tiempo. Como se observa en el periodo junio 2011 tuvieron el máximo, registrando actualmente valores deprimidos para la mayoría de ellas. Los precios del disprosio, neodimio y praseodimio han evidenciado crecimientos en el precio desde 2006, a diferencia de los otros REE que aún tienen precios deprimidos.



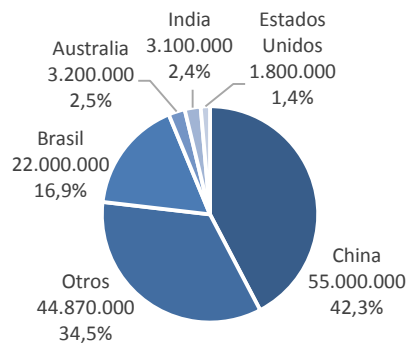
Tabla 13. Precios nominales de las principales tierras raras en US\$/kg (para otros REOs ver Anexos).

Producto	31-12-2006	31-07-2011	31-03-2016
Óxido de cerio, min 99% FOB, China	1,7	140,5	1,6
Óxido de disprosio, min 99%, FOB, China	107	3.092,5	275
Óxido de europio, min 99%, FOB, China, \$/kg	550	6.290	260
Óxido de lantano oxido, min 99%, FOB, China,	2,3	140,05	1,7
Óxido de neodimio, min 99%, FOB, China,	23,75	369,75	39,5
Óxido de praseodimio, min 99%, FOB, China	38,05	250,25	47,5
Óxido de samario, min 99%, FOB, China	2,4	136	1,9
Óxido de terbio, min 99%, FOB, China	670	4.945	500

Fuente: Reuters.

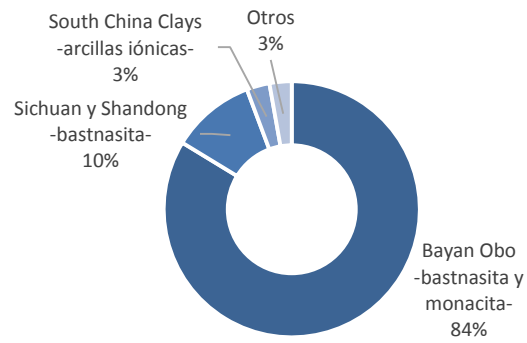
2.6. Reservas

Las tierras raras existen en abundancia en la corteza terrestre, siendo una variable relevante el nivel de concentración en que se encuentren para desarrollar una explotación factible económicamente (United Nations, 2014). La mayor cantidad de reservas, de acuerdo al Servicio Geológico de Estados Unidos (Figura 20) se encuentran en China (42,3%) y Brasil (16,9%). Específicamente en China, el 83% de las reservas se encuentran en Bayan Obo, Mongolia Interior, seguido de las provincias de Sishuan y Shandong (Maouniuping y Xishang) con un 10% y los depósitos de arcillas del sur de China con un 3% (Figura 21).

Figura 20. Reservas Mundiales de óxidos de tierras raras (REOs).

Fuente: USGS.

Figura 21. Distribución de las reservas de elementos de tierras raras en China.



Fuente: Su (2009).



3. Antecedentes de depósitos de REE en Chile

Se sabe que la mayor parte de los depósitos económicos de REE en el mundo se encuentran en rocas ígneas ricas en carbonatos, llamadas carbonatitas, que son muy escasas y no existen reportes de presencia de estas en territorio chileno. También en rocas alcalinas que son escasas en Chile. Lo anterior hace improbable que existan depósitos importantes de REE's en Chile.

Sin embargo, ante la alta demanda y escasez de REE en el mercado, se han comenzado a evaluar otro tipo de depósitos, como los depósitos residuales de arcillas adsorbentes en el sur de Chile, depósitos de óxidos de hierro con altos contenidos de REE (específicamente depósitos de óxidos de hierro-apatito) y depósitos de uranio.

Además se han sugerido fuentes alternativas de REE como los relaves de la minería del cobre, para eventualmente concentrar desde ellos ciertos minerales accesorios que pudieran contener tierras raras u otros elementos de interés económico.

3.1. Plan Nacional de Geología

El Plan Nacional de Geología de SERNAGEOMIN incluye el Programa de Cartografía Geoquímica, en el cual se busca contribuir a promover la exploración minera y generar información geoquímica referencial a nivel nacional a través de la producción de hojas geoquímicas a escala 1: 250.000, estas se construyen a partir de muestreo de sedimentos en una grilla regular, con una densidad de una muestra cada 20 km² y posterior análisis geoquímico para determinar la abundancia 59 elementos químicos, de los cuales 16 pertenecen al grupo de las tierras raras. A la fecha se han publicado tres hojas geoquímicas de la Serie Geoquímica: Hoja Iquique (Lacassie y otros, 2012), Hoja Pisagua (Astudillo y otros 2014) y Hoja Arica (Baeza y otros 2014), además se dispone de una versión preliminar de la Hoja La Serena (Lacassie y otros, en elaboración).

SERNAGEOMIN ha reportado en sus documentos zonas con concentraciones anómalas de tierras raras, que pueden resultar interesantes de revisar.

Analizando los resultados obtenidos en todas las hojas geoquímicas, destaca en particular un sector de la Hoja Arica (Figura 22) ubicado en la vertiente occidental de la cuenca del río Lauca, entre el río Vizcachani, por el norte, hasta la pampa Citañane (Zona H en la Hoja Arica) por su alto contenido de tierras raras. En esta zona se detectaron altas concentraciones de tierras raras livianas (promedio La: 74,8 ppm, Ce 132,1 ppm, Pr 13,66 ppm, Nd 44,8 ppm) coincidente con altas concentraciones de uranio y torio (promedio 3,63 y 25,43 ppm respectivamente) circonio, hafnio, sílice, potasio y niobio. Además, algunas muestras, presentan altas concentraciones de tierras raras intermedias y pesadas, con valores promedio de: Sm=6,2 ppm; Gd=4,1 ppm; Er=1,5 ppm; Tm=0,2 ppm; Yb=1,8 ppm; Lu=0,3 ppm; Y=15 ppm; además de rubidio (Rb)=97 ppm y bario (Ba)=911 ppm.

