



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

ELEMENTOS CRÍTICOS ENERGÉTICOS:  
POTENCIAL DE DESARROLLO EN CHILE

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN MINERÍA  
MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

ARTURO PRIETO MATTE

PROFESOR GUIA:  
WILLY KRACHT GAJARDO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
CHRISTIAN MOSCOSO WALLACE<sup>†</sup>  
BRIAN TOWNLEY CALLEJAS  
JORGE BANDE BRUCK

SANTIAGO DE CHILE  
AÑO 2014

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE: Ingeniero Civil de Minas y grado de Magister en Minería  
POR: Arturo Prieto Matte  
FECHA: 22/12/2013  
PROFESOR GUÍA: Willy Kracht Gajardo

### **Elementos Críticos Energéticos: Potencial de Desarrollo en Chile**

A nivel mundial existe una gran preocupación por el abastecimiento de ciertos elementos químicos en particular, grupo que el departamento de energía de Estados Unidos ha denominado “Elementos energéticos críticos” (ECE, por su sigla en inglés) y que son claves para el desarrollo de tecnologías energéticamente eficientes. Si a este fenómeno se agrega la necesidad en Chile de diversificar su industria minera es válido preguntarse si el país puede jugar un nuevo rol en el abastecimiento de estos elementos.

Para comprender lo que el mundo considera como Elementos Críticos Energéticos se consideró diversas publicaciones estatales de los países de Europa, China, Estados Unidos y Japón. A partir de éstas, y tomando en cuenta criterios de niveles de riesgo y el comportamiento del mercado en el largo plazo se determinó que a nivel mundial los ECE son Neodimio, Disprosio, Europio, Galio, Indio, Itrio, Telurio, Terbio.

Definido lo que el mundo considera como ECE, se evaluó en cuál de estos ocho elementos Chile posee un potencial para participar en el mercado como un oferente competitivo. Para esto se consideró los recursos geológicos del país asociados a sus principales yacimientos como también los “desechos” obtenidos en las planta de beneficio de las principales operaciones del país. Se determinó que si bien existe un potencial para Neodimio, Disprosio, Europio, Terbio e Itrio estos no logran ser competitivos con lo que actualmente ocurre a nivel mundial, por su parte para Galio e Indio simplemente no existe evidencia de que Chile posea un potencial asociado y por último el caso del Telurio es el más interesante pues Chile prácticamente no participa del mercado sin embargo más del 90% del Telurio producido a nivel mundial se obtiene de los barros anódicos de Cobre.

Analizando en profundidad el mercado del Telurio queda en evidencia que Chile posee un enorme potencial y la competitividad del mercado está fuertemente controlada por quienes producen barro anódico y por lo tanto Chile, como principal productor mundial de Cobre y el segundo país del mundo con mayor capacidad de refinería electrolítica, posee una oportunidad que no ha aprovechado. Esta oportunidad se fortalece fuertemente cuando se considera avanzar en la cadena de valor de productos o compuestos de Telurio y se desprende que Codelco, por ser el dueño del barro anódico, es el candidato más adecuado a desarrollar la iniciativa.

Finalmente más allá de los resultados obtenidos para los ECE se considera que la metodología de prever el desarrollo de mercados incipientes es de gran ayuda para avanzar en el desarrollo del país, hacer de su industria minera una más diversificada y aportar a que Chile deje de ser exportador de materia prima y haga uso de ésta para desarrollar la industria y la tecnología local.

## **Dedicatoria**

A toda mi familia: padre, madre y mis hermanos.

A todos mis amigos que fueron parte de mi historia académica.

Al Profesor Christian Moscoso W<sup>†</sup>.

## **Agradecimientos**

*A mis padres y hermanos por su paciencia durante el proceso*

*A mi profesor guía (inicial) Prof. Christian Moscoso W<sup>†</sup>. por su paciencia, compañía y apoyo en el proceso de idear y desarrollar la investigación.*

*A Andrés Susaeta por darme la idea inicial para desarrollar esta investigación*

*A Emilio Castillo D. por su aporte en datos y materiales para el desarrollo de la investigación*

*A mis amigos universitarios por estos 8 años de compañía.*

*A Catalina Henríquez por su ayuda en la confección de este documento.*

# Tabla de Contenido

Capítulo 1 Introducción .....	1
1.1 Justificación .....	2
1.2 Objetivos .....	3
1.3 Alcances y Metodología .....	4
Capítulo 2 Análisis mundial del concepto Elementos Críticos Energéticos .....	6
2.1 Generalidades.....	6
2.2 ECE en General .....	6
2.2.1 Definiciones .....	7
2.2.2 Geología, minería y metalurgia.....	8
2.2.3 Mercado.....	9
2.3 Elementos críticos por país .....	10
2.4 Análisis .....	11
2.4.1 Análisis ECE .....	11
2.4.2 Análisis otros Países.....	17
2.5 Conclusiones del concepto mundial de ECE .....	18
Capítulo 3 Recursos geológicos .....	20
3.1 Generalidades.....	20
3.2 Modelo geológico económico de Chile .....	22
3.2.1 Minería Metálica .....	22
3.2.1.1 Iron oxide copper and gold.....	24
3.2.1.2 Yacimientos de Hierro Apatito .....	26
3.2.2 Minería no metálica.....	28
3.3 Cuantificación de recursos de Elementos Críticos Energéticos.....	29
3.3.1 Yacimientos de Óxidos de Hierro, Cobre y Oro (IOCG) .....	29
3.3.2 Yacimientos de Hierro Apatito .....	32
3.3.2.1 Cerro Carmen .....	32
3.3.2.2 Imán.....	35
3.3.2.3 El Laco .....	36
3.4 Análisis de recursos geológicos.....	38

Capítulo 4 Recursos metalúrgicos .....	39
4.1 Generalidades.....	39
4.2 Pórfidos cupríferos.....	40
4.2.1 Relaves .....	41
4.2.2 Escoria.....	44
4.2.3 Barro anódico .....	48
4.2.4 Ripios de lixiviación.....	55
4.3 Óxidos de Hierro, Cobre y Oro.....	57
4.3.1 Relave.....	59
4.3.2 Escoria y barro anódico.....	61
4.3.3 Ripios .....	62
4.4 Hierro Apatito .....	63
4.4.1 Descarte seco.....	68
4.4.2 Relave y relave de impurezas.....	70
4.5 Análisis de recursos metalúrgicos.....	72
 Capítulo 5 Telurio.....	 73
5.1 Elección .....	73
5.1.1 Tierras Raras .....	73
5.1.2 Telurio .....	75
5.1.3 Otros.....	77
5.2 Antecedentes del Telurio .....	79
5.2.1 Recursos y reservas .....	79
5.2.1.1 Tendencias y pronóstico.....	82
5.2.2 Mercado.....	83
5.2.2.1 Historia (1930-1990).....	83
5.2.2.2 Historia reciente (1990-2010) .....	87
5.2.2.3 Actualidad (2010-2012) .....	94
5.2.3 Aplicaciones, sustitutos y reciclaje .....	98
5.2.4 Chile y el mercado del Telurio.....	98
5.2.4.1 Participación histórica.....	99
5.2.4.2 Producción aparente .....	102

5.3	Demanda del Telurio .....	108
5.3.1	Factores que influyen en la demanda .....	109
5.4	Oferta del Telurio.....	119
5.5	Atractividad .....	128
5.6	Competitividad.....	141
Capítulo 6 Conclusiones.....		151
Bibliografía.....		154
Anexos.....		160
A.	Elementos Críticos Energéticos por país.....	160
1.	Estados Unidos .....	160
1.1	APS y MRS (Jaffe, y otros, 2011) .....	160
1.2	Departamento de Energía (DoE, 2011).....	164
1.2.1	Evaluación Técnica .....	164
1.2.2	Evaluación de Riesgo.....	165
2.	Comunidad europea (Moss, Tzimas, Kara, Willis, & Kooroshy, 2011) .....	168
2.1	Evaluación Económica .....	169
2.2	Evaluación de Riesgo.....	171
3.	China, India y Japón .....	175
3.1	China.....	175
3.2	Japón .....	177
3.3	India .....	178
B.	Producción de Cobre en Chile por tipo de producto .....	179
C.	Supuestos operacionales.....	179
D.	Ripios de lixiviación Pórfidos Cupríferos .....	180
E.	Relave IOCG .....	184
F.	Descubrimiento y generalidades del Telurio .....	187
G.	Propiedades del Telurio.....	189
H.	Fuentes.....	190
I.	Aplicaciones históricas del Telurio y su evolución.....	192

## Índice de Diagramas

Diagrama 2.4.1-1 Elementos Críticos por Institución .....	12
Diagrama 2.4.1-2 Análisis de ECE elegidos .....	13
Diagrama 4.2-1 Diagrama Productivo Pórfidos de Cobre.....	41
Diagrama 4.2.2-1 Diagrama de fusión Conversión Cobre .....	45
Diagrama 4.2.3-1 Diagrama Electro refinación Cu.....	49
Diagrama 4.4-1 Proceso productivo del Fierro .....	64
Diagrama 5.4-1 Diagrama del Proceso de obtención de Telurio.....	121
Diagrama 5.6-1 Análisis de Porter .....	147
Diagrama D-1 Diagrama de lixiviación de Minerales de Cu .....	181

## Índice de Gráficos

Gráfico 4.2.2-1 Producción chilena de Cobre Mina y Fundición.....	47
Gráfico 4.2.3-1 Producción en Chile de Cobre Mina y Refinería .....	54
Gráfico 5.2.1-1 Distribución de las reservas de Telurio.....	79
Gráfico 5.2.2.1-1 Producción mundial de Telurio 1930-1990 según USGS.....	84
Gráfico 5.2.2.1-2 Principales aplicaciones del Telurio en EEUU y producción mundial .....	85
Gráfico 5.2.2.1-3 Precio Telurio a dólares constantes de 1960 y corrientes .....	86
Gráfico 5.2.2.2-1 Producción de Telurio por país según WMS .....	88
Gráfico 5.2.2.2-2 Precio Te, Índice de metales (FMI) y Producción Te (WMS).....	93
Gráfico 5.2.2.3-1 Precio del Telurio e Índice de Metales FMI .....	97
Gráfico 5.2.4.1-1 Producción chilena de Telurio en toneladas .....	99
Gráfico 5.2.4.1-2 Cantidades [ton] y destinos de comercialización de Barros Anódicos de Ag	101
Gráfico 5.2.4.2-1 Producción de Cobre por producto 1994-2012 [KTMF] .....	104
Gráfico 5.2.4.2-2 Producción de barro anódico a partir de productos de Cobre .....	104
Gráfico 5.2.4.2-3 Distribución de valor y Telurio refinado perdido por Chile 1994-2012.....	105
Gráfico 5.3.1-1 Intensidad de uso del Telurio en EEUU.....	109
Gráfico 5.3.1-2 Relación Precio-Demanda Telurio en EEUU .....	111
Gráfico 5.3.1-3 Precios complementarios del Telurio y su consumo en EEUU (1990=100) .....	112
Gráfico 5.3.1-4 Precios sustitutos del Telurio y su consumo en EEUU (1990=100).....	114
Gráfico 5.4-1 Oferta mundial del Telurio.....	120
Gráfico 5.4-2 Producción mundial de Telurio.....	122
Gráfico 5.4-3 Oferta de Cobre y Selenio en función de producción de Telurio.....	124
Gráfico 5.4-4 Concentración de la Oferta de Telurio .....	126
Gráfico 5.5-1 Producción mundial de paneles fotovoltaicos de CdTe .....	133
Gráfico 5.5-2 Escenarios potencia fotovoltaica instalada .....	135
Gráfico 5.5-3 Proyección demanda mundial de Telurio.....	138
Gráfico 5.5-4 Participación de CdTe en industria fotovoltaica .....	139
Gráfico 3.1-1 Producción China y Mundial de óxidos de Tierras Raras.....	175
Gráfico 3.2-1 Importaciones japonesas de TTRR desde China.....	177



## Índice de Ilustraciones

Ilustración 2.4.1-1 Riesgo e Importancia ECE según DoE a corto plazo.....	16
Ilustración 2.4.1-2 Riesgo e Importancia ECE según DoE a mediano plazo.....	16
Ilustración 3.2.1.1-1 IOCG en Chile.....	24
Ilustración 3.2.1.2-1 Fe-Ap de Chile.....	26
Ilustración 3.3.1-1 Detalle Distrito Punta del Cobre.....	29
Ilustración 1.1-1 ECE según APS y MRS.....	161
Ilustración 1.2.1-1 Elementos críticos según DoE.....	165
Ilustración 1.2.2-1 Riesgo e importancia ECE según DoE a corto plazo (5 años).....	166
Ilustración 1.2.2-2 Riesgo e Importancia ECE según DoE a mediano plazo (15 años).....	166
Ilustración 2.1-1 Elementos críticos según JRC-IET.....	170
Ilustración G-1 Tabla Periódica de Elementos: El Telurio.....	189
Ilustración H-1 Abundancia relativa de los elementos en la corteza terrestre continental.....	190

## Índice de Tablas

Tabla 2.4.1-1 Factores de riesgo por elemento según JRC.....	15
Tabla 3.1-1 Precio Elementos Convencionales y Críticos.....	21
Tabla 3.2.1.1-1 Tonelaje y Leyes de IOCG en Chile.....	25
Tabla 3.3.1-1 Leyes y valores contenidos yacimientos Distrito Punta del Cobre.....	30
Tabla 3.3.2.1-1 Leyes y valores contenidos Prospectos Cerro Carmen y Sierra Áspera.....	33
Tabla 3.3.2.1-2 Extrapolación muestra puntual a Mineral Indicado.....	34
Tabla 3.3.2.2-1 Leyes y valores Contenidos en Imán.....	36
Tabla 3.3.2.3-1 Rango de posibles composiciones y valores contenido de El Laco.....	37
Tabla 4.2.1-1 Supuestos Flotación de Cobre.....	42
Tabla 4.2.1-2 Ley Media de TTRR Relave Cauquenes.....	43
Tabla 4.2.1-3 Valor contenido de TTRR del Relave Cauquenes.....	43
Tabla 4.2.3-1 Rangos de composición barro anódico.....	52
Tabla 4.2.3-2 Rango de Valor contenido de Barros Anódicos.....	52
Tabla 4.3.1-1 Producción Relave IOCG año 2011.....	59
Tabla 4.3.1-2 Composición media Relave Ojos del Salado y Candelaria.....	59
Tabla 4.4-1 Producción de Hierro Reportada.....	65
Tabla 4.4-2 Producción CMP desagregada.....	66
Tabla 4.4-3 Participación por producto CMP.....	67
Tabla 4.4.1-1 Ley Tierras Raras en rechazos secos.....	69
Tabla 5.2.1-1 Reservas de Telurio según M-J.....	80
Tabla 5.2.1-2 Reservas de Telurio año 2001 Mining Journal y USGS.....	81
Tabla 5.2.2.2-1 Producción de Telurio en toneladas según Crowson 1990 1995 y 1996.....	89
Tabla 5.2.2.2-2 Producción de Telurio de algunos países en diversas fuentes.....	90
Tabla 5.2.2.2-3 Consumo mundial y EEUU de Telurio en toneladas.....	91
Tabla 5.2.2.3-1 Producción de Telurio 2010, 2011 y 2012.....	95

Tabla 5.2.2.3-2 Flujos de Telurio en EEUU en toneladas .....	96
Tabla 5.2.4.1-1 Destinos Comercialización de Telurio en Chile.....	100
Tabla 5.2.4.1-2 Cantidades [ton] y destinos de comercialización de Barros Anódicos de Au....	101
Tabla 5.2.4.2-1 Producción real de Telurio 1994-2012.....	106
Tabla 5.2.4.2-2 Rangos de Valor y Telurio perdido entre 1994-2012.....	106
Tabla 5.3.1-1 Elasticidades de Complementos.....	113
Tabla 5.3.1-2 Elasticidades de sustitutos.....	115
Tabla 5.4-1 Balance de Telurio en Planta de Metales Nobles.....	123
Tabla 5.5-1 Escenarios de penetración tecnología CdTe .....	135
Tabla 5.5-2 Escenarios de Intensidad de Uso [ton de Te/GWp] .....	136
Tabla 5.5-3 Demanda Telurio año 2012.....	137
Tabla 2.2-1 Factores de riesgo por elemento según JRC .....	171
Tabla E-1 Producción Relave IOCG año 2011 .....	185
Tabla E-2 Composición media Relave Ojos del Salado y Candelaria .....	186

## Capítulo 1 Introducción

A nivel mundial existe una gran preocupación por el abastecimiento de ciertos elementos químicos en particular, grupo que el departamento de energía de estados unidos ha denominado “Elementos energéticos críticos” (ECE, por su sigla en inglés). Estos elementos, claves para el desarrollo de tecnologías energéticamente eficientes, han estado en boga el último tiempo por su inestable estructura de mercado y una vez más China posee un rol determinante. El país asiático posee más del 95% de la producción mundial de algunos de estos elementos, y si bien que un país concentre un mercado no es negativo per se, la preocupación se hace evidente cuando el año 2010 China decidió generar cuotas de exportación de estos elementos lo que produjo, entre otras cosas, diferencias de precios en el mercado interno y externo del país y una escasez a nivel mundial de estos elementos.