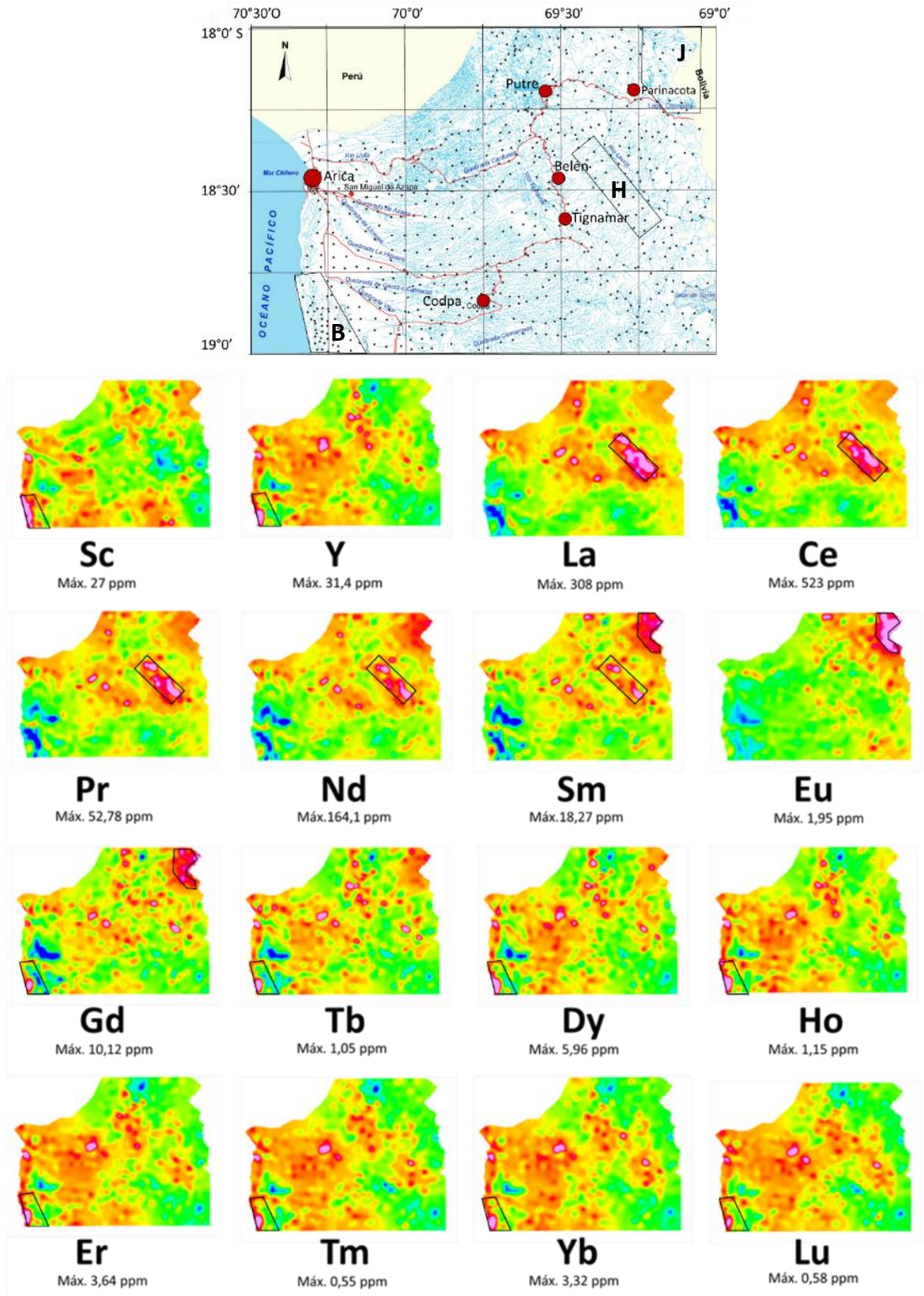
También en la Hoja Arica, en los dominios de los volcanes Pomerape y Parinacota (Zona J, Figura 22), se detectaron fuertes anomalías de tierras raras intermedias: europio (promedio de 1,71 ppm), gadolinio (promedio 4,84 ppm), samario (promedio 6,52 ppm) además de fósforo y estroncio. Además, a lo largo de la cordillera de la Costa, entre las quebradas Vitor y Camarones (Zona B, Figura 22) se encontraron anomalías positivas de cobre, oro, cromo y níquel, junto a una anomalía positiva de fósforo correlacionada con altas concentraciones de uranio y tierras raras intermedias y pesadas (Sm, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) e itrio.

En la Hoja Pisagua (Figura 23) también destacan dos zonas de anomalías positivas de tierras raras. La primera se ubica en el extremo sureste de la carta (Zona L) con altas concentraciones de hierro, oro, plata, cobre, plomo y uranio junto a anomalías positivas de tierras raras livianas a medias (La-Ce-Pr-Nd-Sm-Eu-Gd-Tb) y anomalías aún más marcadas, en tierras raras pesadas (Dy-Ho-Er-Tm-Yb) e itrio (Y). La otra zona interesante en cuanto a su contenido de REE, se ubica en la costa, desde 10 km al N de Pisagua hasta la caleta Mejillones del Norte (Zona B) donde se detectaron anomalías positivas de cobre, oro y, periféricamente molibdeno y, además, marcadas anomalías positivas de magnesio y tierras raras intermedias y pesadas (Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) e itrio (Y).

En la Hoja Iquique (Figura 24) y en la Hoja La Serena (resultados preliminares, Figura 25) los valores de REE son más bajos pero es posible reparar que las zonas de más alta concentración se encuentran hacia el oeste de la carta, en la Cordillera de la Costa. De todos modos los valores de concentraciones de REE mostrados en estas hojas son más bajos que en las dos primeras (Arica y Pisagua).



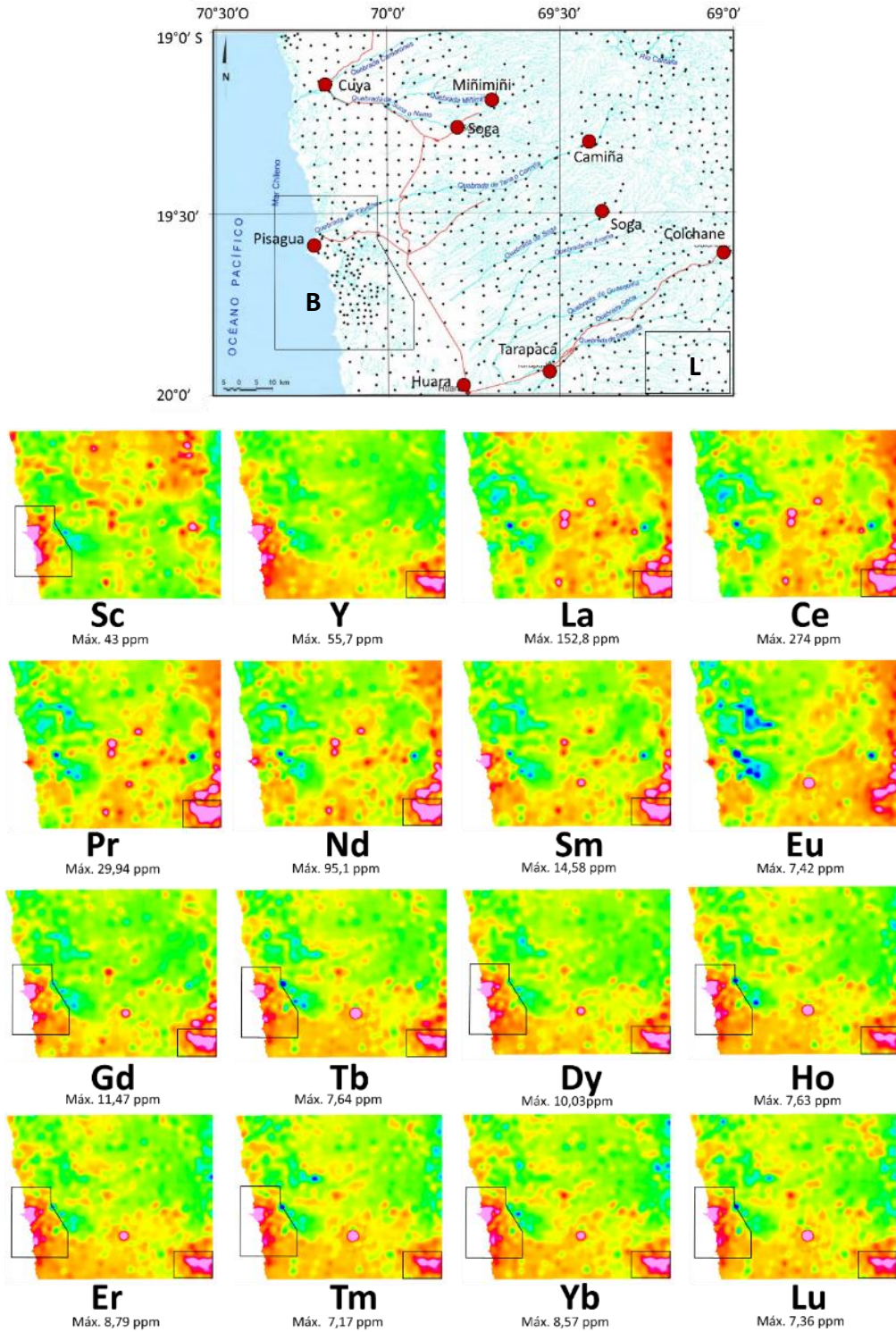
Figura 22. Interpolación de concentraciones de REE en Geoquímica de Sedimentos de la Hoja Arica (Baeza y otros, 2014), en rosado los máximos y en azul los mínimos.



Fuente: SERNAGEOMIN.



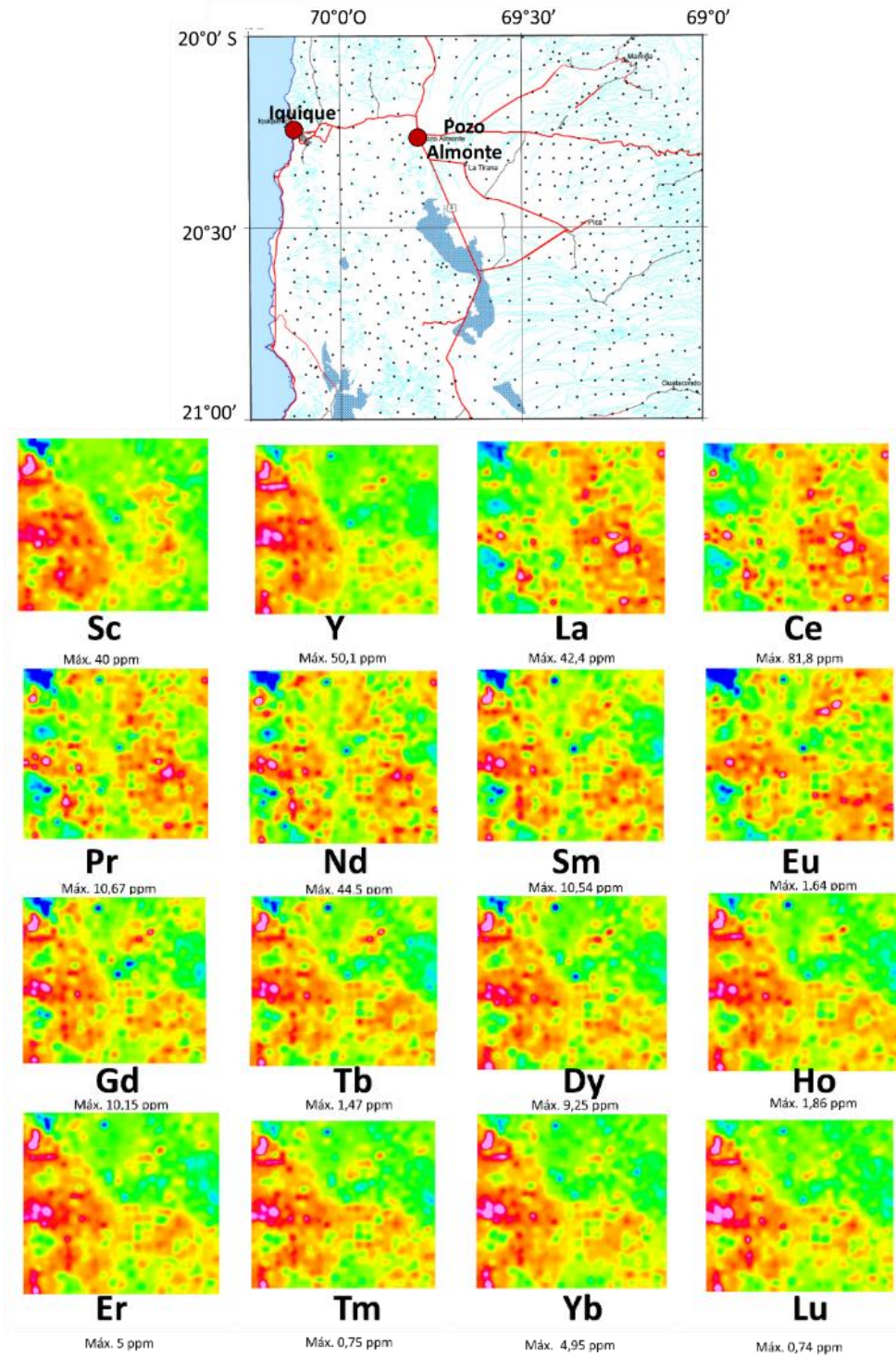
Figura 23. Interpolación de concentraciones de tierras raras en Geoquímica de Sedimentos de la Hoja Pisagua (Astudillo y otros, 2014), en rosado los máximos y en azul los mínimos.



Fuente: SERNAGEOMIN.



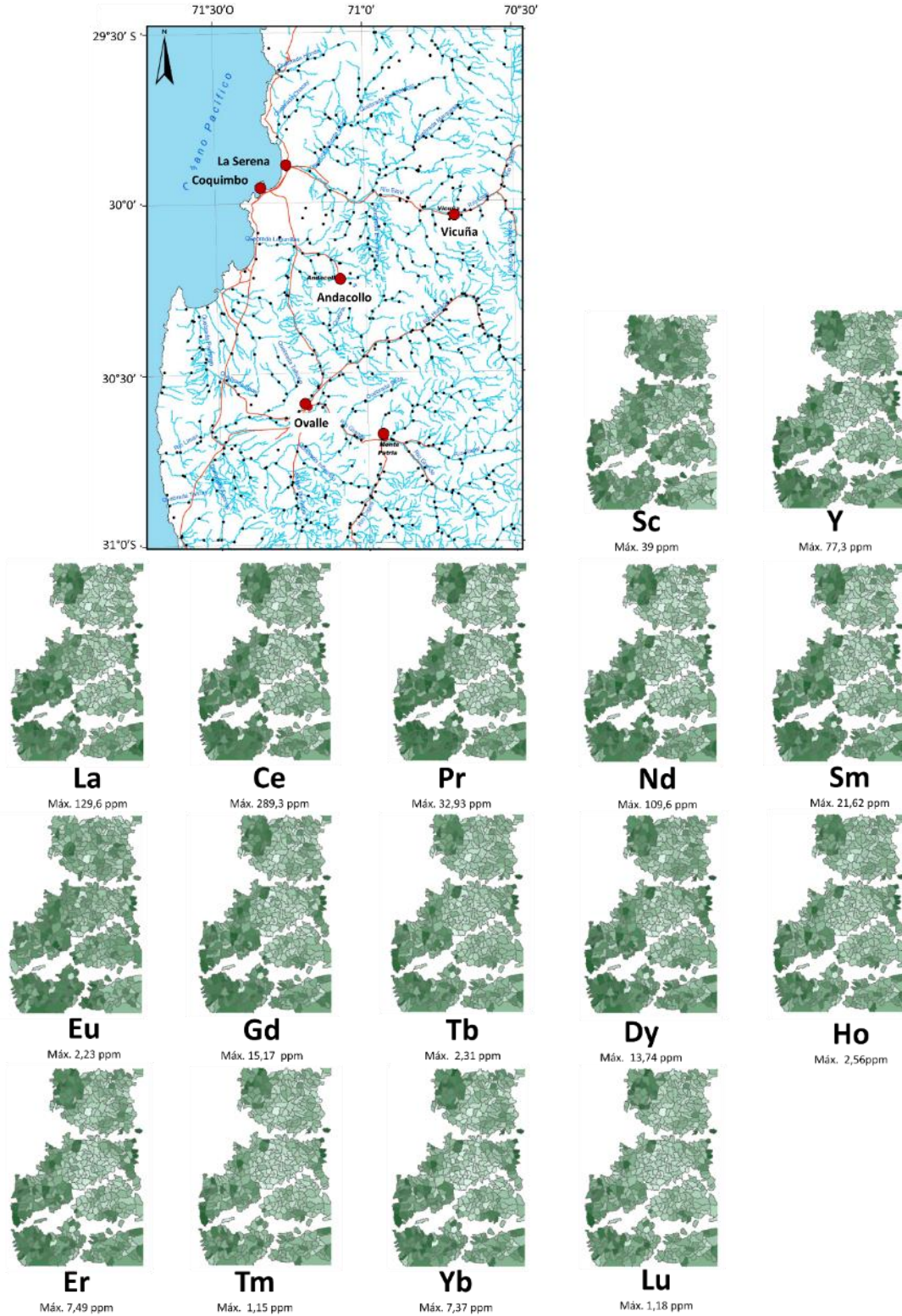
Figura 24. Interpolación de concentraciones de tierras raras en Geoquímica de Sedimentos de la Hoja Iquique (Lacassie y otros, 2012), en rosado los máximos y en azul los mínimos.