La consecuencia inmediata en los países desarrollados ha sido la misma: lograr independizarse del suministro chino en estas materias a toda costa. Se han iniciado exploraciones en diversos países, alianzas entre empresas consumidoras y exploradoras de estos elementos, en Australia y Canadá se han abierto a la bolsa más de 10 proyectos de exploración con estos elementos como objetivo principal, en India también han empezado a explorar, e incluso los mismos chinos han empezado a buscar recursos fuera de su territorio y han generado conversaciones con el gobierno danés por el potencial que tiene Groenlandia como reserva de estos elementos.

Luego, en el marco caótico de estos mercados, surge la siguiente pregunta: ¿Tiene Chile algún rol que jugar en esta industria surgente? De ser así, ¿En cuál de estos mercados? ¿En todos o es mejor concentrarse en alguno en particular? ¿Qué sabe Chile de sí mismo respecto de estos elementos? ¿Se han explorado alguna vez en Chile?

Basado en los yacimientos principales que posee Chile (pórfidos cupríferos, Hierro Apatito e IOCG, todos de gran escala) y considerando además que Chile posee una amplia tradición minera (de más de 200 años) e incluso actualmente es un país referente a nivel mundial en ciertos aspectos de esta industria (minería, metalurgia y también desarrollador de nuevos mercados como el del Molibdeno) se sostiene pensar que el país sí puede ser un actor relevante en estos nuevos mercados y que lo necesario es identificar en cuál de estos mercados el potencial de Chile es el más atractivo.

De esta forma el presente trabajo de investigación se divide en tres etapas principales, la primera es identificar lo que a nivel mundial se entiende como Elementos Críticos Energéticos, la segunda etapa consiste en evaluar el potencial geológico y metalúrgico que posee Chile en los elementos definidos en la primera etapa. Finalmente de existir algún elemento en el que Chile posea un potencial entonces la tercera etapa del trabajo consiste en un estudio acabado del mercado del (los) elemento(s) seleccionados. Esta etapa incorpora un análisis de atractividad y competitividad además de una comprensión de cuál ha sido la relación de Chile con este mercado.

## 1.1 Justificación

Este proyecto de investigación se vuelve interesante de llevarlo a cabo por dos razones principales, la primera tiene que ver con la necesidad de diversificar la industria minera del país y reducir la dependencia de su economía global a la industria del Cobre. Si se considera el hecho de que la economía de Chile es lo que académicamente se denomina una economía minera (más del 10% del PIB corresponde a esta actividad) se torna interesante evaluar como Chile puede encontrar nuevas líneas de desarrollo en esta industria. Como es conocimiento general a inicios del siglo XIX Chile basaba su economía en la exportación de salitre y sus derivados sin embargo cuando el estado alemán logró crear salitre sintético a menor costo Chile cayó en una crisis económica que tomo varios años revertir.

Hoy en día el Cobre es el nuevo salitre de Chile en términos de la importancia económica y si bien la teoría económica ha aportado conocimiento y herramientas para que no se vuelvan a experimentar situaciones como las de comienzos del siglo XX, claramente como país nos vemos expuestos a un riesgo real ante una eventual reducción de la industria cuprífera mundial. En ese sentido existen a grandes rasgos dos posibles caminos para reducir o postergar este riesgo: desarrollar nuevas aplicaciones para el Cobre de forma tal que se extienda su ciclo de vida de producto (actualmente eso está ocurriendo con el programa Cu+: cobre bactericida), mientras que el segundo camino es encontrar nuevos focos de desarrollo de la industria minera en Chile que incorpore nuevos elementos y por ende la industria se diversifique.

El segundo argumento por el cual se justifica realizar esta investigación es también de carácter económico sin embargo ya no está relacionado con la industria minera en sí. Ocurre que estos Elementos Críticos Energéticos se caracterizan por ser industrias y mercados actualmente pequeños pero de gran potencial (en tamaño y por ende en valor) en su futuro, por lo que los países que logren adelantarse a este inminente desarrollo podrán, en el largo plazo, hacer uso de una ubicación estratégica en estos mercados. Esta estrategia se traduce en un país que sea referente a nivel mundial en los procesos y/o aplicaciones de estos elementos. De esta forma Chile podrá avanzar en su desarrollo moviéndose desde un país productor de materia prima a uno que genera conocimiento, valor agregado, e incluso tecnología. Todos estos “sub-productos” de este eventual desarrollo podrán ser un ejemplo a seguir en los futuros cambios de la industria minera. Los fundamentos teóricos económicos que respaldan este segundo argumento han sido estudiados por Paul Krugmann en su concepto de “teoría del nuevo comercio”, por Michael Porter en su concepto de “las ventajas competitivas de las naciones” y por Ricardo Hausmann en su concepto de “espacio producto”.

De esta forma el trabajo a realizar entregará un conocimiento valioso y además propondrá una herramienta metodológica para que a futuro, cuando el tema relevante a nivel mundial no sea la energía, Chile pueda volver a preguntarse cómo participar con sus recursos minerales en esta nueva preocupación global.

## 1.2 Objetivos

Basado en la hipótesis anteriormente planteada se tiene que el objetivo general es determinar si Chile posee potencial para constituirse como una nueva oferta de Elementos Críticos Energéticos a nivel mundial. De existir este potencial para uno o más de los elementos en cuestión entonces se debe realizar un análisis donde se exponga la estructura actual del mercado (Oferta, Demanda, Concentración, Aplicaciones y Proyecciones), la Atractividad de éste y su Competitividad.

A partir del objetivo principal se desprenden objetivos específicos para cada una de las tres etapas del trabajo de investigación.

**Elementos Críticos Energéticos:** Identificar cuáles son los elementos más interesantes de analizar, no en términos de que se puedan producir en Chile o no, sino desde el punto de vista de la importancia que tomaran en el futuro y de lo estratégica que se ha tornado la oferta a nivel mundial.

**Determinación del potencial en Chile:** Una vez comprendido los elementos en que el mundo está interesado asegurar una oferta confiable entonces se debe determinar si Chile posee un potencial geológico o metalúrgico como proveedor de estos elementos. Así se desprende un objetivo para cada tipo de potencial

- a. **Potencial geológico:** Basado en un modelo general de la geología de Chile se debe determinar si el actual conocimiento geo-científico del país entrega inferencias de un potencial geológico-económico para alguno de los elementos definidos en el punto anterior.
- b. **Potencial metalúrgico:** Basado en las actuales líneas de procesos metalúrgicos de beneficio (lixiviación, flotación, fundición, refinación y concentración magnética) se debe determinar si los descartes de estos procesos poseen un potencial económico como fuente para alguno de los elementos definidos en el punto anterior. En concreto, es evaluar si estos “sub-productos” metalúrgicos pueden representar una fuente interesante de estos elementos.

**Análisis de mercado(s):** Si Chile posee potencial como oferente de alguno de los elementos definidos en el punto uno, se tiene que este o estos mercado(s) debe(n) ser estudiado(s) en profundidad para entender su estructura, principales actores y también se debe definir cuál es su atractividad y determinar, desde el punto de vista privado, la eventual competitividad que tendría una iniciativa productiva en el país. Por último de existir una relación entre Chile y este o estos mercados se debe entender cómo ha sido esta relación y como, a través del análisis realizado previamente, podría potenciarse en beneficio del país.

### 1.3 Alcances y Metodología

Basado en las tres etapas definidas para la tesis se procede a proponer la metodología de trabajo y los alcances para cada una de estas fases del proyecto de investigación.

**Elementos Críticos Energéticos:** Para las economías desarrolladas los ECE son generalmente elementos cuya disponibilidad no está asegurada ya sea por razones geográficas, políticas o de cualquier otra índole. En ese sentido para Chile la definición de ECE es la misma sin embargo el argumento es el opuesto, ya que para el país los ECE representan oportunidades de mercados en los que Chile podría participar si cuenta con los recursos minerales. Así los alcances de esta sección del trabajo serán determinar lo que Estados Unidos, la Comunidad Europea, Japón y China han definido, cada uno de manera independiente, como Elementos Críticos Energéticos. Para realizar esto se utilizan tres publicaciones de carácter estatal que han emitido Estados Unidos y la Comunidad Europea. Por su parte para entender a los países asiáticos se realizará un análisis sobre cómo estos elementos influyen actualmente en la forma en que ambos estados se relacionan entre sí.

**Determinación del potencial en Chile:** los alcances de esta etapa corresponden a realizar un catastro de los recursos metalúrgicos y geológicos existentes en el país y determinar el tamaño (volumen) y la calidad (composición y ley) de cada uno de estos recursos. Además se considerarán precios para cada uno de los ECE definidos en la etapa anterior con el objetivo de determinar el valor contenido del recurso asociado a estos elementos.

- a. **Potencial geológico:** A partir de los diversos modelos teóricos de enriquecimiento de los principales yacimientos metálicos de Chile (IOCG, Fierro Apatito y pórfidos cupríferos) se debe identificar cuales elementos críticos energéticos podrían estar presente, de manera económicamente interesante, en la geología chilena. Definido esto se procederá a determinar las leyes de estos ECE en cada tipo de yacimiento y se cuantificará el volumen de estos recursos y como la presencia de alguno de estos elementos aporta un valor extra al yacimiento. Este aporte será medido como el valor contenido por unidad de masa, y se cuantificará el aumento porcentual del valor contenido cuando no es considerado el elemento crítico.
- b. **Potencial metalúrgico:** A partir de un catastro de los diversos procesos metalúrgicos que ocurren hoy en día en el territorio nacional y considerando las características propias de cada uno de estos procesos se determinará si alguno de los actuales recursos metalúrgicos (subproductos o descartes) poseen un cierto potencial como fuente de ECE. Aquellos casos donde exista evidencia empírica de que así sea se procederá a cuantificar el nivel de producción de este recurso (ya sea como una tasa anual o un acumulado de la producción de los últimos años) y luego se determinará el valor contenido asociado a la presencia de estos elementos.

Análisis de mercado(s): Para esta última sección del trabajo los alcances serán determinar la estructura del mercado para aquellos elementos que posean un potencial en Chile y que a nivel mundial se consideren como Elementos Críticos Energéticos. Esta estructura consiste en determinar oferta, demanda y sus respectivos factores determinantes, además se realizará una medición del nivel de concentración y se identificarán sus respectivas aplicaciones. Junto con lo anterior se incorporará un análisis de atractividad del mercado y un posterior análisis de competitividad desde un punto de vista privado. En el análisis de atractividad se realizarán estimaciones de la demanda futura como parte de la medición del potencial del mercado. Por último de existir una relación entre la industria chilena y el mercado en cuestión entonces se buscará comprender la historia de esta relación y se incorporará esta relación en el análisis de competitividad para identificar como Chile puede hacer mejoras a esta relación.

Definido entonces el problema a estudiar, la hipótesis planteada, la justificación, y los objetivos junto con su metodología de trabajo se procede entonces a desarrollar la investigación.

## **Capítulo 2 Análisis mundial del concepto Elementos Críticos Energéticos**

### **2.1 Generalidades**

Los Elementos Críticos Energéticos (ECE) se definen como aquellos elementos que son de carácter relevante para el desarrollo de las nuevas tecnologías energéticas. En otras palabras, abarca a todos aquellos elementos que poseen características físico-químicas que los hacen interesantes en las aplicaciones de diversos tópicos energéticos. Estos tópicos pueden ser desde la generación eléctrica -como el caso de Teluro para la manufactura de celdas solares de CdTe- hasta la aplicación de materiales más livianos para reducir el consumo energético, ejemplo de esto es el Escandio que junto con aleaciones de Aluminio, hacen un material de mayor resistencia y soldable reduciendo su peso y el de sus uniones por lo tanto se reduce también el consumo energético para transportarlo.

Bajo el supuesto, en estos momentos casi evidente, de que la energía es y será la problemática más recurrente en el futuro desde variados puntos de vista (ingenieril, social, económico, y medioambiental) entonces estos elementos energéticos, que hacen un uso más eficiente de la energía, jugarán un rol fundamental en las soluciones que se irán dando a cada uno de estos problemas.

Actualmente varios países como Estados Unidos y los de la Comunidad Europea se han percatado de la relevancia de estos elementos y por lo tanto diversas instituciones han estado definiendo lo que ellos interpretan como Elementos Críticos Energéticos. De esta forma el objetivo general de esta etapa es identificar aquellas definiciones de los países más relevantes del sector energético y luego poder contrastar entre sí las metodologías utilizadas, supuestos considerados y resultados obtenidos.

### **2.2 ECE en General**

De acuerdo a la “American Physical Society” y la “Material Research Society”, los ECE corresponden a “aquellos elementos que actualmente aparentan ser críticos para una o más tecnologías relacionadas con la energía. Una escasez de estos elementos inhibiría significativamente el desarrollo a gran escala de esta tecnología la cual podría ser capaz de transformar la manera en que se produce, transmite y/o se almacena energía” (Jaffe, y otros, 2011).



En la definición anteriormente citada es importante desglosar un concepto. Tácitamente queda definido que la escasez crítica está dada por un eventual desabastecimiento, éste a su vez podría darse no sólo por una escasez global (a nivel mundial) de algún elemento en cuestión, sino también por las conocidas fallas del mercado, por concentración geográfica de estos elementos o incluso por hacer uso de una situación monopólica como China lo ha estado haciendo en sus exportaciones de Tierras Raras.

Este punto sugiere un análisis un poco más profundo. Cuando se está tratando de cuantificar la disponibilidad de algún elemento existen varios niveles de comprensión del problema: disponibilidad geológica entendida como la presencia en la corteza, anomalías de concentración y otros (recursos), un segundo nivel incorpora un matiz económico donde el proceso minero-metalúrgico necesario para llevar a cabo la producción produzca beneficio, de no ser así no se explotará el yacimiento (reservas) y un tercer y más complicado nivel considera - además de las variables técnico-económicas- que la disponibilidad de estos elementos se encuentre en países políticamente estables, que no se haga uso de situaciones monopólicas, que la explotación de estos sea ambientalmente sustentable y así un gran número de variables se pueden incorporar en la lista. Destacar que para que un proyecto se ejecute debe cumplir los tres niveles de análisis, de nada sirve que el elemento sea abundante en la corteza terrestre si su extracción no es económicamente rentable. Y esta última no será posible de llevar a cabo si situaciones políticas, geográficas y/o medioambientales no se encuentran resueltas.

Todo esto conlleva, como se verá más adelante también, a que la definición de ECE sea dependiente de cada país, incluso en algunos casos dentro de cada nación existen definiciones diferentes de acuerdo a los puntos de vista utilizados. Aunque más adelante se explicará en detalle los criterios utilizados en otros países para definir los ECE, se procede a enumerar tres definiciones diferentes con el objetivo de comenzar a familiarizarse con estos elementos.

### **2.2.1 Definiciones**

La “American Physical Society” (APS) junto con la “Material Research Society” (MRS) definió que los ECE corresponden a los siguientes veintinueve elementos (Jaffe, y otros, 2011)

Tierras raras (REE): incluye el grupo de los lantánidos (excepto Prometio (Pm), Holmio (Ho), Erblio (Er) y Tulio (Tm)), el Ytrio (Y) y el Escandio (Sc).

Platinoides: Rutenio (Ru), Rodio (Rh), Paladio (Pd), Osmio (Os), Iridio (Ir) y Platino (Pt).

Fotovoltaicos: incluye Galio (Ga), Germanio (Ge), Selenio (Se), Indio (In) y Telurio (Te).

Otros: incluye Helio (He), Litio (Li), Cobalto (Co), Plata (Ag) y Renio (Re).

El departamento de Energía de Estados Unidos (DoE) define un total de dieciséis materiales críticos similares a los definidos por la APS excepto que:

Agrega a la lista Manganese (Mn) y Níquel (Ni) y descarta como críticos a Helio (He), Escandio (Sc), todo el grupo de platinoides, Gadolinio (Gd), Germanio (Ge), Selenio (Se), Iterbio (Yb), Lutecio (Lu), Plata (Ag) y Renio (Re). (DoE, 2011)

El instituto de Energía y Transporte del Centro de Investigación Conjunta de la Comunidad Europea (JRC-IET) determinó que los elementos críticos energéticos son un total de catorce (14) que corresponden a:

Los ya nombrados Disproscio (Dy), Neodimio (Nd), Galio (Ga), Indio (In), Níquel (Ni), Selenio (Se), Telurio (Te), Plata (Ag), y agrega además Cadmio (Cd), Hafnio (Hf), Molibdeno (Mo), Niobio (Nb), Estaño (Sn) y Vanadio (V). (Moss, Tzimas, Kara, Willis, & Kooroshy, 2011)

Queda en evidencia entonces que la definición de ECE depende de cada país e incluso del punto de vista que se busca resguardar.

Continuando en la línea de una comprensión general de estos elementos, existen ciertos patrones comunes entre estas definiciones y también entre estos elementos. A grueso modo se puede identificar que existe un subgrupo de Tierras Raras (TTRR) (que varía en cada definición, pero siempre hay por lo menos dos o tres elementos presente), el subgrupo fotovoltaico (definido por la APS & MRS y que sin embargo también está presente en la definición del DoE y del JRC-IET) y por último existen elementos individuales, que no se pueden asociar a otros.

### **2.2.2 Geología, minería y metalurgia**

En términos geológicos o metalúrgicos es prácticamente imposible buscar un patrón común que describa a todos estos elementos. Sí se puede destacar que las Tierras Raras en general se encuentran asociadas entre sí y su proceso metalúrgico es similar. Si incluso se hace la distinción entre tierras pesadas (Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu e Y) y livianas (La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu y Gd) (Gupta & Krishnamurthy, 2004), estas últimas son más frecuentes con respecto a las primeras y la asociación geo-metalúrgica se hace aún más fuerte.

Respecto a la minería de ECE sí existe un patrón común: en general casi todos son producidos como trazas o subproductos (de la minería del Cobre, Hierro, Níquel y Zinc principalmente), o en el mejor de los casos como co-producto), pero prácticamente no existe una faena minera que se dedique de manera principal a uno de estos elementos por separado. Esto obviamente tiene importantes y relevantes consecuencias en el mercado de estos elementos ya que estos mercados estarán siempre supeditados al comportamiento de otros (el del producto principal generalmente).

Destacar que en el párrafo anterior existe una generalidad con el objetivo de tener una idea de estos elementos, pero es conocimiento del autor que estas generalidades pasan a llevar excepciones. Ejemplo de esto es la mina de Molibdeno como producto principal que existe en Estados Unidos (Mina Henderson).

### **2.2.3 Mercado**

Todos estos elementos (TTRR, fotovoltaicos y “otros”) poseen similitudes de mercado en el sentido de que en todos los casos son de pequeños volúmenes (caso extremo es el óxido de Escandio que anualmente se transan alrededor de 7 toneladas por año, compuesto que es suministrado por actuales stocks en Rusia generados hace más de 30 años). Por su parte, el mercado de mayor volumen (después de la Plata) es el del Litio, con un total de 180.000 toneladas de carbonato de Litio equivalente transadas durante el año 2011. Si bien este valor es varias veces superior al del Escandio, sigue siendo pequeño si se compara con los 16 millones de toneladas de Cobre que se transan al año.

Por último en términos de la madurez de estos mercados se tiene que, como será mostrado más adelante, todos estos elementos poseen diversas aplicaciones pero las principales pueden considerar recientes. Hasta los comienzos de los años 1980 las Tierras Raras, el Escandio y otros diversos elementos del grupo eran productos de laboratorio únicamente, casi ninguno de estos poseía aplicaciones industriales de carácter masivo (Jaffe, y otros, 2011). En la actualidad y forzado básicamente por la importancia que ha tomado la energía a nivel mundial, la oferta o disponibilidad de estos elementos se hace un factor crítico al momento de evaluar el potencial que una nueva tecnología energéticamente eficiente pueda tener.

Teniendo ya una idea más clara de qué se entiende por elementos críticos energéticos, que esta definición posee una variable geográfica y que si bien poseen geologías totalmente diferente entre sí, existen patrones mineros y económicos que los hacen “similares” al momento de buscar analizar estos mercados, se procede entonces a realizar un análisis más detallado de cómo estos países han definido este conjunto.

### 2.3 Elementos críticos por país

Como fue explicado anteriormente, la definición de ECE depende de cada país e incluso en casos como Estados Unidos depende de cada institución gubernamental y a su vez de los intereses que estas instituciones buscan resguardar. En este capítulo se llevará a cabo una comprensión profunda de las diferentes definiciones de ECE existentes a nivel mundial, siendo los siguientes tres casos a analizar: Estados Unidos incluyendo dos definiciones, la del Departamento de Energía (DoE) y la generada por la alianza entre la “American Physical Society” (APS) y la “Material Research Society” (MRS), y por último la definición adoptada por la comunidad europea bajo la dirección del “Institute of Energy and Transport” del Centro de Investigación Conjunta de la comunidad europea (JRC-IET).

Para determinar la elección de estos casos se consideró que Estados Unidos es un país interesante por ser la primera economía del mundo, tener un alto interés en el desarrollo de tecnologías relacionadas con la energía y finalmente fueron el primer país en percatarse del crucial rol que juega la disponibilidad de estos elementos al momento de evaluar el potencial de una tecnología en particular. Por su parte la comunidad europea es interesante de incorporar por dos razones principales, al ser casi todos los miembros países desarrollados tienen la capacidad de generar conocimiento y aplicaciones asociada a estos elementos (caso ejemplar es Alemania con el fuerte incentivo al uso de energías renovables no convencionales), mientras que la segunda razón es de carácter comparativa puesto que este tipo de análisis estratégicos son enfocados de manera muy distinta entre Estados Unidos y la CE. De esa forma se vuelve interesante contrastar ambas miradas.

Destacar que los tres candidatos a ser estudiados poseen una similitud y es que hacen pública la información emitida por sus propias instituciones. Claramente sería interesante poder incorporar la visión China en este análisis como el principal productor de estos elementos, sin embargo se hace imposible acceder a un documento oficial donde el gobierno haga público su mirada respecto de cuáles son para ellos los elementos críticos estratégicos. A pesar de esto, se incorporará una interpretación de lo que actualmente está ocurriendo en China en particular con el mercado de Tierras Raras y se incluirá además a Japón en este análisis como caso de estudio, la razón principal de porqué considerar a este país se debe al hecho de que siendo una nación de alto desarrollo tecnológico en diversos aspectos, en particular el energético, prácticamente no posee ninguna fuente de Tierras Raras y otros elementos críticos, lo que se traduce en que Japón es el país más afectado por el actual proceder chino en el mercado monopólico de estos elementos. Prueba de esto es que del total de tierras raras exportadas por China (cuya producción representa el 95% del total mundial), Japón adquiere el 56%.

Por último se incorporará India como un país sub desarrollado pero de gran población y donde existe un amplio desarrollo tecnológico, además que este país si bien aún no emite una versión oficial de sus elementos críticos energéticos actualmente existe un comité que está elaborando la postura país al respecto.

Destacar que en el capítulo de anexos de incluye un análisis en profundidad de cada uno de los criterios utilizados en los diversos países para determinar sus elementos críticos energéticos. Además de los criterios se incorporan los resultados más relevantes en cada país además de un análisis comparativo entre los resultados obtenidos.

## **2.4 Análisis**

Algunos países han definido un listado de Elementos Críticos Energéticos basado en dos variables principales: la necesidad del elemento para el desarrollo de una tecnología energética en particular y el riesgo geopolítico y técnico-económico que posee la oferta del respectivo elemento. Sin embargo existen países como China que si bien no han definido su interpretación de elementos críticos, basado en el rol que ellos poseen en el actual mercado (productor principal en casi todos los elementos y alguna veces monopolístico como es el caso de las Tierras Raras) han creado una estrategia a nivel país con la intención de incentivar la industria local y así avanzar en el desarrollo social del país. De esta forma existen dos tipos de información, una es de carácter precisa donde Estados Unidos y la Comunidad Europea han definido lo que como Estado consideran Elementos Críticos Energéticos (APS & MRS, DoE y JRC-IET), mientras que la segunda posee un matiz interpretativo, el cual si bien está basado en información cuantitativa, se hace necesario una serie de suposiciones para poder analizarlo, este es el caso de la estrategia de China con las Tierra Raras y de su peculiar relación con Japón respecto de estos elementos.

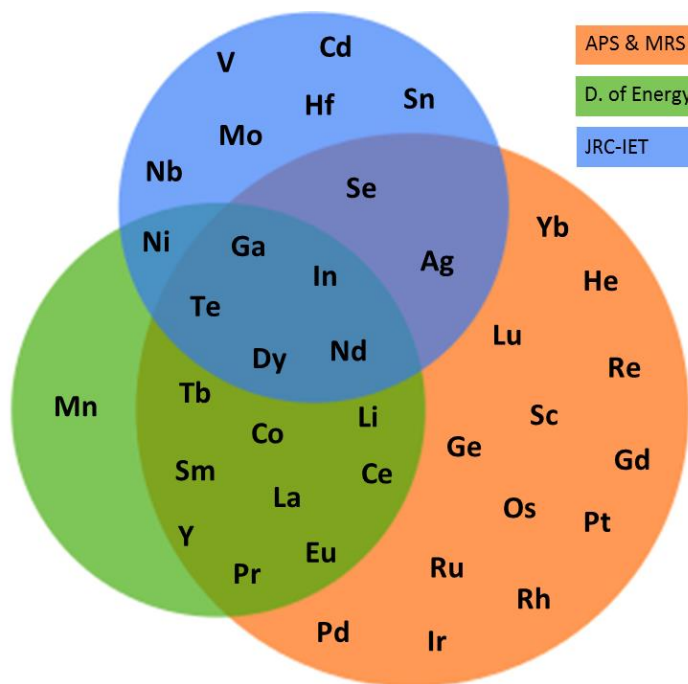
### **2.4.1 Análisis ECE**

Habiendo considerado las tres definiciones de Elementos Críticos Energéticos propuestas por la American Physics Society junto con la Material Research Center (APS & MRS), la del Departamento de Energía de Estados Unidos (DoE) y la del Centro de Investigación Conjunta del Instituto de Energía y Transporte de la Comunidad Europea (JRC-IET) se tiene que todas ellas buscan determinar aquellos elementos cuya disponibilidad es crítica para el desarrollo de tecnologías energéticas, donde el adjetivo “crítico” supone peligro dado el riesgo geopolítico característico de la oferta de cada elemento.

Sin embargo existe una gran diferencia entre las propuesta de APS & MRS en comparación con la del DoE o el JRC-IET y también existe una segunda gran diferencia entre el análisis realizado por el DoE y el JRC. La primera diferencia (entre APS & MRS versus las otras dos) es que el trabajo realizado por las sociedades no considera a priori un determinado tipo de tecnología energética, es decir considera todos los elementos químicos que se involucran en cualquier tipo de industria asociada a la generación, transmisión, almacenamiento e incluso tratamiento de la energía. En contraposición lo planteado por el DoE y el JRC-IET consideran algunos casos de tecnologías energéticas, particularmente para el Departamento de Energía es relevante el análisis para el mercado de iluminación de alta eficiencia, turbinas eólicas, paneles solares fotovoltaicos y vehículos eléctricos.

Por su parte el centro de investigación europeo consideró en su análisis energía nuclear de fisión, energía solar (fotovoltaica y térmica), turbinas eólicas, bioenergía, captura y almacenamiento de carbono (CCS) y por último transmisión eléctrica. Esta distinción conlleva consideraciones distintas y por ende resultados diferentes.

En la siguiente ilustración queda gráficamente representado las propuestas por cada una de las instituciones (el tamaño de cada circunferencia es representativo de la cantidad de elementos por institución y no guarda relación con una importancia relativa entre propuestas).



**Diagrama 2.4.1-1 Elementos Críticos por Institución**

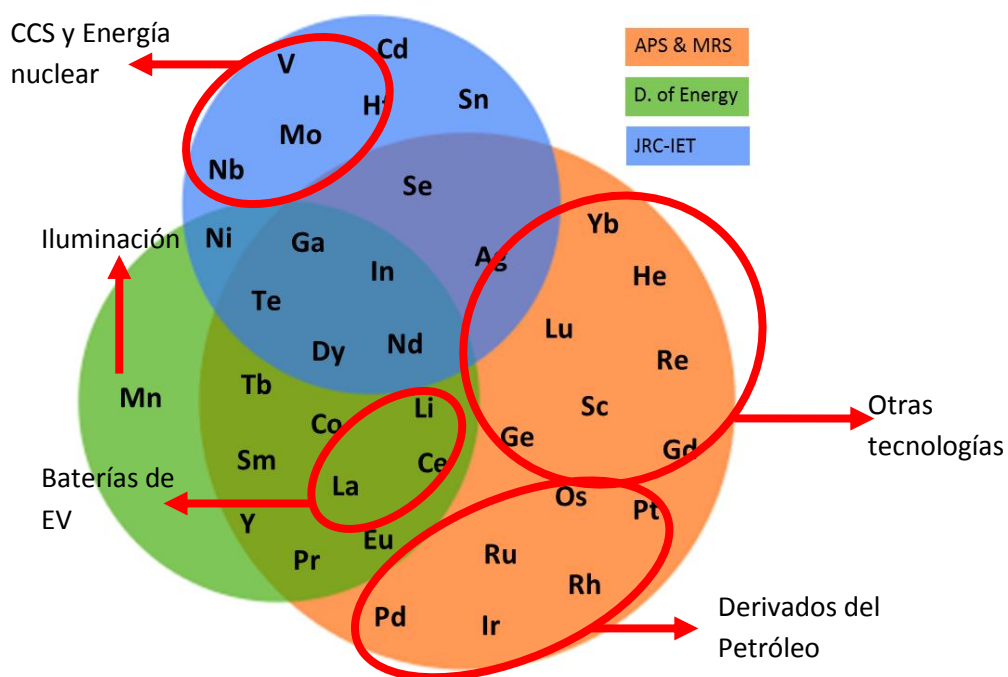
Elaboración propia. Fuente: APS & MRS, DoE, JRC-IET

De la ilustración anterior resaltan ciertas particularidades como por ejemplo la cantidad de elementos que sólo son considerados por la APS & MRS, con un total de trece. Aunque en menor cantidad también destacan los seis elementos que sólo son considerados por el JRC que de un total de 14 elementos evaluados por la institución significan más de un 45%. Luego si se incorpora en esta ilustración el hecho de que la APS y MRS consideraron la industria de derivados del petróleo entonces se explica la presencia del grupo de los platinoides (Pd, Ir, Os, Rh, Pt, Pt).

Lo mismo ocurre con el Helio cuya presencia se debe únicamente a la eventual escasez para procesos criogénicos y de investigación, el caso del Renio es similar puesto que su relevancia en la industria energética radica en la eficiencia de consumo de ciertos equipos cuando éste elemento es incorporado.

A su vez el Escandio es considerado sólo por la APS & MRS por sus aleaciones con Aluminio y por una eventual aplicación en celdas de combustible (SOFC), tecnología que no fue incorporada por el resto de las instituciones.

Si se interpreta ahora aquellos elementos escogidos sólo por la JRC-IET se tiene que al considerar los CCS y la energía nuclear de fusión (tecnologías no consideradas por el DoE) entonces ocurren como relevantes el Hf, Mo, Nb, Sn y V. Por su parte el Manganeso (considerado sólo por el DoE) se explica por sus aplicaciones en la industria de iluminación, que no fue tomada en cuenta por el JRC.



**Diagrama 2.4.1-2 Análisis de ECE elegidos**

Elaboración propia. Fuente: APS & MRS, DoE, JRC-IET.

Existen además casos particulares como por ejemplo Plata y Selenio, ambos elementos fueron considerados por el JRC y la APS & MRS, sin embargo el DoE no los considera, esto probablemente se debe a que posee un mercado bien desarrollado (para el caso de la Plata) y la baja importancia en aplicaciones de tecnología fotovoltaica que poseen ambos elementos.

Similar caso es el del Níquel y Estaño que de acuerdo a la APS & MRS poseen un mercado desarrollado y por ende no es crítico. Esta misma sociedad postula que el Cadmio, al ser tóxico, debe ser obligatoriamente extraído en las operaciones de Zinc por lo que su disponibilidad no debiese estar en riesgo.

Luego la presencia de Litio, Cerio y Lantano en los trabajos del DoE y la APS & MRS (y no en el trabajo del JRC) se debe a que estos elementos son necesarios para el almacenamiento de energía en baterías, en particular para el caso de vehículos eléctricos y esta tecnología no fue considerada por el JRC.

Hasta el momento se explican las diferencias por el tipo de tecnologías consideradas o por una estructura de mercado dada, sin embargo aún queda por comprender aquellos elementos que son considerados por dos instituciones pero no por la tercera. La respuesta radica en la segunda gran diferencia entre lo postulado por el DoE y JRC-IET. Ocurre que además de elegir distintas tecnologías energéticas entre ambas instituciones, cada una determinó de manera distinta cómo evaluar la importancia de cada elemento en una tecnología respectiva. Por ende para un mismo tipo de industria, digamos por ejemplo las celdas fotovoltaicas, el DoE no consideró el Cadmio como elemento crítico mientras que el JRC sí lo hizo. Esto se debe a que el DoE determinaba el nivel crítico de un elemento de acuerdo a un balance entre la oferta y demanda futura en función de lo esperado por la Agencia Internacional de Energía (demanda) y los futuros proyectos que entrarán en operación (oferta), todo esto agregando además las tendencias de crecimiento propias de cada mercado. Por su parte el JRC determinó el nivel de significancia de un elemento si la demanda esperada en un horizonte de 15 y 30 años (en función de las proyecciones de la Agencia Internacional de Energía) superaba el 1% de la producción obtenida del elemento durante el año 2010. Las diferencias metodológicas entre ambas instituciones llevan a diversos resultados. De esta forma elementos como Ytrio, Terbio, Cobalto, Praseodimio y Europio fueron considerados por el DoE y la JRC, sin embargo, dada la metodología utilizada por la institución europea, estos no aparecen dentro de la categoría de críticos.

El mismo argumento pero en contra sentido es para el caso del Estaño y Cadmio, de acuerdo al DoE estos elementos no se verán afectados en términos de su equilibrio de oferta y demanda futura pero, basados en la metodología de la JRC, si poseen un carácter crítico.