Fuente: SERNAGEOMIN.



Figura 25. Concentraciones de los elementos de tierras raras en subcuencas en Geoquímica de Sedimentos de la Hoja La Serena (Lacassie y otros, en elaboración). En verde oscuro concentraciones altas y, en verde claro, concentraciones bajas.



Fuente: SERNAGEOMIN.



3.2. Proyecto Minero El Cabrito

El Proyecto Minero El Cabrito, desarrollado por la sociedad REE UNO SpA (Minera BioLantánidos), con el aporte financiero de Minería Activa y del Programa Fénix de Corfo, es el primer proyecto en Chile que busca entrar en el mercado de las tierras raras. Este proyecto consiste en la construcción y operación de una faena minera junto con una planta de producción de óxidos de Lantánidos (REE UNO SpA, 2016).

El yacimiento se ubica en el fundo El Cabrito en la comuna de Penco, Región del Biobío (Figura 26a), en un área con alta concentración de tierras raras. Corresponde a un depósito de arcillas iónicas adsorbentes. Estas arcillas se formaron por la intensa meteorización de rocas graníticas del Paleozoico presentes a lo largo de la Cordillera de la Costa, gracias a las lluvias características de la región.

Se han realizado más de 1000 m de sondajes con, en promedio, 50 m de profundidad. Los estudios indican leyes que varían entre 200-3000 ppm de tierras raras, de estas, un 40% corresponde a tierras raras pesadas. Los sectores más enriquecidos del yacimiento corresponden a perfiles de suelo sobre la roca no meteorizada y bajo las arcillas superficiales lixiviadas, con 10 a 15 m de potencia.

Para el procesamiento del mineral se construyó una planta piloto, implementada en 2015, de pruebas metalúrgicas para generar concentrado de óxidos de tierras raras con los 15 lantánidos e itrio que alcanza una pureza del 92% y se pretende construir una planta a escala comercial el 2017 y comenzar las operaciones en 2018. En la planta piloto se llevan a cabo dos procesos de producción: por un lado se procesa mineral en pilas de lixiviación, del mismo modo que se hace internacionalmente, y, por otro lado, se desarrolló la Planta Continua creada en un 100% por profesionales chilenos ligados al proyecto, la cual recircula los elementos necesarios para su funcionamiento. Estos dos procesos se realizan paralelamente para comparar la eficiencia entre los procesos tradicionales y la planta continua. Según reportes de la empresa, tras algunos meses de operación, se pudo concluir que el método BioLantánidos pudo alcanzar un mayor nivel de recuperación y pureza.

En el Proceso Cerrado de Desorción Continua de Tierras Raras (CCLP, *Close Continuous Leaching Process*) la idea es mantener una recuperación permanente del terreno, esto se realiza llevando las arcillas a la planta, procesándolas para extraer las tierras raras, posteriormente se lavan las arcillas sobrantes para asegurar su estabilidad química y se vuelven a depositar en el cerro (Ver sectores de extracción y disposición en Figura 26b). Se pretende, finalmente, reforestar el terreno sobre los sectores de extracción y sobre los sectores de disposición de arcillas ya procesadas.

La planta comercial será diseñada para producir entre 500 y 700 toneladas de concentrado de tierras raras por año. Dicha planta tiene un valor aproximado de US\$ 25 millones (REE UNO SpA, 2016). En adelante se espera construir una planta cada año hasta llegar a un total de cinco o seis, alcanzando una producción de 30.000 t de concentrado antes del 2030 (Construcción Minera, 2016).

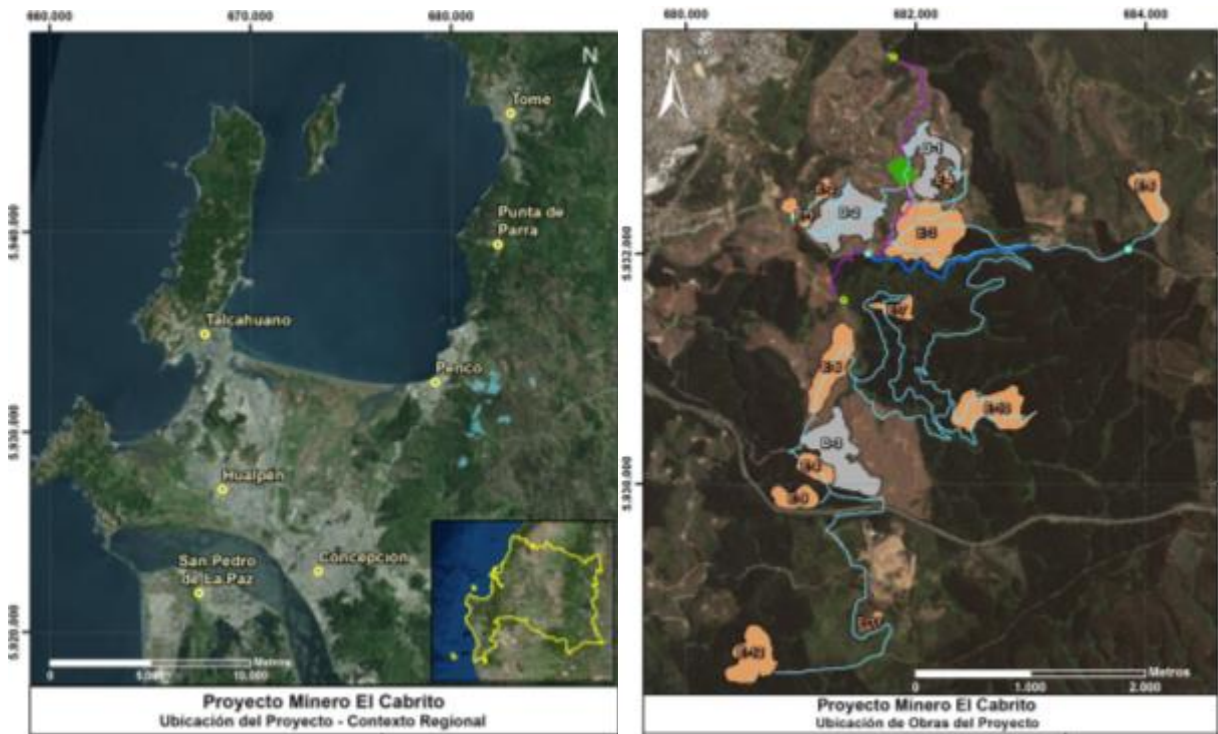
Es importante indicar que este proyecto es pequeño en términos de producción, pero es muy significativo ya que es la primera iniciativa comercial con avances significativos de desarrollo y con know how propio para el procesamiento de tierras raras.