Finalmente se vuelve interesante evaluar el caso de aquellos elementos que están presente en los tres artículos en cuestión, estos son: Te, Ga, In, Dy, Nd. Para esto se incorporarán los resultados que obtuvieron la JRC y el DoE al momento de cuantificar el riesgo geopolítico. Para ambas instituciones el riesgo era, a grandes rasgos, función del nivel de concentración geográfica de la oferta, el tipo de producto que representa el elemento (principal, co-producto o subproducto) y el nivel de estabilidad política de los principales países productores. En este sentido la metodología empleada por ambos es bastante similar y aunque la medición numérica del riesgo es distinta se tiene que al tomar valores relativos (un elemento es más riesgoso que otro) no debiese generarse grandes diferencias.

De acuerdo a lo expuesto en los capítulos anteriores estos cinco elementos corresponden justamente a los de mayor riesgo geopolítico para la comunidad europea, destacar que ningún otro elemento posee este nivel de riesgo de acuerdo al análisis.



**Tabla 2.4.1-1 Factores de riesgo por elemento según JRC**

Metal	Factores técnicos		Factores geopolíticos		Riesgo global
	Tendencia aumento acelerado demanda	Limitante para expansión de capacidad C/L plazo	Concentración de la Demanda	Riesgo político	
<b>Disproσιο</b>	<b>Alto</b>	<b>Alto</b>	<b>Alto</b>	<b>Alto</b>	<b>Alto</b>
<b>Neodimio</b>	<b>Alto</b>	<b>Medio</b>	<b>Alto</b>	<b>Alto</b>	
<b>Telurio</b>	<b>Alto</b>	<b>Alto</b>	<b>Bajo</b>	<b>Medio</b>	
<b>Galio</b>	<b>Alto</b>	<b>Medio</b>	<b>Medio</b>	<b>Medio</b>	
<b>Indio</b>	<b>Medio</b>	<b>Alto</b>	<b>Medio</b>	<b>Medio</b>	
<b>Niobio</b>	<b>Alto</b>	<b>Bajo</b>	<b>Alto</b>	<b>Medio</b>	<b>Medio</b>
<b>Vanadio</b>	<b>Alto</b>	<b>Bajo</b>	<b>Medio</b>	<b>Alto</b>	
<b>Estaño</b>	<b>Bajo</b>	<b>Medio</b>	<b>Medio</b>	<b>Alto</b>	
<b>Selenio</b>	<b>Medio</b>	<b>Medio</b>	<b>Medio</b>	<b>Bajo</b>	
<b>Plata</b>	<b>Bajo</b>	<b>Medio</b>	<b>Bajo</b>	<b>Alto</b>	<b>Bajo</b>
<b>Molibdeno</b>	<b>Medio</b>	<b>Bajo</b>	<b>Medio</b>	<b>Medio</b>	
<b>Hafnio</b>	<b>Bajo</b>	<b>Medio</b>	<b>Medio</b>	<b>Bajo</b>	
<b>Níquel</b>	<b>Medio</b>	<b>Bajo</b>	<b>Bajo</b>	<b>Medio</b>	
<b>Cadmio</b>	<b>Bajo</b>	<b>Bajo</b>	<b>Bajo</b>	<b>Medio</b>	

Elaboración propia. Fuente: JRC-IET

Al analizar los resultados de riesgo planteados por el DoE se tiene en el corto plazo (5 años) el Disproσιο y Neodimio son considerados críticos tanto por sus respectivas relevancias en el desarrollo de las tecnologías y por el riesgo que existe en su disponibilidad, por su parte el Telurio e Indio se definen cuasi-críticos donde la variable predominante es la importancia en el desarrollo de la tecnología en el caso del Telurio y mientras que para el Indio lo relevante es el riesgo que posee su oferta.

Sólo el Galio no posee un nivel crítico ni por relevancia en la tecnología y tampoco por una oferta en riesgo.

↑ Importancia en energía limpia	4 Alta			Ytrio	Disproσιο Europio Terbio
	3		Cerio Lantano Telurio	Neodimio	
	2	Níquel Litio	Cobalto Galio Manganeso Praseodimio	Indio	
	1 Baja		Samario		
		1 Bajo	2	3	4 Alto
→ Riesgo →					

Crítico  
Cuasi crítico  
No crítico

**Ilustración 2.4.1-1 Riesgo e Importancia ECE según DoE a corto plazo**

Elaboración propia. Fuente: DoE.

↑ Importancia en energía limpia	4 Alta			Neodimio	Disproσιο
	3		Litio Telurio	Europio Ytrio	Terbio
	2	Níquel	Cobalto Indio Galio Lantano Cerio Manganeso Praseodimio		
	1 Baja		Samario		
		1 Bajo	2	3	4 Alto
→ Riesgo →					

Crítico  
Cuasi crítico  
No crítico

**Ilustración 2.4.1-2 Riesgo e Importancia ECE según DoE a mediano plazo**

Elaboración propia. Fuente: DoE

Luego, en el mediano plazo (15 años), se mantiene el nivel crítico de Neodimio y Disproso en ambas dimensiones: relevancia en tecnología y riesgo de la oferta, destacar que el primero de estos elementos aumentará su relevancia en el largo plazo, por lo tanto su nivel crítico aumenta en el tiempo. Telurio mantiene constante sus respectivos valores mientras que el Indio se espera que deje su estado crítico dado que su oferta en el largo plazo debiese bajar su nivel de riesgo.

Finalmente, y a modo de acoplar los resultados obtenidos por las metodologías propuestas por el DoE y el JRC-IET, se tiene que en términos del riesgo de su oferta Neodimio y Disproso son los elementos más críticos, esto dado básicamente a que China es el único productor de ambos elementos. A su vez, el Telurio, si bien posee una oferta menos concentrada (según ambas metodologías) se tiene que su relevancia en el desarrollo tecnológico de paneles fotovoltaicos es sumamente crítica, según el JRC-IET es el más crítico de todos los elementos (de acuerdo al nivel de significancia estimado por ellos) mientras que el DoE identifica su relevancia en el mediano y largo plazo pero la sitúa en un nivel intermedio-alto (puesto 3 de 4).

#### **2.4.2 Análisis otros Países**

Dado los resultados obtenidos y analizados anteriormente se tiene que las estrategias tomadas por países como China, India y Japón respaldan aún más el nivel crítico de algunos de estos elementos, en particular de las Tierras Raras. Es claro que del análisis propuesto por el DoE y el JRC se concluye que un factor relevante en estos elementos es el rol preponderante que tiene China como productor principal de REE en el mundo. Por su parte China ha utilizado esa ubicación estratégica para incentivar la industrialización de estos mercados dentro de China, en otras palabras ha controlado mediante impuestos, cuotas e incluso ceses temporales de exportación de materias primas de Tierras Raras, que sea en su territorio donde se le agregue valor a la cadena productiva de estas tecnologías. De esta forma se está evitando que su país se convierta únicamente en un productor de materias primas para estas tecnologías y llevar a China a ser un referente mundial de estos mercados, desde la producción en la mina, la metalurgia y hasta la generación de nuevas aplicaciones.

Esta estrategia china ha llevado a que ciertos países sufran de una oferta inestable cuantitativa y cualitativamente y quién más ha tenido que saber lidiar con esto es Japón. Este caso posee una doble problemática puesto que Japón no es sólo el país que más Tierras Raras importa desde China (más del 50% de las exportaciones de China) sino que también ha sufrido problemas geopolíticos con China al respecto. Dado la total dependencia de los nipones al suministro chino, estos últimos han utilizado el abastecimiento de Tierras Raras como instrumento de negociación para los conflictos que China y Japón tienen respecto de la soberanía de las islas Senkaku (en japonés) o Diaoyu (en chino). De esta forma Japón no sólo ha sufrido una estrechez de oferta en las industrias de aplicaciones de REE sino que además ha visto en peligro su soberanía por esta temática.

Luego se hace evidente la necesidad japonesa de diversificar sus fuentes de Tierras Raras y dado que el país prácticamente no posee recursos de este tipo se ha visto obligado a salir a negociar con otros países una oferta estable y exenta de amenazas soberanas (proceso que lleva realizando desde el año 2010). En este sentido es que India juega un papel relevante pues suponiendo un potencial geológico de estos elementos, el país cuenta con una política estable, no contiene problemas territoriales con Japón y además India es, probablemente, uno de los países asiáticos donde China tiene menos influencia política. Estos lazos que Japón ha ido creando con India también los ha tendido con otros países como Kazajistán y se concretizan en un apoyo financiero y tecnológico en el desarrollo de proyectos de Tierras Raras. Cabe preguntarse entonces ¿Qué otro país puede estar en la lista de países estables políticamente con potencial productivo de Tierras Raras? O tal vez en términos más generales ¿Qué países, con estabilidad política reconocida a nivel mundial, puede ser potencial oferentes de elementos críticos energéticos?

## **2.5 Conclusiones del concepto mundial de ECE**

A partir del análisis anteriormente realizado y de los resultados obtenidos por las diversas evaluaciones se tiene que a nivel mundial sí existe una gran preocupación respecto del suministro de elementos relacionados con tecnologías energéticas. Esta preocupación se está traduciendo en distintas medidas de protección como son la diversificación de la oferta, aumentar la tasa de reciclaje de estos materiales, incentivar las industrias locales relacionadas con estos elementos e incluso investigaciones en nuevas tecnologías que no contengan estos elementos. Estas medidas sólo confirman que los países desarrollados están dispuestos a destinar fondos para mejorar la situación de sus países y por ende se puede definir de manera categórica que existe una necesidad global de mejorar el mercado de estos elementos.

Si por otro lado se considera que Chile, como país minero, posee una industria madura, con estabilidad económica y política reconocida a nivel internacional corresponde preguntarse si el país puede tomar un rol en la resolución de esta necesidad. En los análisis considerados previamente las variables de riesgo eran la concentración de la oferta, la estabilidad política de los países productores y el tipo de producto que representa el elemento (principal, co-producto o subproducto). Si Chile llegase a poseer yacimientos de los elementos críticos que hoy no produce, su eventual participación en el mercado resuelve dos variables de riesgo: diversifica la oferta (pues Chile hoy en día no produce estos elementos) y además disminuye el riesgo global de los países productores dado el nivel de riesgo que posee el país. Respecto a qué tipo de producto es cada elemento, eso dependerá únicamente de los yacimientos que eventualmente se puedan encontrar en Chile.

Tomando en cuenta entonces los resultados de cada uno de los estudios, los distintos niveles de riesgo para cada uno de estos elementos se opta por definir que los Elementos Críticos Energéticos desde la perspectiva chilena serán aquellos que fueron seleccionados por la Comunidad Europea como de alto riesgo: Nd, Dy, Ga, In y Te y aquellos que según el DoE de Estados Unidos serán críticos en el mediano y largo plazo: Nd, Dy, Tb, Eu e Y. Esto arroja como listado final ocho elementos que corresponden a: Neodimio, Disproseo, Europio, Galio, Indio, Itrio, Telurio, Terbio.

De esta forma se vuelve interesante preguntar, de los ocho elementos considerado Críticos Energéticos desde una perspectiva chilena: ¿Cuáles poseen producción en Chile? De aquellos que no existe producción local ¿Posee Chile un potencial geológico interesante de estos elementos? ¿Existe suficiente información geológica del territorio nacional para dar respuesta a la pregunta anterior? De tener Chile un potencial, respaldado con mediciones reales ¿Cuál es la atractividad y competitividad de cada uno de estos mercados? ¿Cómo Chile puede ser parte de estos? ¿Cuál sería nuestra ventaja competitiva?

Todas las preguntas planteadas fuerzan a continuar la investigación considerando un modelo geológico y metalúrgico de Chile y posteriormente realizar un análisis de atractivo y competencia de cada mercado.

## Capítulo 3 Recursos geológicos

### 3.1 Generalidades

Una vez identificado aquellos elementos que a nivel global son considerados estratégicos para el desarrollo de ciertas tecnologías energéticas procede identificar si Chile puede tener un papel relevante en el mercado de alguno de estos elementos. Para poder responder a esta interrogante se debe, primeramente, definir en cual o cuales de estos ocho elementos Chile posee una potencial capacidad de participación del mercado oferente. En este sentido, y basado en el trabajo realizado, se tiene que este potencial puede caracterizarse por dos tipos de recursos, los que a su vez se caracterizan por el origen de la información que los respalda: geológicos o metalúrgicos. La información geológica se entiende como aquellos yacimientos que están presentes en Chile y cuyos modelos teóricos de enriquecimiento consideran que existe un potencial económico en la recuperación de los elementos críticos en cuestión. Será en este capítulo donde se analizaran estos recursos, mientras que los recursos metalúrgicos se analizaran en el próximo capítulo

Para identificar si Chile posee potenciales recursos geológicos de los elementos críticos energéticos identificados previamente se debe comprender la actualidad geológica de Chile, en particular la geología de explotación o económica. Para lograr esto se considerará un modelo geológico de Chile que incorpore los tipos de yacimientos más relevantes en la industria minera (IOCG, Hierro Apatito y pórfidos cupríferos) y luego, a partir de los modelos teóricos de enriquecimiento de cada tipo de yacimiento, se identificarán aquellos depósitos donde podría existir un potencial económico de alguno de los elementos en cuestión.

Obtenidos los resultados teóricos del ejercicio anterior es necesario determinar cuáles son las reales leyes de estos elementos en los tipos de yacimientos identificados, para esto se consideraran mediciones realizadas por algunas investigaciones y publicaciones en diversos yacimientos, por lo que sí bien se intentará ser lo más global posible, será necesario tomar ejemplos puntuales que puedan ser representativos de cada yacimiento. Estos casos evidentemente corresponderán a aquellos yacimientos donde exista la información necesaria. Así se podrá contrastar el modelo teórico con mediciones reales y además se logrará cuantificar el valor contenido en los yacimientos donde exista tal información.

Es importante destacar que los alcances del trabajo no consideran una evaluación económica de algún yacimiento o relave en particular, sin embargo y sólo con el objetivo de cuantificar el potencial de los diferentes tipos de recursos, se medirá el valor contenido por unidad de masa o de volumen en cada caso y también como aumenta el valor contenido del recurso cuando se consideran los Elementos Críticos presentes, con esto se podrá tener una referencia del potencial económico que poseen estos recursos. Para lograr esto es necesario considerar una matriz de precio tanto para los elementos convencionales como para los críticos.

En la siguiente tabla quedan resumidos estos precios, en color rojo los elementos convencionales y en verde los críticos. En la última columna de la tabla se especifica la fuente de la información.

**Tabla 3.1-1 Precio Elementos Convencionales y Críticos**

Elemento	Símbolo	Unidad de Medida	Valor largo plazo	Fuente de Información
Fierro	Fe	US\$/ton @ 65% Fe	100	Labrador mining and power: How much and where from. Nov 2012
Oro	Au	US\$/Oz	1200	TECHNICAL REPORT ON THE PUEBLO VIEJO PROJECT, SANCHEZ RAMIREZ PROVINCE, DOMINICAN REPUBLIC. Marzo 2012
Plata	Ag	US\$/Oz	20	
Cobre	Cu	US\$/lb	3.05	INFORME SOBRE LA ENCUESTA PERIÓDICA DEL MERCADO DEL COBRE I SEMESTRE 2012. Cochilco. Julio 2012
Neodimio	Nd	US\$/KgOx	100	En base a Roskill 2010
Disprosio	Dy	US\$/KgOx	900	En base a Roskill 2010
Europio	Eu	US\$/KgOx	1100	En base a Roskill 2010
Galio	Ga	US\$/Kg	530	Orbite: A strategic Gallium producer. Sept 2012
Indio	In	US\$/Kg	500	Advancing Towards Diversified Metal Production in North America. Enero 2013
Itrio	Y	US\$/KgOx	50	En base a Roskill 2010
Telurio	Te	US\$/Kg	280	Kankberg – a new Boliden gold mine. Febrero 2011
Terbio	Tb	US\$/KgOx	1100	En base a Roskill 2010

Se procede entonces a evaluar un modelo geológico general de la minería económica del país para luego determinar aquellos yacimientos cuyos modelos teóricos de enriquecimiento se asocian a la presencia de los ocho Elementos Críticos elegidos.

## **3.2 Modelo geológico económico de Chile**

De acuerdo a lo propuesto por diversos autores la geología económica de Chile puede separarse en dos grandes grupos: metálica e industrial. En la primera categoría se encuentran Cobre, Oro, Plata y Hierro entre otros, mientras que en la geología industrial se encuentran las sales y nitratos obtenidos en los salares además de los minerales relacionados con la industria de la construcción, los aglomerados para el cemento, Litio, Salitre, Yodo, Yeso, Potasio, Cloruro de sodio y Boro entre otros.

En este trabajo de investigación sólo será considerado la minería metálica principalmente por el hecho de que no existen modelos teóricos de enriquecimiento para los principales yacimientos no metálicos del país (evaporíticos), por lo que queda fuera de los alcances de esta investigación lograr determinar si existe un potencial asociado a estos yacimientos. De todas formas, como se verá más adelante, la minería no metálica está directamente relacionada con la obtención de algunos ECE, en particular con las Tierras Raras pesadas por lo que no es posible descartar estos yacimientos por un bajo potencial geológico o algún criterio similar.

Se procede entonces a identificar los principales yacimientos de minería metálica en Chile y a abordar en profundidad los criterios para no considerar los yacimientos no metálicos.

### **3.2.1 Minería Metálica**

La minería metálica chilena se caracteriza por tres metales principales: Oro, Plata y Cobre, siendo éste último el más importante durante toda la historia minera del país. La producción de Cobre en Chile data desde el siglo VI previo a la era cristiana, a lo que se le agrega además la producción de Oro que también fue posible gracias a los placeres auríferos superficiales que se encontraban en la zona norte del país. De esta forma se puede decir que Chile posee una larga historia de minería metálica. Actualmente la geología metálica chilena está representada (en orden de relevancia económica) por los siguientes tipos de yacimientos: Pórfidos de Cobre Molibdeno (Cu-Mo), Epitermales de Oro y Plata, Óxido de Hierro Cobre y Oro (IOCG por sus siglas en inglés), Óxidos de Hierro-Apatito (Fe-Ap), Estratoligados de Cobre y Plata, mineralizaciones en vetillas, Oro de origen sedimentario y porfídico y finalmente Skarns de Cobre y otros elementos menores (Moreno & Gibbons, 2007).

Si se consideran los modelos teóricos de enriquecimiento para cada tipo de yacimiento se tendrá una simplificación general de los elementos presentes en cada uno de estos tipos y se podrá identificar aquellos que representan un potencial recurso de elementos críticos.



A partir de esto, se profundizará en los modelos teóricos de enriquecimiento y se considerará cuál es la situación actual de éstos en términos de recursos y producción en Chile.

### Pórfidos cupríferos

Este tipo de yacimiento es el de mayor relevancia para Chile. En la actualidad el país representa más de un 30% de la oferta mundial de Cobre (USGS, 2012) y gran parte de esta producción proviene de yacimientos de tipo pórfido cuprífero. Situación similar ocurre con el Molibdeno, cuya producción se obtiene como subproducto de la explotación de Cobre, particularmente la separación entre el Cobre y el Molibdeno ocurre en la flotación de los minerales de sulfuro de Cobre. Chile es el tercer país con mayor producción de Molibdeno en el mundo, siendo superado únicamente por China y Estados Unidos en orden de producción (USGS, 2012).

Si bien no existe evidencia teórica de un enriquecimiento en alguno de los elementos críticos en cuestión (Moreno & Gibbons, 2007), algunos de estos yacimientos poseen -a nivel de trazas- elementos como el Telurio, Selenio y otros del grupo de platinoides. Todos estos se concentran de manera “inevitable” en los barros anódicos producidos en la electro-refinación de Cobre y por ende faenas que producen cátodos de Cobre electrolítico en Chile han logrado participar en estos mercados, ejemplo concreto es Codelco con su Planta de Metales Nobles en Ventana, Quinta región, y también la Planta de Metales Nobles en Mejillones, Segunda Región, que se encuentra en la cartera de proyectos de la empresa (Keller, 2012). Es importante nombrar que si bien corresponden a elementos trazas, el volumen de la producción nacional de Cobre es de tal envergadura que la producción en traza de estos elementos representa una parte importante del mercado global. Sin embargo dado que los barros anódicos corresponden a recursos metalúrgicos, se llevará a cabo un análisis en detalle en la próxima sección de lo que actualmente ocurre en Chile y los potenciales que posee. De esta forma desde el punto de vista geológico los pórfidos cupríferos no son atractivos como fuente de Elementos Críticos.

### IOCG y Fe-Apatito

Para el primer de tipo de yacimiento (IOCG), se tiene que el modelo teórico de enriquecimiento supone anomalías interesantes de Tierras Raras, en particular para el caso de los IOCG chilenos. Por su parte los yacimientos de Fierro Apatito también suponen enriquecimientos en Tierras Raras asociadas mineralógicamente al apatito (Moreno & Gibbons, 2007). En base a esta información preliminar se procede a exponer en detalle las características geológicas propias de cada modelo de enriquecimiento así como los yacimientos chilenos en cada caso.

### 3.2.1.1 Iron oxide copper and gold

De acuerdo a lo propuesto por diversos autores, cuyos modelos han ido variando en el tiempo, (Hitzman, Oreskes, & Einaudi, 1992) y (Williams, y otros, 2005) la mineralización de tipo IOCG posee un enriquecimiento con relevancia económica en Cobre, Hierro y Oro; además de poseer anomalías -a nivel de subproducto-económicamente interesante en Tierras Raras, Uranio y otros.

En Chile, este tipo de yacimiento se encuentra presente a lo largo de la zona de falla de Atacama, la cual se extiende desde la ciudad de Iquique (20°S) hasta las cercanías de la ciudad de La Serena (30°S). Su longitud es de más de 1000 Km orientado de norte a sur y el ancho del sistema se aproxima a los 40 Km (Cembrano, Garrido, & Marquardt, 2009). A este sistema de falla están asociadas dos fajas de IOCG de diferentes periodos geológicos.

La primera corresponde al Cretácico Temprano y se encuentra en la costa chilena, mientras que la segunda faja está datada en el Jurásico Tardío y se encuentre al oeste de la faja anterior. La faja cretácica posee decenas de prospectos de exploración de este tipo de yacimientos y variadas minas pequeñas. Por su parte la segunda faja, también posee diversos prospectos sin embargo destacan dos grandes yacimientos actualmente explotados: Manto Verde y Candelaria-Distrito Punta del Cobre (Sillitoe R. H., 2003). Para ambas fajas se tiene que los yacimientos IOCG identificados corresponden al tipo abundante en Titanio con bajo nivel de oxidación de IOCG enriquecidos en Cu-U-Au-REE (Moreno & Gibbons, 2007).

En la ilustración 3.3.1.1-1 se encuentran representados ambas fajas geológicas con los principales prospectos y yacimientos existentes a la fecha.

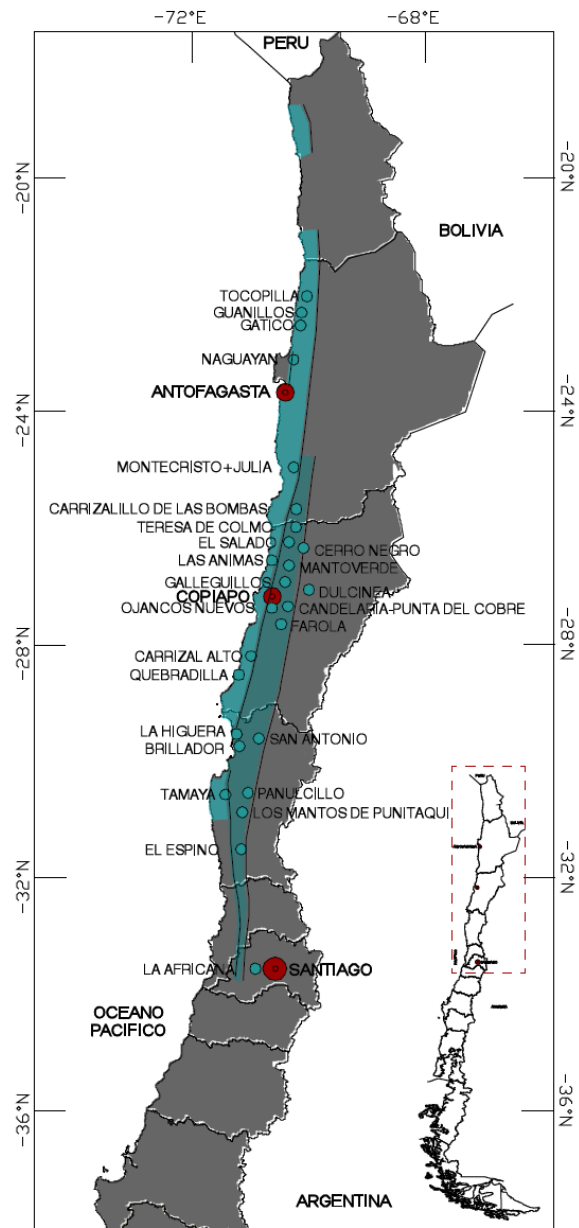


Ilustración 3.2.1.1-1 IOCG en Chile

Elaboración propia. En base a: Sillitoe R.H

Para ambas fajas se tiene que los yacimientos IOCG identificados corresponden al tipo abundante en Titanio con bajo nivel de oxidación de IOCG enriquecidos en Cu-U-Au-REE (Moreno & Gibbons, 2007).

De acuerdo a Sillitoe, estos yacimientos representan una gran evolución geológica sin embargo corresponde a la zona más pobremente estudiada dentro de la geología mundial de este tipos de yacimientos (Sillitoe R. H., 2003), de ahí que se desprende un gran potencial económico donde la necesidad de invertir en investigación y exploración se hace evidente.

Al considerar los yacimientos tomados en cuenta por Sillitoe en su estudio, se tienen tres tipos de minerales, aquellos que sólo poseen Cobre, los que poseen Cobre y Oro y finalmente aquellos que tienen presente Cobre Oro y Plata. Destacar que probablemente todos los yacimientos posean Oro y Plata, sin embargo se publicaron aquellos valores que son económicamente interesantes.

En la siguiente tabla se resume la información publicada en el documento, resaltando las 1,280 Mt con una ley de Cobre equivalente a 0.87% y una ley de Oro de 0.18 [g/t]. Destacar que dado el hecho de que el tonelaje de Plata está contenido en el de Oro, y a su vez el de Oro está contenido en el de Cobre (excepto para el yacimiento Mantos de Punitaqui), se consideraron los tres tipos de tonelajes anteriormente explicados.

**Tabla 3.2.1.1-1 Tonelaje y Leyes de IOCG en Chile**

<b>Nombre</b>	<b>Tonelaje [Mt]</b>	<b>Ley Cu [%]</b>	<b>Au [g/t]</b>	<b>Ag [g/t]</b>
Tocopilla	2.4	3.1		
Montecristo	15	1.6	0.6	
Cerro Negro	249	0.4	0.15	
Teresa de Colmo	70	0.8		
Mantoverde	230 Óxidos	0.55	0.11	
	400 Sulfuros	0.52		
Candelaria	470	0.95	0.22	3.1
Punta del Cobre	120	1.5	0.4	5
Carrizal Alto	3	5		
Panulcillo	3	2.7	0.1	
Tamaya	>2	12		
Los Mantos de Punitaqui	2		4	
El Espino	30	1.2	0.15	
La Africana	3.3	2.5		
Total Mineral Cu	1598	0.78	-	-
Total Mineral Cu-Au	1289	0.88	0.18	-
Total Mineral Cu-Au-Ag	590	1.06	0.26	3.5

Elaboración propia. Fuente: Sillitoe R.H

Finalmente se tiene que en Chile existen yacimientos IOCG, algunos de éstos bajo explotación en grandes volúmenes, otros como pequeñas mineras y una gran cantidad en situación de prospecto.

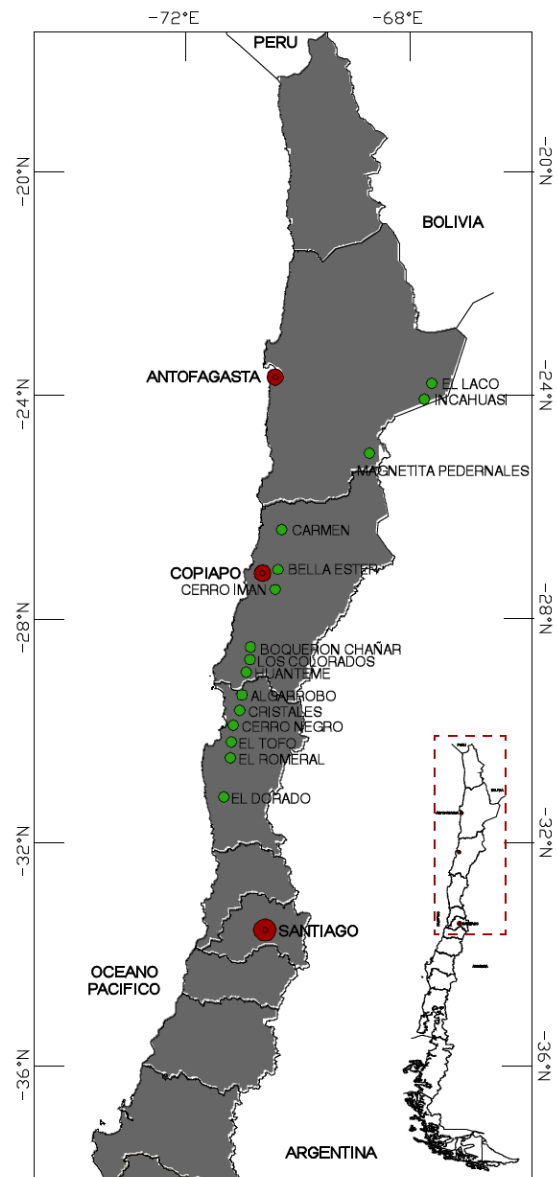
Estos yacimientos responden a un cierto tipo de IOCG donde la presencia de Tierras Raras es esperable y el volumen de mineral actualmente estimado supera las 1500 Mt.

En la próxima sección se tomara el distrito Candelaria-Punta del Cobre con el objetivo de cuantificar el valor contenido en Elementos Críticos Energéticos en este tipo de yacimiento. La razón principal de porque se considerará este distrito como representativo se debe a la existencia de la información necesaria para llevar a cabo el análisis.

### 3.2.1.2 Yacimientos de Hierro Apatito

Este tipo de yacimiento se encuentra presentes en dos fajas geológicas completamente diferentes entre sí. La primera faja está asociada a la Faja Chilena de Hierro (donde también se emplazan los yacimientos IOCG anteriormente estudiados) y se ubica cercana a la Cordillera de la Costa entre los paralelos 25°30'S y los 32°S. Mediciones geocronológicas ubican a esta faja en el Jurásico-Cretácico Temprano. Por su parte, la segunda faja se ubica en la Cordillera de los Andes a una altura promedio de 4900 msnm, está orientada norte-sur entre los paralelos 24°30'S y 26°S y se le asocia a la era Cenozoica (Moreno & Gibbons, 2007).

La faja más al Oeste, posee variados yacimientos y prospectos entre los que destacan tres operaciones actualmente funcionando: Los Colorados, El Algarrobo y el Romeral, todas estas pertenecientes al grupo Compañía Minera del Pacífico. Se estima que la faja completa posee un gran potencial de Hierro con más de 1000 Mt @ 60% de Hierro, sin embargo nuevamente la falta de información conlleva a un bajo nivel de explotación de esta faja (Moreno & Gibbons, 2007). Se le agrega a estos yacimientos el proyecto Imán (distinto al yacimiento denominado Cerro Imán) perteneciente también a la categoría de Fe-Ap y se encuentra ubicado a 170 Km al Sur de la ciudad de Copiapó.



**Ilustración 3.2.1.2-1Fe-Ap de Chile**

Elaboración propia. En base a: Sillitoe R.H

La faja más reciente, ubicada en la Cordillera de los Andes, se caracteriza por tres yacimientos principales: El Laco, Incahuasi y Magnetita de Pedernales, todos cercanos a la frontera de Chile con Argentina (Moreno & Gibbons, 2007). Si bien no existen reportes del volumen de estos tres yacimientos y tampoco de la existencia de nuevas exploraciones llevadas a cabo se tiene que El Laco posee un tonelaje cercano a los 500 Mt @ 98% de Hierro (IAVCI, 2004).

En la ilustración 3.3.1.1-1 quedan esquemáticamente representados los principales yacimientos de ambas fajas. En total se estima que ambos cordones mineralizados superan las 1500 Mt con una ley media de 60% de Hierro.

En la próxima sección se tomará el distrito Sierra Áspera (prospectos Cerro Carmen y Sierra Áspera) y el yacimiento El Laco con el objetivo de cuantificar el valor contenido en Elementos Críticos Energéticos en este tipo de yacimientos. La razón principal de porque se considerará este distrito como representativo se debe a la existencia de una investigación realizada por la Comisión Chilena de Energía Nuclear con el objetivo de definir prospectos de TTRR y Uranio. Por su parte, el yacimiento El Laco es el único de la franja andina que reporta su composición. Además se considerará el yacimiento Imán que posee una anomalía de Escandio cuya ley media alcanza los 40 g/ton. Si bien el Escandio no fue definido dentro del grupo de los ocho elementos este yacimiento se consideró igual por su alta ley de Sc y por la disponibilidad de información que para este tipo de yacimientos es escasa.

De esta forma se tiene que para los yacimientos de tipo Fe-Ap e ICOG los modelos teóricos respectivos plantean un eventual enriquecimiento en algunos ECE, en especial las Tierras Raras livianas. Si a esto se le agrega los grandes volúmenes que ambos tipos de yacimientos tiene en Chile, más de 1,000 Mton para cada uno, se vuelve interesante contrastar este potencial teórico con mediciones reales hechas en los yacimientos ya discutidos en su momento.

#### Otros tipos de yacimiento

Los yacimientos epitermales de Oro y Plata, como su nombre lo indica, son yacimientos donde únicamente se encuentran estos dos elementos en situaciones interesantes de explotación. Se tiene además que las mediciones obtenidas en distintos casos no han acusado leyes interesantes de otros elementos (Moreno & Gibbons, 2007). Situación similar ocurre con los yacimientos de Cobre-Plata, las vetas de Oro y los depósitos sedimentarios, en estos tipos de recursos no se han registrado leyes interesantes de Elementos Críticos y de acuerdo a los minerales presentes no se debiese esperar que si existan (Moreno & Gibbons, 2007).

Finalmente de los yacimientos de minería metálica en Chile sólo los IOCG y Fe-Apatito son interesantes desde el punto de vista geológico como fuente de Elementos Críticos Energéticos.