En



La compañía presentó una Declaración de Impacto Ambiental (DIA) en mayo de 2016, la cual fue rechazada por el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) y se exigió la presentación de un Estudio de Impacto Ambiental (EIA), documento mucho más detallado, tanto del proyecto, como de las propuestas para hacerse cargo de los impactos ambientales (Diario Concepción, 2016). Actualmente la compañía se encuentra evaluando cómo continuar con el proyecto.

Figura 26. (a) Ubicación proyecto Minera El Cabrito (azul) y (b) ubicación sectores de extracción (naranja), disposición (gris) y de planta (verde) del proyecto.



Fuente: REE UNO SpA (2016).

3.3. Prospectos Cerro Carmen, Sierra Áspera y Veracruz

La Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) ha realizado desde hace décadas prospección e investigación geológica buscando uranio en el territorio nacional, en este contexto entre los años 1995 y 2003 se llevó a cabo un proyecto en conjunto con la Empresa Nacional de Minería (ENAMI) titulado “Investigación Geológica de la presencia de Elementos de Tierras Raras (REE), Cordillera de la Costa, regiones III y IV” que buscaba prospectar definir y explorar preliminarmente prospectos de tierras raras, establecer propiedad minera en los prospectos definidos a nombre de Enami y CCHEN, y, por otra parte, desarrollar técnicas metalúrgicas para obtener un concentrado comercial de óxidos de tierras raras mediante la aplicación de técnicas hidrometalúrgicas.

En este proyecto se definieron tres prospectos en las cercanías de la localidad de Diego de Almarro, III región: Sierra Áspera, Cerro Carmen y Veracruz. De estos, el prospecto Cerro Carmen fue el más prometedor por su tonelaje y leyes, el prospecto Sierra Áspera, si bien presenta mejores leyes, es de menor tonelaje. En el sector de



Cerro Carmen se realizó mapeo en superficie y se muestrearon zanjas, estimando recursos hipotéticos, inferidos e indicados, con un total de 19.805.549 toneladas de mineral con 8.203 toneladas de REE y 1.811 toneladas de uranio contenidos. Los recursos exclusivamente indicados en este prospecto son de 3.877.799 toneladas de mineral con 2.944 toneladas de elementos de tierras raras contenidos (leyes de 760 ppm aproximadamente), además de 595 toneladas de uranio.

Geológicamente, el depósitos de Cerro Carmen corresponde a un depósito tipo skarn en rocas intrusivas y volcánicas cretácicas¹². Los principales minerales con elementos de tierras raras son óxidos de REE, de hierro, de uranio y de torio además de ilmenita¹³, davidita¹⁴ y esfeno¹⁵. Destacan particularmente sus altas concentraciones de tierras raras pesadas con 140 ppm de itrio, 20 ppm de disprosio, 5 ppm de holmio, 21 ppm de erbio, 36 ppm de iterbio.

En relación a las pruebas metalúrgicas fue posible producir un concentrado con 91,3% de óxidos de REE, además de un concentrado con un 59,43% de óxido de itrio y un 90,56% de la totalidad de los REOs (CCHEN).

Actualmente la CCHEN, en conjunto con ENAMI, busca dar continuidad y avanzar en la estimación de recursos de los prospectos y, además, buscan conformar un equipo de profesionales para desarrollar las tecnologías necesarias para obtener concentrados de óxidos de REE.

3.4. REE en residuos mineros

Camchal

La Cámara Chilena-Alemana (Camchal) a cargo de Roberto Mallea realizó un estudio en el que se tomaron muestras de relaves de plantas concentradoras cobre y se realizó análisis geoquímico de 57 elementos a las muestras con el objetivo de evaluar la posibilidad de recuperar elementos de valor a partir de estos residuos mineros.

En este estudio destacan, por su contenido de elementos de tierras raras, las muestras del Tranque Carola (Coemin), con un promedio de 525 ppm de REE (con un máximo de hasta 868 ppm de REE en una de las muestras). También la Planta Vallenar y el Tranque El Salado tienen valores altos de REE con 370 y 350 ppm respectivamente (Figura 27).

Desde un punto de vista económico, la viabilidad de reprocesar estos relaves es fuertemente dependiente del contenido de cobre en ellos, ya que este es el metal de mayor interés económico. Observando los contenidos de cobre promedio se observa que el relave más rico en tierras raras es el tranque Carola con una ley de cobre baja (0,2%), y que el más rico en cobre es planta Bellavista, pero tiene el valor más bajo de REE (88 ppm de REE promedio). Sin embargo, tranques como el de Planta Vallenar y tranque El Salado, contienen valores no menores

¹² Rocas formadas durante el periodo geológico Cretácico, comprendido entre 145 y 66 millones de años AP.

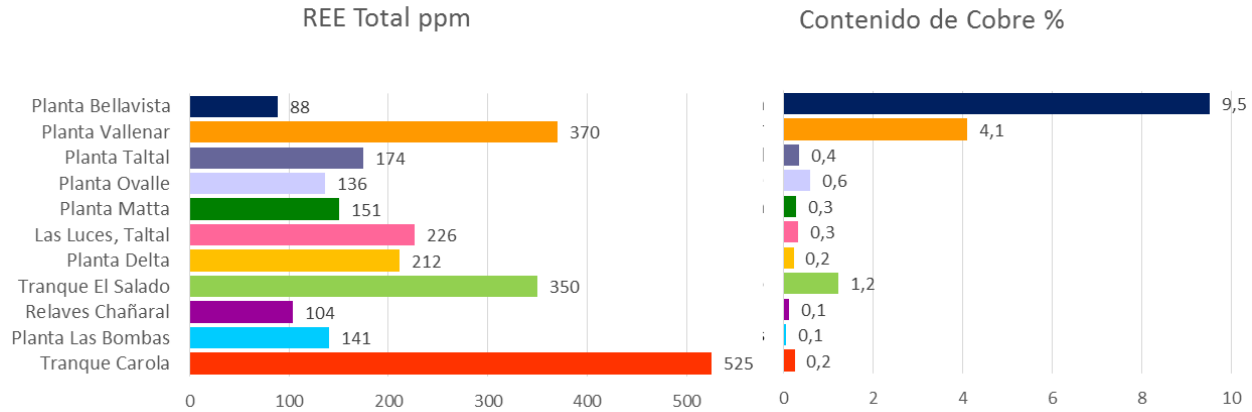
¹³ Mineral del grupo de los óxidos, fuente de hierro y titanio, su fórmula química es FeTiO_3 .

¹⁴ Mineral del grupo de los óxidos, fuente de elementos de tierras raras y uranio, su fórmula química es $(\text{La,Ce,Ca})(\text{Y,U})(\text{Ti,Fe}^{3+})_{20}\text{O}_{38}$.