Destacar que este trabajo se ha sido realizado en base a un análisis preliminar y simplificado de la geología metálica chilena, es evidente que el real potencial geológico de Chile en estos elementos es una situación que ha ido e irá cambiando constantemente en el tiempo conforme nueva información geo-científica se vaya generando.

### **3.2.2 Minería no metálica**

Dado los alcances de esta tesis sólo se consideraron los yacimientos de Minería metálica puesto que en el sector no metálico son otros los factores relevantes al momento de evaluar los yacimientos. Se le agrega a este punto además que la principal industria no metálica corresponde a los salares evaporíticos, particularmente a los de nitratos y Yodo, y ocurre que aún no existe un acuerdo respecto del modelo de enriquecimiento de estos elementos por lo tanto no es posible identificar si existe un potencial teórico de este tipo de recursos por lo que para evaluar este tipo de yacimientos sería necesario determinar la situación para cada caso y ese trabajo se aleja de los alcances definidos. Destacar de todas formas que en base a una conversación privada con personas de Codelco, se tiene que la Compañía realizó mediciones en algunos salares del norte del país con el objetivo de explorar Tierras Raras y otros elementos, al parecer los resultados no fueron satisfactorios y además no se logró tener acceso a éstos.

A pesar de no considerar la minería no metálica en este trabajo existen dos fenómenos que resultan interesantes de nombrar, el primero tiene que ver con el hecho de que a nivel mundial la industria no metálica ha tendido a crecer a mayor tasa (lo que se traduce en un aumento de su relevancia económica) si se compara con la industria metálica (Moreno & Gibbons, 2007). Este fenómeno en Chile no está ocurriendo y por ende es un tema que justifica un nuevo trabajo de investigación. La segunda idea guarda relación con el Litio, este elemento ha cobrado gran relevancia mundial por sus aplicaciones en baterías eléctricas en dispositivos móviles, desde celulares hasta vehículos. La razón principal por la cual se excluyó este elemento del análisis a futuro guarda relación con el hecho de que es un mercado sumamente estudiado y además que, si bien estuvo presente en los diversos informes de Elementos Críticos Energéticos, ninguna institución lo identificó como un insumo crítico en un mediano o largo plazo.

Por último es importante destacar que en ningún caso la minería no metálica queda excluida como fuente de Elementos Críticos Energéticos, incluso la gran fuente de Tierras Raras pesadas (categoría a la que pertenece el Disproseo, Terbio y Europio entre otros) corresponden a yacimientos de arcilla que han sido explotados desde los años 80 hasta la actualidad en el suroeste de China. Estos recursos se caracterizan por bajas leyes pero que son sobrellevadas con un muy bajo costo metalúrgico puesto que los elementos se encuentran adsorbidos a las arcillas y su extracción es de gran facilidad (Polinares, 2012). Sin embargo, dada la ausencia de modelos geológicos que logren explicar los yacimientos no metálicos, queda fuera de los alcances de este trabajo determinar si este tipo de minería posee un potencial.

### 3.3 Cuantificación de recursos de Elementos Críticos Energéticos

De la sección anterior se obtuvo que en términos teóricos los yacimientos de Fierro-Apatito y los IOCG –ambos presentes en Chile- son los que poseen un mayor potencial como recursos de Elementos Críticos Energéticos. De esta forma, a modo de cuantificar este potencial, se determinarán los ECE a considerar y luego se cuantificará económicamente la presencia de éstos en cada tipo de yacimiento. Se buscará determinar el crecimiento porcentual del valor contenido del mineral cuando se considera la presencia de estos nuevos elementos. Para esto se requiere de dos variables claves: las leyes de los elementos convencionales y críticos en cada yacimiento y los precios de cada uno de éstos. Dado que la segunda variable fue determinada con anterioridad sólo resta determinar las leyes en cada yacimiento.

#### 3.3.1 Yacimientos de Óxidos de Fierro, Cobre y Oro (IOCG)

Como fue anteriormente descrito existen varios yacimientos de este tipo en Chile, sin embargo al considerar aquellos donde se han hecho mediciones de leyes de REE y otros elementos menores son sólo algunos los que han hecho pública esta información.

De esta forma se considerará como representativo de estos yacimientos el Distrito Candelaria Punta del Cobre, donde la información necesaria para esta evaluación fue publicada ( MARSCHIK & FONTBOTÉ, 2011).

En la ilustración 3.3.1-1 está representado todo el distrito, con las diversas operaciones que existen en la actualidad. Destaca principalmente Candelaria y las pequeñas minas que la rodean como Carola, Socavón Rampa y Resguardo.

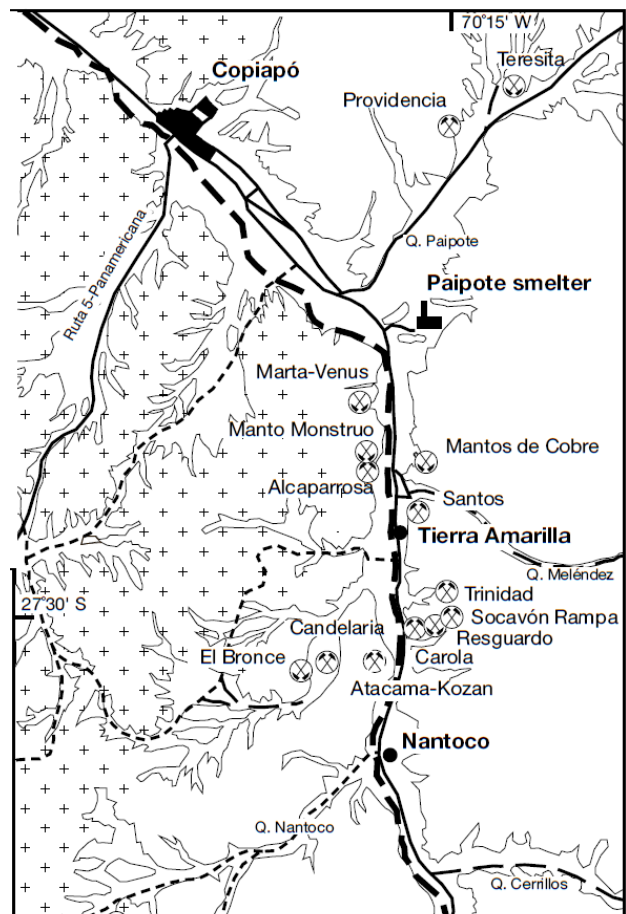


Ilustración 3.3.1-1 Detalle Distrito Punta del Cobre

Fuente: Sillitoe R.H

De acuerdo a los valores publicados por los autores, para un mismo yacimiento las leyes de los elementos convencionales y críticos varían según la zona de alteración en la que se encuentran.

Tomando por ejemplo Candelaria, se tiene que las leyes de Neodimio se triplican al pasar de la zona de alteración Calco potásica a la alteración potásica. Caso contrario ocurre con el Cobre, que su valor se reduce prácticamente en un orden de magnitud.

En la tabla 3.3.1-1 se presentan las leyes de los elementos convencionales (en rojo) y las leyes de los Elementos Críticos Energéticos (en verde) que se encuentran presentes en los yacimientos. Además, en función de los precios previamente discutidos, se cuantificó el valor contenido de las diversas muestras considerando solamente los elementos convencionales, los elementos críticos y la suma de ambos. Finalmente se calculó el aumento porcentual del valor contenido cuando son considerados los ECE.

Destacar que para aquellas muestras donde las leyes representen una cota inferior ( $Tb < 0.5\text{ppm}$  por ejemplo) se consideró que el valor representado por ese elemento es nulo, además de acuerdo a los autores las muestras analizadas correspondían a rocas intactas por lo que no debiese esperarse un sesgo por una eventual meteorización superficial de la muestra. Respecto a una eventual selectividad al momento de elegir las muestras, no pareciese existir y es por esta razón que se publican valores para distintas zonas de alteración de cada yacimiento. Así se evita un sesgo de muestreo.

**Tabla 3.3.1-1 Leyes y valores contenidos yacimientos Distrito Punta del Cobre**

Sample Location Unit Alteration	Medida	Candelaria Trinidad Siltstone Ca-K	Candelaria Algarrobos Member K	Carola Meléndez Dacites K	Carola3 Meléndez Dacites K-Na	Carola4 Meléndez Dacites K	Socavón Rampa Meléndez Dacites Carbonate	Socavón Rampa Meléndez Dacites K	Trinidad Meléndez Dacites K
Fe	%	16.2	22.2	11.2	8.4	14.3	15.6	11.7	13.0
Au	ppm	0.5	0.1	0.2	0.2	0.7	0.5	0.5	0.0
Ag	ppm	10.9	<0.4	1	0.9	2.6	1.9	1.4	<0.4
Cu	ppm	26614	3787	13104	5059	16249	17845	17518	2316
Tb	ppm	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	0.5	<0.5	<0.5	0.7
Y	ppm	20	8	10	12	11	12	7	13
Nd	ppm	13.9	46.8	5	3.8	33.4	6.6	10.1	57.1
Eu	ppm	0.57	1.02	0.35	0.28	0.69	0.56	0.42	1.15
Dy	ppm	2.1	2.8	1.5	1.7	1.8	2	1.4	1.9
Valor Convencional	US\$/ton	231.6	62.9	114.5	54.0	162.1	165.6	157.8	36.2
Valor ECE	US\$/ton	5.8	10.2	3.2	3.3	8.0	4.3	3.6	11.8
Valor Total	US\$/ton	237.4	73.1	117.7	57.3	170.1	169.9	161.4	48.0
Aumento Valor por ECE	%	2.5	16.1	2.8	6.1	4.9	2.6	2.3	32.6

Elaboración propia. Fuente: Marschik y Fontboté



Queda expuesto en la tabla anterior que para algunos yacimientos el aumento en el valor contenido no representa un crecimiento sustancial como son el caso de Candelaria (alteración calco potásica), las dacitas del yacimiento Carola y Socavón Rampa. Sin embargo son interesantes dos situaciones, la primera tiene relación en cómo varía el rol económico de los Elementos Críticos en las diversas zonas de alteración, tomando por ejemplo Candelaria se tiene que el descenso del valor contenido producto de una menor ley de Cobre es equiparado –en una cierta parte- con el aumento de los ECE.

Incluso más, el valor contenido de éstos últimos se duplica al cambiar de una alteración a otra. De esta forma, si se supone que la alteración potásica no posee un suficiente valor contenido al considerar únicamente los elementos convencionales, tal vez esto cambie al incorporar los elementos críticos energéticos del yacimiento. Esto obviamente traería consigo un aumento del volumen de mineral del yacimiento lo que a la vez se traduciría en un aumento del valor de éste.

Respecto del yacimiento Trinidad, se vuelve aún más interesante la incorporación de los ECE puesto que el valor contenido aumenta en más de un 30% de su valor respecto del valor considerando los elementos convencionales.

Destacar además que existe un aporte tácito al momento de incorporar nuevos elementos en el modelo de negocio puesto que de cierta forma se diversifica la rentabilidad del yacimiento, ya que ante la baja de precios del Hierro o del Cobre por ejemplo, la explotación de ECE puede conllevar a que la operación se mantenga rentable.

En términos generales no se identifica un gran aumento de valor contenido al incorporar los ECE, sin embargo la gran variabilidad del valor aportado por estos elementos dentro de un mismo yacimiento revela que tal vez existan zonas de mayor ley de ECE, las que si bien pueden representar un bajo tonelaje del total del yacimiento, aportarían valor al proyecto. Además, en un futuro análisis se deben incorporar los costos reales de la metalurgia de estos elementos, los que algunos serán directos mientras que otros serán compartidos por los elementos a recuperar.

### **3.3.2 Yacimientos de Hierro Apatito**

Para este tipo de enriquecimientos se tiene que Chile posee un volumen superior a las 1500 Mt con una ley de Hierro de 60%. De esta forma será sólo el Hierro el elemento convencional a considerar dentro de la evaluación del valor contenido de estos yacimientos. Nuevamente la cantidad de prospectos y operaciones de este tipo es bastante alta, más de 10, sin embargo la información necesaria para esta evaluación ha sido publicada únicamente para Sierra Áspera (ORREGO ALFARO, 2010), yacimiento Imán (en base a información privada de la empresa Minería Activa spa) y para El Laco (IAVCI, 2004).

En el primero de éstos existen dos localidades que fueron medidas (Cerro Carmen y Sierra Áspera), mientras que para El Laco existen únicamente los valores de TTRR totales contenidos en el yacimiento y la publicación no detalla la distribución de leyes entre los elementos, por lo que el análisis tendrá que realizarse en varios escenarios.

Destacar que como fue expuesto anteriormente los yacimientos de Fe-Ap de Chile están contenidos en dos fajas, la de Zona de Falla de Atacama y la ubicada en las alturas de la Cordillera de los Andes. De esta forma Sierra Áspera e Imán son muestras que representan a la primera faja, mientras que El Laco es el homólogo de la faja andina.

#### **3.3.2.1 Cerro Carmen**

El trabajo realizado por Orrego en el año 2010 se enmarca en una investigación realizada por la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CChEN) con el objetivo de identificar prospectos de Uranio y Tierras Raras en el territorio nacional (ORREGO ALFARO, 2010). Los resultados obtenidos, desde la perspectiva de los Elementos Críticos Energéticos, son sumamente interesantes. Por un lado está el análisis en detalle de las Tierras Raras contenidas en dos prospectos de enriquecimiento ubicadas en el distrito Sierra Áspera, el primer prospecto corresponde a Cerro Carmen, mientras que el segundo lleva el mismo nombre que el distrito.

Es importante destacar que la aleatoriedad de las muestras elegidas para analizar por la CChEN no está asegurada. Tampoco en el informe queda explícito si existió un criterio de selección o no, por lo que no es posible extrapolar esos datos puntuales a un contexto global. De todas formas para el caso de Cerro Carmen, la CChEN cuantifica recursos indicados de Tierras Raras, por lo que suponiendo que la muestra puntual de Cerro Carmen posee la misma distribución de TTRR que los recursos indicados, entonces se podrá contar con una estimación del valor contenido de estos recursos medidos.

Es importante aclarar que estimar la distribución de TTRR de los recursos indicados a partir de una muestra puntual no representa una fuente de error importante puesto que la distribución de estos elementos generalmente se mantiene dentro de una misma zona de enriquecimiento. Para el caso de Cerro Carmen, se tiene que este yacimiento ha sido explotado entre 1960 y 1980 y de acuerdo a las situaciones de mercado de ese momento y también a la actual forma del pit se supone que el yacimiento consistía en 500 Mt @60% Fe (Gelcich, Davis, & Spooner, 2004).

Respecto de Sierra Áspera no se logró obtener información de las leyes de Hierro, por lo que no fue posible determinar el aumento de valor contenido. Además el tipo de yacimiento al cual se asocia este prospecto no está aún definido (entre IOCG y Fe-Ap), sin embargo dado el tipo de mineral de mena presente (magnetita) se supondrá del tipo Fe-Ap (Gelcich, Davis, & Spooner, 2004).

Se procede entonces a exponer los resultados obtenidos por esta investigación para ambos prospectos.

**Tabla 3.3.2.1-1 Leyes y valores contenidos Prospectos Cerro Carmen y Sierra Áspera**

Elemento	Medida	Cerro Carmen	Sierra Áspera	Indicados
Fe	%	60.0		
Tb	ppm	3	79	3
Y	ppm	140	4148	131
Nd	ppm	28	888	26
Eu	ppm	1	35	1
Dy	ppm	20	610	19
Valor Convencional	US\$/ton	92.3	0.0	0.0
Valor ECE	US\$/ton	37.9	1141.9	35.4
Valor Total	US\$/ton	130.2	1141.9	35.4
Aumento Valor por ECE	%	41.1	-	-

Elaboración propia. Fuente: Orrego

Destacan de estos resultados las interesantes leyes del prospecto Sierra Áspera con un valor contenido superior a los 1,100 US\$. A modo de referencia, si consideramos el precio del Cobre a 3.05 US\$/lb, se tiene que el contenido equivalente de Sierra Áspera corresponde a una ley de Cobre superior al 16%. Hay que recordar que la aleatoriedad de esta muestra no está asegurada.

Respecto de la cuantificación de recursos realizada por la Comisión, se tiene que de acuerdo a la investigación existen 3.9 Mt de mineral Indicado con una ley media de 759 g/t de Tierras Raras totales. Para poder cuantificar el valor contenido de este “yacimiento” de TTRR se supondrá que la distribución de cada elemento será la misma que la expuesta en la muestra puntual de Cerro Carmen en la tabla anterior.

De esta forma si en ese momento los 20 g/t de Disprosio representaban 2.5% del total de Tierras Raras medidas entonces se tomará que la cantidad de Disprosio en todo el prospecto representa ese mismo valor.

Se procede entonces a exponer la partición de Tierras Raras en la muestra puntual de la tabla anterior para así extrapolar estos resultados al mineral indicado del prospecto.

**Tabla 3.3.2.1-2 Extrapolación muestra puntual a Mineral Indicado**

<b>Elemento</b>	<b>Partición Muestra Puntual Cerro Carmen [%]</b>	<b>Ley Mineral Indicado Cerro Carmen [ppm]</b>
Tb	0.4%	3
Y	17.2%	131
Nd	3.4%	26
Eu	0.1%	1
Dy	2.5%	19
TTRR No Críticas	76.4%	580
TTRR Totales	100%	759

Elaboración propia. Fuente: Orrego

En función de las leyes estimadas de cada Elemento Crítico Energético en el mineral Indicado del prospecto Cerro Carmen, y considerando también el precio de los commodities expuestos anteriormente se tiene que el valor contenido del yacimiento supera los 35 US\$/ton de mineral. Al determinar nuevamente la equivalencia en Cobre, se tiene corresponde a más de 0.5% de Cu.

De esta forma queda cuantificado, a partir de dos ejemplos particulares, cuál es el valor contenido en Elementos Críticos Energéticos en los yacimientos de Fe-Ap de la costa de Chile. De todas formas hay que destacar la gran variación que existe entre las mediciones realizadas en Cerro Carmen y las realizadas en Sierra Áspera, a modo de referencia se tiene que el valor contenido aumenta en más de 30 veces entre un prospecto y otro.

Estos resultados claramente dan una referencia sin embargo se hace sumamente necesario una medición más exhaustiva de las leyes en los yacimientos de este tipo asociados a la Zona de Falla de Atacama.

Por último se tiene que en el proceso de concentración del Hierro, el relave queda enriquecido en minerales como el Apatito y por lo tanto es de esperarse un aumento importante de las leyes de TTRR en los descarte. En otras palabras, la extracción del Hierro del mineral produce una concentración de estos elementos que también sería interesante evaluar y que será considerada en los recursos metalúrgicos.

### 3.3.2.2 Imán

Este proyecto, ubicado en las cercanías de Vallenar, cercano a los proyectos Algarrobo y La Japonesa posee una particularidad que lo distingue de estos mismos, y ocurre que este yacimiento posee interesantes anomalías de Escandio (Sc). Es necesario destacar que si bien el Escandio no fue definido dentro del grupo de los elementos más críticos, sí fue nombrado por el DoE como parte de los elementos estratégicos, y si a ese hecho se le agrega además que las leyes de Sc en Imán son interesantes (más de 40 g/t), el autor sostiene que es conveniente considerar a Imán dentro de los proyectos de Fierro Apatito que sí pueden aportar a una eventual participación de Chile en el mercado de los elementos críticos energéticos.

Imán, en términos generales, corresponde a un yacimiento de Fierro Apatito de más de 1,000 Mt @ 30% de FeT, cubierto por un manto de gravas de más de 150 metros cuya mineralización se extiende en profundidad por más de 1 Km. Se le agrega a esto que existe una alta presencia de mineral de actinolita, el cual a su vez corresponde a un mineral que posee ocluido una parte importante del Escandio, el cual se encuentra distribuido de manera homogénea en el yacimiento y existen más de 300 Mt @ 40 g/t de Sc. Si bien la distribución de Escandio no está correlacionada con la del Fierro, existen extensas zonas del yacimiento donde la ley de Fierro supera el 20% y el Escandio se encuentra por sobre las 40 ppm, por lo que posterior a una eventual recuperación de Fierro se esperaría un enriquecimiento del Escandio dentro del “descarte” del proceso del Fierro, obteniéndose así un ley superior a los 50 ppm de Sc.

Antes de proseguir con el respectivo análisis de valor contenido, es importante especificar que la información expuesta sobre Imán se basa en trabajos realizados por la compañía (Minería Activa), que si bien no han sido publicados, es conocimiento del autor la veracidad de estos valores. En términos concretos la estimación de recursos fue realizada por Eduardo Magri (persona competente de acuerdo al código australiano de exploración). Por su parte el aumento de ley de Sc en el descarte del proceso de Fe fue estimado a partir de ensayos de concentración realizados en la empresa Polymin.

Haciendo el análisis comparativo de valor contenido sin considerar el Escandio y después incorporarlo dentro de la evaluación del recurso, se tiene que los resultados son bastante interesantes, al nivel de que el valor de la roca aumenta en casi tres veces. El precio a largo plazo considerado para el trióxido de Escandio ( $Sc_2O_3$ ) es de 2,000 US\$/KgOx basado en la información publicada por un proyecto similar transado en la bolsa de Australia (Metallica Minerals Ltd, 2012).

En la siguiente tabla se resume los valores obtenidos

**Tabla 3.3.2.2-1 Leyes y valores Contenidos en Imán**

<b>Elemento</b>	<b>Medida</b>	<b>Imán</b>
Fe	%	30.0
Sc	ppm	40
Valor Convencional	US\$/ton	46.2
Valor ECE	US\$/ton	122.7
Valor Total	US\$/ton	168.8
Aumento Valor por ECE	%	266

Elaboración propia. Fuente: Minería Activa

De esta forma se tiene que al considerar el valor contenido asociado a la presencia de Escandio el valor total aumentó considerablemente respecto del valor contenido por el Hierro únicamente. Suponiendo el valor total contenido estimado (168.8 US\$/ton) se tiene que el proyecto posee una ley de Cobre equivalente a 1.04%.

Destacar que toda la información anteriormente expuesta sobre el yacimiento Imán (sus leyes, disposición y volumen del yacimiento) fue provista por la Compañía Minería Activa Spa, por lo que el respaldo de esta información aún no es de dominio público así como también toda la información aquí expuesta es de carácter confidencial.

### 3.3.2.3 El Laco

La información y publicaciones en torno a este yacimiento son bastante escasas y para nada actualizadas. El presente análisis se realizará en base a un documento emitido por la Asociación Internacional de Vulcanología y Química del Interior de la Tierra (IAVCEI por sus siglas en inglés) el año 2004 en una asamblea general ocurrida en Pucón, Octava región de Chile.

Basado en el cuestionario existente al final del documento se desprende que la asamblea buscaba discutir sobre el tipo de yacimiento, el origen de los minerales, los tipos de contacto, etcétera. De esta forma el documento es bastante general en términos de la composición química del yacimiento por lo que la información se reduce a un prospecto de Fierro Apatito (categorización que ha ido cambiando en el tiempo) con 500 Mt @98% de Fierro, lo que lo transforma en un yacimiento de prácticamente pura magnetita. Respecto del resto de la composición se tiene que el yacimiento es pobre en Titanio y en Sílice, mientras que las TTRR se encuentran entre 0.5% y 1% de ley, sin embargo el documento no especifica la distribución de cada elemento de las Tierras Raras en el yacimiento (IAVCI, 2004).

Dado esto, no es posible cuantificar el valor contenido del yacimiento puesto que los precios de las Tierras Raras, en particular las pertenecientes al grupo Elementos Críticos Energéticos, son extremadamente variados.

Basado en la información de Roskill 2010, se tiene que el elemento de menor valor –en el largo plazo- del grupo de Tierras Raras es el Cerio con una proyección de 12.5 US\$/Kg óxido de Cerio.

Luego para tener un rango del valor contenido de El Lago se tomaran diferentes casos extremos de la distribución de TTRR en el yacimiento. Así cada caso considerará que el 100% de las Tierras Raras corresponde a Cerio, Itrio, Neodimio, Disproso o Europio. También se tomaran dos posibles situaciones, la ley de REE es de 0.5% o de 1%. Respecto del valor convencional contenido, representado por un mineral de Hierro de 98% ley, se consideró que el valor de ese concentrado sería proporcional a la ley, tomando cómo caso base la proyección de 100 US\$/ton @65% de Hierro. De esta forma el valor contenido del mineral considerando solamente el Hierro alcanza un valor de 150.8 US\$/ton.

En la siguiente tabla se resumen los valores obtenidos para los diferentes casos de composición de TTRR y de leyes de estos mismos. El valor total corresponde al valor convencional sumado al promedio entre el valor TTRR @ 0.5% y valor TTRR @1%. Finalmente el aumento de valor por TTRR se consideró porcentual para el caso del Cerio, y como factor multiplicador para los siguientes casos.

**Tabla 3.3.2.3-1 Rango de posibles composiciones y valores contenido de El Lago**

Elemento	Medida	Ce	Y	Nd	Dy	Eu
Valor Convencional	US\$/ton	150.8	150.8	150.8	150.8	150.8
Valor REE @ 0.5%	US\$/ton	73.2	317	583	5211	6315
Valor REE @ 1%	US\$/ton	146.4	635	1167	10421	12630
Valor Total	US\$/ton	260.6	626.9	1025.8	7966.6	9623.0
Aumento Valor por ECE	-	73%	3.2X	5.8X	51.8X	62.8X

Elaboración propia. Fuente: IAVCI

Luego en el “peor” de los casos, que corresponde a una ley de 0.5% de REE donde el Cerio representa la totalidad de esta ley, se obtiene un valor contenido promedio de 109.8 US\$/ton de mineral de El Lago. Finalmente la equivalencia de este valor corresponde a un mineral de 1.6% de Cobre.

Se tiene entonces que para los yacimientos de tipo Hierro Apatito, y basado en los estudios realizados para algunos yacimientos, la incorporación de los Elementos Críticos Energéticos al modelo de negocio de la explotación del recurso representa un valor agregado extra bastante interesante. En particular para el yacimiento El Lago que incluso en el peor de los escenarios el valor contenido aumenta más de un 70%. Respecto Cerro Carmen se tiene que lo más interesante es poder haber considerado recursos indicados puesto que el resto de los casos son principalmente muestras puntuales. Finalmente para el yacimiento Imán, que también son recursos indicados, los resultados son bastante auspiciosos sin embargo los costos de extracción y la competitividad del yacimiento deben ser comparables con situaciones internacionales.

### 3.4 Análisis de recursos geológicos

Basado en la toda la información recopilada en el capítulo tres y considerando la matriz de precios discutida en un comienzo se tiene que los resultados hasta el momento son bastante dispersos. Por un lado para los yacimientos de tipo IOCG se identifica un aumento del valor contenido al considerar los ECE sin embargo el aumento no es sustancial, si a esto además se le agrega el hecho del sesgo que posee trabajar con muestras puntuales (y no simulaciones geo-estadísticas) entonces el potencial de los IOCG en Chile como recurso de los Elementos Críticos definidos en el capítulo dos pareciera ser bajo o poco interesante.

Respecto de los yacimientos de Hierro Apatito los resultados son más alentadores, tanto como para Cerro Carmen, Imán y El Laco la consideración de los ECE dentro del valor contenido represento un aumento sustancial de éste. A esto se le agrega además que tanto para Imán como para Cerro Carmen se logró trabajar con recursos indicados por lo tanto el riesgo geo-estadístico es bastante menor que en el caso de los IOCG. Finalmente se tiene que estos yacimientos deben ser comparados con otras fuentes de estos elementos a nivel mundial, y como veremos más adelante los resultados son bastante categóricos respecto de que no son recursos de un buen nivel.

Por otro lado es necesario considerar los diferentes supuestos y limitaciones del trabajo realizado para determinar los recursos geológicos. El principal factor es la exclusión de la minería no metálica y el enfocar el trabajo únicamente a yacimientos existentes o identificados previamente. Sería de gran valor poder expandir esta evaluación a nuevos tipos de yacimiento e incluso a zonas donde no ha existido exploración. Un ejemplo de esta limitación es el caso del yacimiento Imán, el cual se conoce hace más de 30 años (Codelco y CAP lo exploraron en 1980) sin embargo ninguna de las campañas de exploración reparó ante las interesantes leyes de Escandio del yacimiento (o por lo menos nunca se oficializó la información) y recién el año 2010 se identifica este enriquecimiento que eleva el valor del yacimiento a niveles más interesantes comparado a su valor por Hierro. Tal vez esta historia podría repetirse en otras situaciones y la única forma de determinarlo es a través de inversión en exploración y de comprender que el valor de un yacimiento no está dado por el metal que se está explorando sino por el metal contenido en el recurso.

El segundo factor o supuesto es de carácter económico ya que la matriz de precios considerada es al largo plazo y considera que los mercados de estos elementos tenderán a estabilizarse, sin embargo la historia de los mercados de commodities se ha desarrollado de diferentes formas por lo que es necesario estar constantemente reevaluando la matriz considerada.

Finalmente en base a la baja información disponible se logró identificar oportunidades geológicas interesantes de las cuales Chile podría hacer uso y participar de nuevos mercados mineros. Los siguientes pasos tienen que ver con la evaluación económica de estos recursos (costo de procesamiento) y su competitividad internacional.



## Capítulo 4 Recursos metalúrgicos

### 4.1 Generalidades

Entendiendo los recursos metalúrgicos como aquellos productos colaterales obtenidos de manera inevitable en algún proceso de beneficio se tiene que corresponden a esta categoría los rípios, relaves, escorias y barros anódicos. En ese sentido estos recursos se pueden clasificar de acuerdo al tipo de yacimiento de origen, los cuales -cómo fue visto en el capítulo anterior- desde el punto de vista chileno corresponden en gran medida a los pórfidos cupríferos, IOCG y Fe-Ap. Si bien existen otros tipos de yacimiento en Chile son estos tres los que poseen un mayor potencial como fuentes de Elementos Críticos Energéticos.

Este capítulo busca identificar aquellos recursos metalúrgicos que puedan representar un mayor potencial como fuentes de estos elementos de forma tal que se pueda determinar si Chile posee, desde el punto de vista de sus recursos metalúrgicos, cierto potencial como productor de Elementos Críticos Energéticos. Para lograr este cometido será necesario determinar los volúmenes actuales de cada uno de estos recursos y su composición.

Por una parte con el volumen, ya sea como tasa de producción (volumen producido al año) o cómo un inventario de lo que actualmente se encuentra en Chile (por ejemplo la cantidad de relave asociado a faenas de flotación de cobre que operaron en el pasado o que se encuentran actualmente operando) se tendrá una idea del “tamaño” del potencial, mientras que con la composición de cada recurso se tendrá una idea de la “calidad” de éste.

Al igual que en el capítulo de recursos geológicos, la metodología de evaluación del potencial será el valor contenido asociado a los Elementos Críticos Energéticos. Para esto será necesario hacer una distinción entre aquellos recursos metalúrgicos que sí son aprovechados, como es el caso de los barros anódicos, y aquellos recursos que no lo son y podrían serlo (en el caso de que exista un potencial), como por ejemplo los relaves de las faenas de beneficio de un yacimiento tipo IOCG. Luego para el caso de los recursos que actualmente se aprovechan, además de cuantificar el valor contenido será necesario hacer un análisis de si Chile está haciendo uso del carácter estratégico de este elemento. Un ejemplo concreto es el Telurio, el cual se obtiene como subproducto del proceso de maquila de los barros anódicos. Cómo veremos más adelante Chile exporta gran cantidad de este elemento en los concentrados de cobre, perdiendo la oportunidad de transformarse en el principal productor de Telurio y por lo tanto jugar un rol crucial en este mercado, este fenómeno se explica por el bajo crecimiento de la capacidad en fundición que ha tenido Chile si se compara con el crecimiento de su producción de Cobre. Esto se debe principalmente a las compañías de fundición en China que han vuelto prácticamente imposible competir en fundición fuera del gigante asiático, transformando el negocio en uno de margen nulo e incluso negativo en ciertas ocasiones.

Finalmente, los recursos que hoy en día no se aprovechan y que tal vez podrían ser aprovechados serán evaluados a través del valor contenido que representan en el recurso. Cabe destacar que el acceso a esta información, en particular la composición de los relaves y escorias, es bastante difícil puesto que generalmente la composición posee injerencias ambientales que podrían perjudicar la reputación de las distintas faenas. Incluso, si bien existen algunos reportes de composición para casos puntuales, como el Tranque de Cauquenes de Codelco, las leyes reportadas no son sobre los Elementos Críticos Energéticos, sino de aquellos elementos que están presentes en el relave y que dado sus leyes podría ser interesante su extracción. En ese sentido, la información disponible posee desde ya un sesgo económico, de forma tal que todo lo expuesto ya considera cierto potencial.

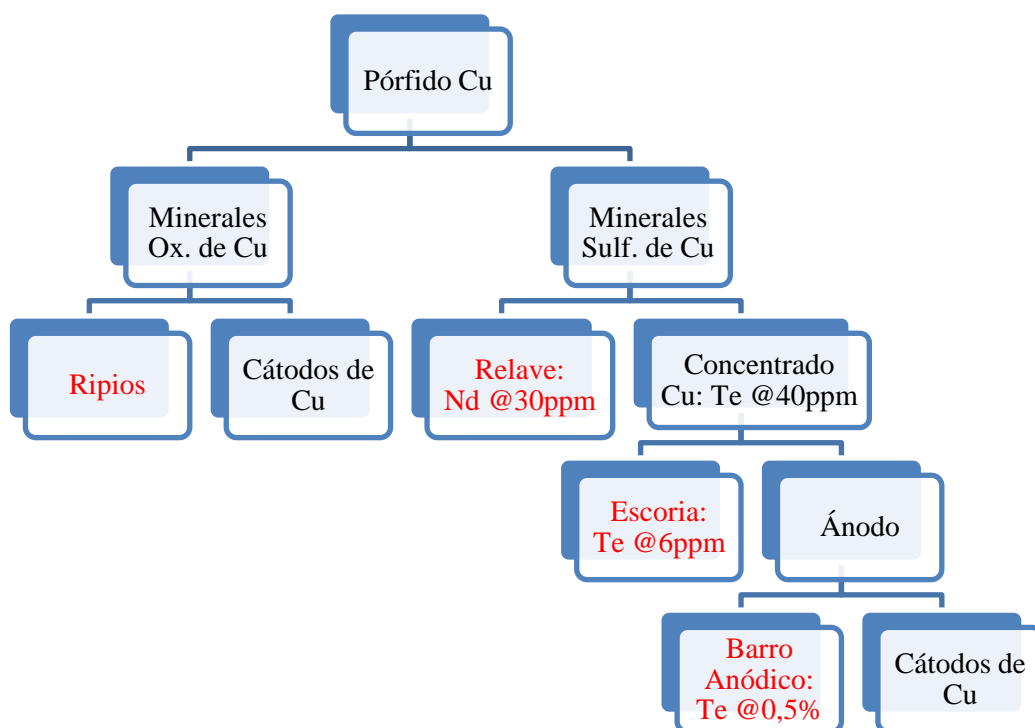
Se procede entonces a profundizar el análisis de cada uno de los recursos metalúrgicos obtenidos en el procesamiento de los tres principales yacimientos de Chile. Destacar que en el capítulo de anexos se encuentra una tabla resumen sobre la producción de Cobre a nivel país en sus diversos estados de comercialización (concentrado, ánodo, cátodo) además de una segunda tabla con los supuestos utilizados en cada estimación.