¹⁵ Mineral del grupo de los silicatos, también conocido como titanita, fuente de titanio. Su fórmula química es CaTiSiO_5 .

de tierras (370 y 350 ppm en promedio, respectivamente) y además leyes de cobre muy interesantes (4,1 y 1,2% de cobre).

Figura 27. Contenido promedio de tierras raras y de cobre en relaves de la minería del cobre.



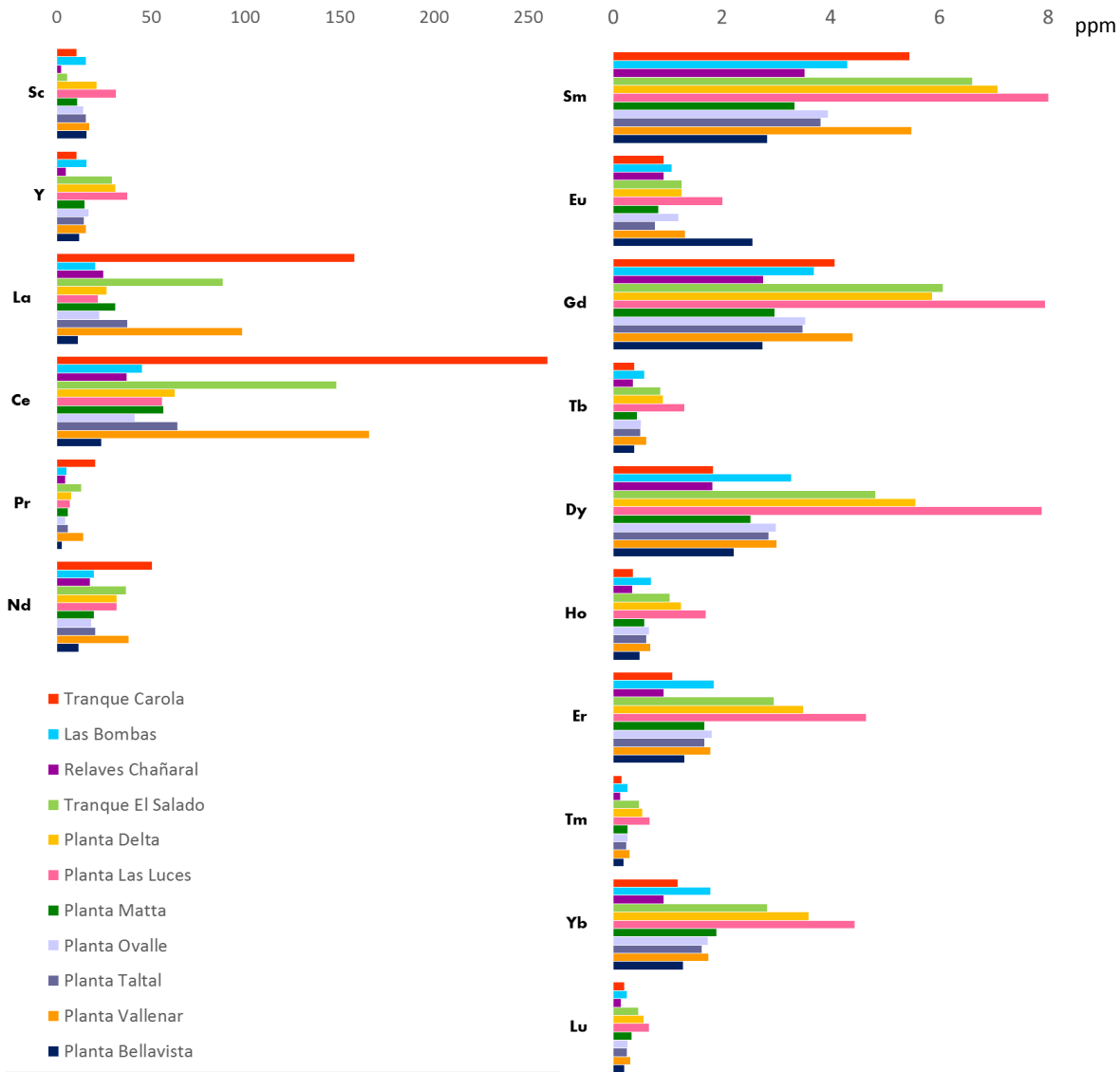
Fuente: Estudio CAMCHAL- AHK Business center S.A. (2015).

Analizando los elementos de tierras raras uno por uno (Figura 28), se observa que el tranque Carola tiene un alto contenido de tierras raras livianas, con 158 ppm de lantano en promedio y 260,52 ppm de cerio, pero es, comparativamente, pobre en tierras raras intermedias y pesadas. El relave de la Planta las Luces por su parte, presenta los valores más altos de tierras raras intermedias y pesadas, con valores promedio de 8,01 ppm de samario, 2,01 ppm de europio, 7,94 ppm de gadolinio, 1,31 ppm de terbio, 7,89 ppm de disprosio, 1,71 ppm de holmio, 4,65 ppm de erbio, 0,68 de tulio, 4,65 ppm de iterbio y 0,66 ppm de lutecio, además de 31,58 ppm de escandio y 37,75 ppm de itrio.

En tanto, los relaves de la Planta Delta y del tranque El Salado, tienen valores relativamente altos de todos los elementos de tierras raras.



Figura 28. Contenido de cada elemento de tierra rara en relaves de la minería del cobre en partes por millón.



Fuente: Estudio CAMCHAL- AHK Business center S.A. (2015).

Sernageomin

Ante la necesidad nacional de mejorar la normativa de diseño y de seguridad de los depósitos de relaves, el año 2014 se creó el Departamento de Depósitos de Relaves de Sernageomin. Este departamento, además de preocuparse de asesorar, proponer lineamientos y capacitar respecto al diseño, construcción, operación y cierres de depósitos relaves, mantiene un catastro de los depósitos existentes en Chile, y, durante el último año, ha trabajado en muestrear y analizar químicamente 45 elementos de 280 depósitos, con resultados para más de 600 muestras a julio de 2016 (Falcón, 2016). En dichos análisis químicos se han evaluado 16 elementos de tierras raras, obteniendo al menos seis muestras con valores sobre los 5000 ppm de REE e incluso una con más de 20000 ppm (Tranque Sotraminm en Taltal). Estos valores muestran una interesante oportunidad para extraer estos



elementos, por lo que debieran estudiarse con más detalle los depósitos a los que pertenecen dichas muestras para así estimar mejor el potencial económico y transformar estos pasivos ambientales en activos que ofrecen la oportunidad de hacer nuevos negocios en Chile.

Enami

También Enami, ante el problema que significan los depósitos de relave, tanto social como ambientalmente hablando, y ante la inquietud de diversificar la cartera comercial de productos mineros chilenos, ha comenzado a muestrear todos sus depósitos de relave para así estimar el potencial económico y evaluar la posibilidad de ampliar su cartera comercial.

3.5. Depósitos de óxidos de hierro-apatito

Los depósitos de óxidos de hierro-apatito, también conocidos como depósitos tipo Kiruna, son yacimientos con concentraciones anómalas de elementos de tierras raras. En Chile, específicamente en la Franja de Hierro Chilena¹⁶ se conocen varios depósitos de este tipo, siendo los más reconocidos El Romeral, Algarrobo, Los Colorados, Carmen, Cerro Imán y Cerro Negro. Estos depósitos se caracterizan por presentar magnetita masiva y menor apatito, ocurren regularmente en vetas o como cuerpos estratiformes o irregulares y se hospedan en rocas volcánicas o plutónicas de edad Jurásico a Cretácico Temprano.

Hay escasa información disponible respecto al contenido de REE en estos depósitos, pero sus similitudes con los depósitos más estudiados en otros países como Olympic Dam en Australia y Kiruna en Suecia, sugieren que este tipo de depósitos tienen una concentración alta de elementos de tierras raras en el apatito¹⁷, entre 2000 y 7000 ppm (e.g. Frietsch y Perdahl, 1995).

De todos modos, hasta la fecha, no se han explotado este tipo de yacimientos para la extracción de tierras raras, porque su ley es baja comparado con los yacimientos actualmente explotados (como Bayan Obo con 6% de REE según Zhi Li y Yang, 2014) y porque aún no existe una tecnología competitiva para su procesamiento.

¹⁶ Franja metalogénica de orientación N-S ubicada en la parte oriental de la Cordillera de la Costa, se extiende por 600 km (entre 26 y 31° de latitud S) con más de 50 depósitos de hierro.

¹⁷ Mineral del grupo de los fosfatos presente en yacimientos de este tipo. Su fórmula química es $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F},\text{Cl},\text{OH})$.



4. Comentarios Finales

Contexto internacional

Los elementos de tierras raras han sido considerados como estratégicos para el desarrollo tecnológico y de energías limpias, debido a su riesgo de suministro y su importancia económica.

Los elementos con mayor grado de criticidad y demanda son los elementos de tierras raras pesados: erbio, disprosio, terbio e itrio; y las tierras raras livianas: neodimio, praseodimio y samario. Por otra parte, se espera un exceso de tierras raras livianas como cerio y lantano en el mercado al 2020.

Desde 1985 China es por lejos el principal productor de tierras raras del mundo, registrando aproximadamente el 85% de la producción mundial en 2015, seguido por Australia con un 8% y Estados Unidos con un 3%. China tiene una marcada ventaja en este mercado gracias a su contexto geológico, ya que cuenta con los mayores yacimientos del mundo de REE (e.g. Bayan Obo y los depósitos de arcillas iónicas del sur de China) y, también, gracias a su fuerte desarrollo de tecnologías de procesamiento de tierras raras y desarrollo de productos que las utilizan (imanes permanentes, pantallas, celulares, luces LED, etc). Ello permite que en el propio país se lleven a cabo todas las etapas de la cadena de valor: extracción, procesamiento, producción y comercialización.

En el año 2010, China disminuyó las exportaciones de elementos de tierras raras en un 40%, lo cual generó una crisis de suministro y una abrupta alza de los precios (entre 10 y 40 veces los precios de 2009 para los óxidos de tierras raras). Ante este escenario, surgieron en todo el mundo iniciativas que buscan diversificar las fuentes de elementos de tierras raras, buscando nuevos yacimientos, reevaluando residuos mineros e industriales y reciclando chatarra electrónica. Por otra parte, también se han hecho esfuerzos por buscar sustitutos de las tierras raras, con escasos resultados. Si bien se han encontrado nuevos yacimientos de REE en otros países, las barreras tecnológicas para su procesamiento y separación son altísimas y China tiene una enorme ventaja en cuanto a ellas.

Al término del 2014, China terminó los controles a la exportación de estos metales a instancias de la Organización Mundial de Comercio contra China, regulando lo precios. Desde fines del 2014, dado el fin de la burbuja de precios y como respuesta a la desaceleración de la economía china los precios registran una tendencia bajista, al igual que la mayoría de los metales, estabilizándose desde el segundo semestre del 2015.

Iniciativas en Chile

Chile históricamente se ha enfocado en la minería del cobre, hierro, oro y plata, y también litio, yodo y potasio, pero la minería de las tierras raras es, hasta la fecha, bastante desconocida en el país. Sin embargo se tienen antecedentes de algunas iniciativas en Chile de extracción y procesamiento de tierras raras, lo que hace que sea relevante comenzar a generar información y análisis respecto a estos metales.

El Plan Nacional de Geología de SERNAGEOMIN busca hacer una primera aproximación a estos elementos, incorporándolos en su análisis de geoquímica de suelos. De los resultados disponibles a la fecha, se detectan ciertas zonas interesantes por su contenido de tierras raras que sugieren blancos de exploración para futuros prospectos de tierras raras.

La iniciativa de tierras raras más avanzada en Chile hasta el momento es el Proyecto Minero El Cabrito ubicado en la comuna de Penco, en la Región del Biobío. Se trata de un yacimiento de arcillas adsorbentes que además cuenta con una planta piloto de procesamiento. Actualmente se encuentra en trámite la aprobación de su DIA.

Existen además prospectos mineros de ENAMI y CChEN en la Cordillera de la Costa, III Región, dónde se han reportado depósitos de tierras raras y uranio. De estos prospectos, Sierra Áspera, Cerro Carmen y Veracruz, el prospecto Cerro Carmen es el más prometedor y se planea continuar explorando para avanzar en la estimación de recursos y reservas. La explotación de yacimientos de este tipo puede ser rentables no solo por su valor en cuanto a tierras raras, si no a otros productos de interés como el uranio.

También se han analizado contenidos de tierras raras en depósitos de relave de la minería del cobre, arrojando interesantes resultados de hasta 20000 ppm de tierras raras.

Conclusiones e implicancias políticas

Entre los años 2010 y 2013, en respuesta al alza de los precios, se generaron alta expectativas respecto a este mercado, producto de la crisis de suministro antes la disminución de las exportaciones chinas, y se impulsaron numerosas iniciativas que buscaban entrar a él. Sin embargo, actualmente, con las nuevas condiciones del mercado sumado a la disminución generalizada en los precios de los commodities, las perspectivas son menos favorables que hace tres años. A pesar de esto, aún existen algunos elementos de tierras raras con mayor retorno como el praseodimio, neodimio y disprosio por su alta demanda en la fabricación de imanes permanentes. En este contexto, es recomendable que al evaluar los prospectos y proyectos mineros, los elementos de tierras raras no se consideren como un conjunto, sino que se evalúen los elementos individualmente.

Se reconoce en Chile un potencial geológico interesante de tierras raras concentrado en la Cordillera de la Costa tanto en el norte como en el sur a pesar de los contrastes geológicos: en el norte se presentan como yacimientos en roca de tierras raras y uranio en el norte (III Región) y en el sur; como yacimientos de arcillas iónicas (VIII región). Estos sectores deberían definir guías de exploración a futuro.

La implementación de proyectos de tierras raras en Chile representa dos grandes oportunidades para el país, en primer lugar la diversificación de la minería, abriendo una nueva industria, y, por otra parte, el desarrollo de proyectos mineros en regiones que no son tradicionalmente mineras. También, este tipo de proyectos son importante para impulsar la mediana minería.

Las principales dificultades que enfrentan los inversionistas de proyectos de REE en Chile, son las exigencias ambientales vigentes, la inversión necesaria, la baja ley de los yacimientos en comparación con los yacimientos explotados en China y la poca experiencia de profesionales en materias de geología, extracción y procesamiento de tierras raras, esto sumado a que actualmente las tierras raras se encuentran en un ciclo de precios bajos afectadas al igual que la mayoría de los commodities. De esta manera, este estudio contribuye a generar más información la que debiera ser complementada con una formación más amplia de los profesionales de la industria minera en Chile y con una mayor difusión de parte del estado sobre las reales potencialidades de este tipo de minería.



5. Referencias

- Adamas Intelligence. (2015). *Rare Earth Market Outlook Update: Supply, Demand, and Pricing f2014 through 2020*.
- Binnemans, K., Jones, P. T., Blanpain, B., Van Gerven, T., & Pontikes, Y. (2015). Towards zero-waste valorisation of rare-earth-containing industrial process residues: a critical review. *Journal of Cleaner Production*, 99, 17-38.
- Binnemans, K., Jones, P. T., Blanpain, B., Van Gerven, T., Yang, Y., Walton, A., & Buchert, M. (2013). Recycling of rare earths: a critical review. *Journal of Cleaner Production*, 51, 1-22.
- Bureau de Recherches Géologiques et Minières . (2015). *Panorama 2014 du marché des Terres Rares*.
- CAMCHAL- AHK Business center S.A. (2015). *Identificar elementos de valor en residuos mineros (relaves) y evaluar su recuperación como productos comerciales- 13BPC3-19021- Infome Técnico Final*. Antofagasta: CORFO.
- Castor, S. B., & Hedrick, J. B. (2006). Rare earth elements. (m. a. Society for mining, Ed.) *Industrial minerals volume*, 7, 769-792.
- Connexiones. (2016). *Rare Earth Metals: The Impact of Short Supplies*. Obtenido de <http://www.connexiones.com/rare-earth-metals-shortages>
- Construcción Minera. (1 de abril de 2016). Recuperado el 02 de junio de 2016, de Proyecto BioLantánidos: En la mira de nuevos recursos mineros: <http://www.construccionminera.cl/proyecto-biolantanidos-en-la-mira-de-nuevos-recursos-mineros/>
- Diario Concepción. (agosto de 2016). *Diario Concepción*. Obtenido de Proyecto minero El Cabrito en jaque tras resolución ambiental: <http://diarioconcepcion.cl/?q=content/proyecto-minero-el-cabrito-en-jaque-tras-resoluci%C3%B3n-del-sea>
- Elsevier. (2014). Part 4: Substitution. En *Rare Earth Elements*.
- EPA . (2012). *Rare Earth Elements: A Review of Production, Processing, Recycling, and Associated Environmental Issues*.
- European Comission. (2014). *REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU- Report of the Ad hoc Working Group on defining critical raw materials*.
- Falcón, F. (2016). Presentación "Departamento de Depósito de Relaves". Taller proyecto Hefestos, Enami, Santiago.
- Frietsch, R., & Perdahl, J.-A. (1995). are earth elements in apatite and magnetite in Kiruna-type iron ores and some other iron ore types. *Ore Geology Reviews*, 489-510.
- GéoMégA. (2016). Innord Fee Rre Separation. *SME Mining Finance Conference*. New York.
- <http://los-iman.es.com/iman.es-permanentes-los-iman.es-de-tierras-raras/>. (2 de 6 de 2016). Recuperado el 2 de 6 de 2016
- Information Office of the State Council. (2012). *Situation and Policies of China's Rare Earth Industry*. China.

- JHA, A. R. (2014). *Rare Earth Materials: Properties and Applications*.
- Krishnamurthy, N., & Gupta, C. K. (2004). *Extractive metallurgy of rare earths*. CRC press.
- Lacassie, J. P., Vivallo, W., Díaz, A., & Ruiz-del-Solar, J. (2015). Geoquímica de yacimientos metálicos y de sedimentos, de las regiones de Atacama y Coquimbo, norte de Chile. *XIV Congreso Geológico Chileno*, 2, págs. 429-432. La Serena.
- Linnen, R. L., Van Lichtervelde, M., & Černý, P. (2012). Granitic pegmatites as sources of strategic metals. *Elements*, 8(4), 275-280.
- Los Imanes. (2016). *Imanes Permanentes*. "Los Imanes de Tierras Raras". Obtenido de <http://los-iman.es.com/iman.es-permanentes-los-iman.es-de-tierras-raras/>
- Mariano, A. (1989a). Economic geology of rare earth minerals. (M. S. America, Ed.) *Reviews in mineralogy and geochemistry*, 21(1), 309-337.
- Matich, T. (2015). Earth Investing News.
- Peelman, S., Sun, Z., Sietsma, J., & Yang, Y. (2014). Leaching of rare earth elements: past and present. *1st European Rare Earth Resources Conference*, (págs. 446-456). Milos.
- REE UNO SpA. (2016). *Proyecto Minero el Cabrito*. Declaración de Impacto Ambiental, Minera BioLantánidos.
- Schüler, D., Buchert, M., Liu, R., Dittrich, S., & Merz, C. (2011). Study on rare earths and their recycling. *Öko-Institut eV Darmstadt*.
- Su, W. (2009). Economic and Policy Analysis of China's Rare Earth Industry. *China Financial and Economic Publishing House, Beijing*.
- United Nations. (2014). *Commodities at a glance, special issue on rare earths*. Nueva York.
- Wübbecke, J. (2013). Rare earth elements in China: Policies and narratives of reinventing an industry. *Resources Policy*, 384-394.
- Yang, X. J., Lin, A., Li, X.-L., Wu, Y., Zhou, W., & Chen, Z. (2013). China's ion-adsorption rare earth resources, mining consequences and preservation. *Environmental Development*, 131-136.
- Zhi Li, L., & Yang, X. (2014). CHINA'S RARE EARTH ORE DEPOSITS AND BENEFICIATION TECHNIQUES. *1st European Rare Earth Resources Conference*, (págs. 26-36). Milos.



Anexos

Precios óxidos de tierras raras

Tabla 14. Precios de óxidos de tierras raras en 2006, 2011 y 2016.

Precios de las principales tierras raras	31-12-2006	31-07-2011	31-03-2016
Óxido de cerio, min 99%, FOB, China, US\$/kg	1,7	140,5	1,6
Óxido de disprosio, min 99%, FOB, China, US\$/kg	107	3.092,5	275
Óxido de europio, min 99%, FOB, China, US\$/kg	550	6.290	260
Óxido de lantano, min 99%, FOB, China, US\$/kg	2,3	140,05	1,7
Óxido de neodimio, min 99%, FOB, China, \$/kg	23,75	369,75	39,5
Óxido de praseodimio, min 99%, FOB, China, US\$/kg	38,05	250,25	47,5
Óxido de samario, min 99%, FOB, China, \$/kg	2,4	136	1,9
Óxido de terbio, min 99%, FOB, China, US\$/kg	670	4.945	500
Óxido de escandio, min 99,5%, China, ¥/kg	n/d	29.500	9.750
Óxido de gadolinio, min 99%, China, ¥/kg	n/d	695,5	69,5
Óxido de holmio, min 99,5%, China, ¥/kg	n/d	3.745	250,5
Óxido de erbio, min 99%, FOB, China, US\$/kg	n/d	295	27,5
Óxido de itrio, min 99%, FOB, China, US\$/kg	26	216	36,5
Óxido de iterbio, US\$/kg	n/d	n/d	142,5
Óxido de lutecio, 99,9%, China, ¥/kg		5.900	4.550

***Nota:** FOB: Free on board.

Fuente: Reuters.



Este trabajo fue elaborado en la
Dirección de Estudios y Políticas Públicas por

Daniela Villela Olavarría

Analista Mercado Minero

Francisco Donoso Rojas

Analista Mercado Minero

Jorge Cantallopts Araya

Director de Estudios y Políticas Públicas

Agosto / 2016