## **4.2 Pórfidos cupríferos**

Cómo fue descrito en el capítulo anterior los pórfidos cupríferos son los de mayor importancia dentro de los yacimientos de minería metálica en Chile. Esta relevancia es en dos sentidos, es la minería de mayor volumen y la que mayor parte representa dentro del mercado minero chileno. Es por esta razón que lograr determinar el potencial de ciertos recursos metalúrgicos de origen porfídico sería bastante interesante para Chile, dado que el país es el mayor productor de Cobre del mundo, por lo que debiese esperarse que este eventual potencial lo ubique en una situación estratégica de la cual Chile debiese poder hacer uso.

En términos generales el proceso de beneficio de un pórfido cuprífero posee dos líneas principales: línea de óxidos y línea de sulfuros. Esta última es la de mayor cantidad de etapas puesto que es necesaria una concentración del Cobre, una fundición del concentrado y finalmente una electro-refinación del ánodo producido por la fundición. A su vez los óxidos de Cobre generalmente son lixiviados y el electrolito rico en Cobre iónico es sometido a un proceso de electro-obtención.

Los productos finales e intermedios de los procesos anteriormente descritos pueden representarse a través del siguiente diagrama.



**Diagrama 4.2-1 Diagrama Productivo Pórfidos de Cobre**

Elaboración propia.

En el diagrama anterior están en color rojo aquellos productos que se consideran recursos metalúrgicos mientras que en negro están los productos que a su vez son insumos dentro de la propia línea de producción de Cobre. Así concentrado y ánodos de Cobre son la situación intermedia de un proceso entre el mineral de sulfuro de Cobre y el cátodo. Mientras que el relave, la escoria y el barro anódico no son más que consecuencias del proceso principal.

A partir de esto se obtiene que los ripios de la lixiviación de óxidos, el relave de flotación, la escoria de fundición y los barros anódicos corresponden a los cuatro recursos metalúrgicos asociados a los yacimientos del tipo pórfido cuprífero.

Se procede entonces a desarrollar más en detalle los cuatro tipos de recursos presentes en el proceso de beneficio de este tipo de yacimiento.

#### 4.2.1 Relaves

De acuerdo al anuario de Cochilco 2011, en Chile se produjo en ese mismo año un total de 5.3 MTMF de Cobre, del cual 2.02 MTMF fueron producidas mediante la extracción por solvente y posterior electro-obtención (COCHILCO, 2012). De esto se desprende que 3.27 MTMF de Cobre fueron producidas mediante el método de flotación. Si para esta fracción de Cobre que fue flotada se consideran los siguientes supuestos operacionales razonables:

**Tabla 4.2.1-1 Supuestos Flotación de Cobre**

Ley Media Cu en Alimentación	0.8%
Recuperación metalúrgica Cu en flotación	86%
Ley de Cu en Concentrado de Cobre	28%

Se obtiene entonces que el total de relave seco producido el año 2011 fue de 387 MTM. Luego es necesario descartar todo aquel relave que fue producido en yacimientos de tipo IOCG o yacimientos exóticos de Cobre (cómo El Tesoro), por lo que es necesario identificar que fracción del total de Cobre producido en Chile el año 2011 provino de yacimientos tipo Pórfido Cuprífero.

Al considerar el detalle propuesto por Cochilco en su anuario se tiene que más del 77% de la producción de Cobre de Chile durante ese periodo provino de éste tipo de yacimiento (COCHILCO, 2012). Luego si se hace el supuesto de que la proporción de producción total de Cobre entre pórfidos y otro tipo de yacimiento se mantiene cuando se analiza sólo la producción de Cobre mediante flotación entonces se tiene que el año 2011 se produjo más de 298 MTM de relave seco a partir de pórfidos cupríferos. Importante destacar que el supuesto de mantener la proporción tendería a subestimar este valor puesto que parte importante de los yacimientos exóticos producen óxidos de cobre mediante la lixiviación de estos por lo que del total de relave producido por Cobre debiese ser una mayor parte asociada a la flotación de minerales provenientes de pórfidos.

Del párrafo anterior se puede concluir que el volumen o “tamaño” de este recurso metalúrgico es enorme. Si se considera por ejemplo una ley de 20 g/t de Nd –más adelante se verá que corresponde a la concentración obtenida en el tranque Cauquenes de la división El Teniente de Codelco- se tiene que anualmente Chile produce en forma de relave (es decir con la etapa de molienda ya realizada) un total de 7.8 Kton de  $Nd_2O_3$  al año. Esta cantidad de Neodimio hubiese sido suficiente para satisfacer más del 34% del Nd consumido durante el año 2011 (Roskill, 2012).

Hasta el momento se ha logrado cuantificar el tamaño de los recursos metalúrgicos asociados a los relaves del proceso de flotación de pórfidos de Cobre, sin embargo es necesario determinar la “calidad” del recurso en función del valor contenido y su ley, de esta forma se podrá entender si estos enormes recursos pueden ser competitivos.

Para entender la calidad de los diversos relaves que hoy en día se producen en Chile o que en su momento fueron producidos sería necesario tener acceso a información prácticamente inexistente y en los escasos casos en que ha sido generada la información es de carácter confidencial. A pesar de esto se ha logrado tener acceso a una información generada por Codelco, en su división El Teniente, respecto de la leyes de Tierras Raras en el relave del tranque de Cauquenes. En esta parte del trabajo se tomará esta información como representativa de lo que ocurre globalmente en los relaves de pórfidos cupríferos.

Es evidente que cada relave es único puesto que su yacimiento de origen es único, incluso a lo largo de la vida de la operación de la mina la composición del relave variará drásticamente, sin embargo dada la reducida información disponible esta generalización se vuelve necesaria.

Durante el año 2012 Codelco lleva a cabo un “Estudio de Mercado para inversión en Tierras Raras en Chile”, el cual en términos generales busca enmarcar la historia y la actualidad del mercado de Tierras Raras. Parte del documento consistió en evaluar el contenido de Tierras Raras en el relave de Cauquenes. Si bien los resultados expuestos sólo hacen referencia al Cerio, Lantano y Neodimio se desprende del texto que la totalidad de Tierras Raras fueron medidas, sin embargo sólo las anteriormente nombradas fueron las que presentaron valores “relevantes”.

**Tabla 4.2.1-2 Ley Media de TTRR Relave Cauquenes**

Elemento	Medida	Ley Media	Desv. Estándar
Ce	ppm	72.6	8.9
La	ppm	1	2.7
Nd	ppm	20	2.6

Elaboración propia. Fuente: Codelco

De estos tres elementos presentes de forma “relevante” en el tranque de Cauquenes, solamente el Neodimio (en rojo en la tabla anterior) ha sido definido cómo crítico.

Considerando estas leyes y el precio proyectado a largo plazo del Neodimio, se tiene que el valor contenido por tonelada de relave corresponde a 2.3 US\$. Si además se consideran en la evaluación el Cerio y Lantano (que no pertenecen a la categoría de críticos) entonces el valor contenido es el siguiente

**Tabla 4.2.1-3 Valor contenido de TTRR del Relave Cauquenes**

Ce	US\$/ton	1.1
La	US\$/ton	0.0
Nd	US\$/ton	2.3
Valor total	US\$/ton	3.4

Elaboración propia. Fuente: Codelco

Destacar que si bien el precio del Neodimio había sido discutido previamente, en este caso el precio del Cerio y Lantano fue considerado en base a la misma publicación de Roskill 2010.

A partir de estos resultados se puede inferir que si bien el volumen de los recursos asociados a los relaves de los yacimientos tipo pórfido cuprífero es verdaderamente interesante, aparentemente la “calidad” de éste no es interesante desde el punto de vista del valor contenido.

De todas formas para realizar una afirmación más certera es necesario conocer la composición de los diversos relaves existentes en Chile.

## 4.2.2 Escoria

Una vez terminada la concentración de los sulfuros de Cobre mediante la flotación de los minerales de mena, el siguiente proceso es la fundición del concentrado. Este proceso, de carácter piro-metalúrgico, tiene como objetivo principal la separación del Cobre de los otros dos constituyentes principales del concentrado: Fierro y Azufre. Para lograr esto el concentrado es preparado mediante una etapa de secado (que algunas veces incluye tostación), luego este concentrado seco es fundido a altas temperaturas logrando que el Fierro presente se oxide y se genere una separación por densidad entre la Escoria (óxidos de Fe y otros elementos) y la Mata (sulfato de Cobre y Fierro además de otros compuestos menores).

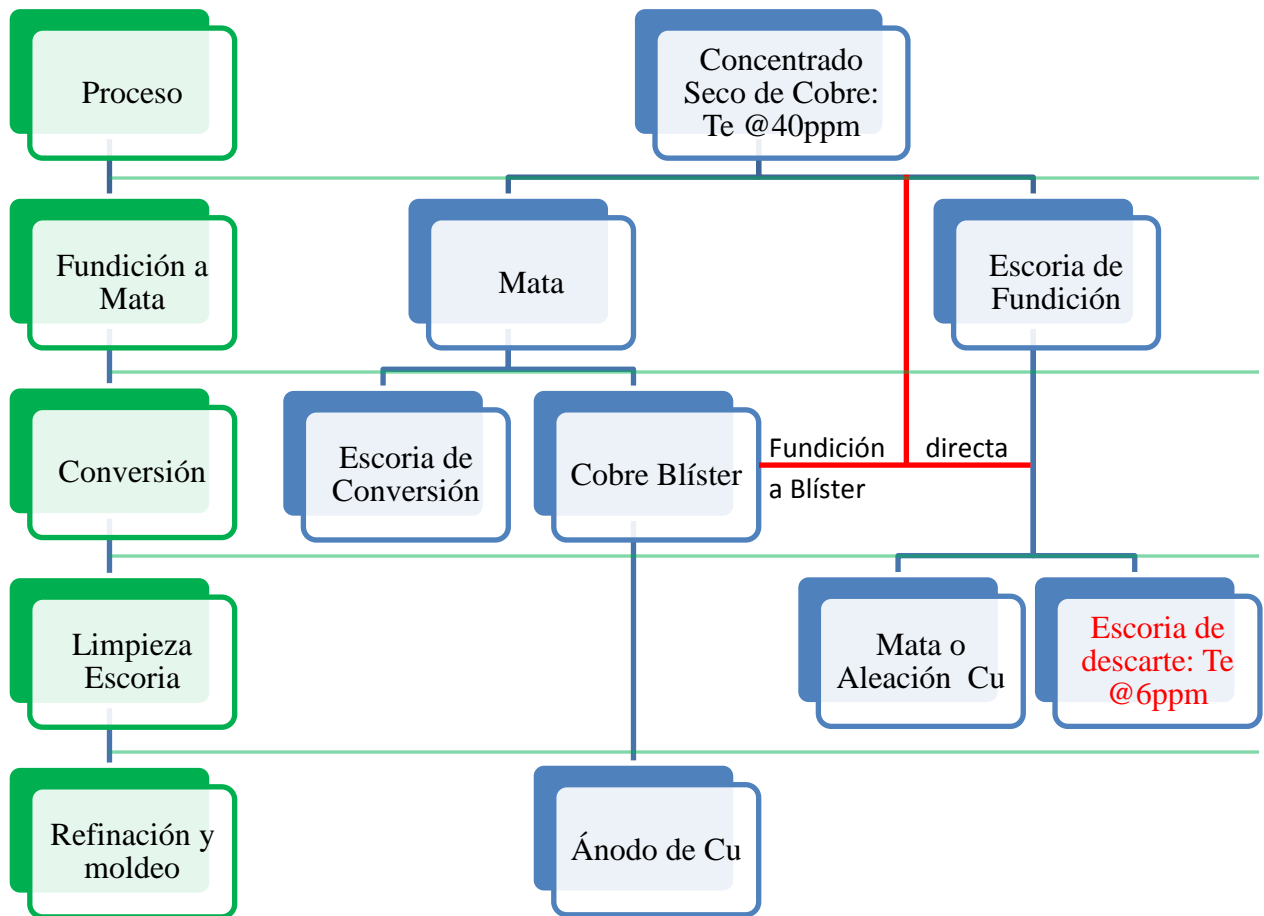
De esta forma la Mata es sometida a un proceso de conversión con el objetivo de remover el Azufre asociado al Cobre y al Fierro, por su parte la Escoria es sometida a un proceso de limpieza de Escoria (HLE) para recuperar el Cobre y otros elementos relevantes. El proceso de conversión, que puede llevarse de forma continua o discontinua, al contrario de la fundición es un proceso que genera calor y donde además logra obtenerse un Cobre Blíster (98% de Cu) y una Escoria rica en Fierro, sílice y otros elementos. La escoria producida en la conversión es recirculada en su totalidad y vuelve a someterse al proceso de fundición inicial, por su parte el Azufre removido, que fue oxidado y llevado a su estado gaseoso de  $\text{SO}_2$ , es captado dentro del sistema de gases para un posterior tratamiento de éstos. A partir de esos gases se logra obtener una importante producción de ácido sulfúrico.

Respecto del Cobre Blíster se tiene que aún no ha alcanzado el nivel de pureza necesario para sus aplicaciones eléctricas por lo que es sometido a un proceso de refinado. El objetivo es poder remover todo el Azufre remanente que no fue oxidado en la etapa anterior así como remover todo el oxígeno presente en el Blíster. El proceso consiste en la inyección de aire y fundente dentro del lecho provocando la oxidación del Azufre (formando  $\text{SO}_2$  gaseoso) y otras impurezas, además de la oxidación ocurre un proceso de volatilización de elementos traza como Zinc y Cadmio.

Luego, removidas las impurezas, es necesario remover el oxígeno disuelto en el Cobre líquido, y para esto se reduce el Cobre mediante la inyección de agentes reductores como leña, carbón e hidrocarburos livianos (gas natural o Hidrógeno), proceso más utilizado en la actualidad. Finalmente el Cobre refinado es moldeado a ánodo en la rueda de moldeo para su posterior comercialización o en algunos casos el ánodo es sometido a un proceso de electro-refinación.

Es necesario destacar que en algunos casos el concentrado de Cobre es fundido directamente a Cobre Blíster, sin pasar por el estado intermedio de la Mata de fundición, en esos casos el Blíster producido también es sometido al proceso de refinación (Riveros, 2009).

En el siguiente diagrama queda representado el proceso de fundición y conversión de concentrado de Cobre.



**Diagrama 4.2.2-1 Diagrama de fusión Conversión Cobre**

Elaboración propia. Fuente: Apuntes Profesor G. Riveros

Se desprende del diagrama anterior que del proceso piro-metalúrgico de fundición y conversión se obtienen como producto ánodos de Cu y la escoria de descarte (en rojo). Claramente el ánodo es en sí un producto final por lo que el eventual recurso metalúrgico de este proceso sería la escoria.

Una vez comprendido el proceso de fusión y conversión del concentrado de Cobre es necesario poner en contexto esta información con la realidad de Chile para poder cuantificar el volumen de este recurso en el país y luego determinar la calidad de éste.

Actualmente en Chile existen siete fundiciones que ordenadas de norte a sur corresponden a la Fundición Chuquicamata, Alto Norte, Potrerillos, Paipote, Chagres, Ventanas y Caletones.

De estas fundiciones cuatro pertenecen a Codelco, dos son privadas (Chagres y Alto Norte) y Paipote pertenece a la Empresa Nacional de Minería (ENAMI).

Para lograr cuantificar el volumen del recurso asociado a la escoria de estas fundiciones es necesario estimar la cantidad de escoria en botadero por unidad de Cobre Blíster producido. En términos generales la literatura concuerda en que este valor es cercado a 2 (Sanchez, Reyes, & Valenzuela, 2010), es decir por cada tonelada de Cobre Blíster producido se generan dos toneladas de escoria que deben ser apiladas en un botadero. El rango de este valor oscila entre 1.6 (Ayres, Ayres, & Rade, 2002) y sobre los 2.2 (Sanchez, Reyes, & Valenzuela, 2010). A modo de referencia operacional la fundición Potrerillos alcanza una razón de 1.8 toneladas de escoria a fundición por tonelada de Cobre Blíster producido (División Salvador, Codelco, 2011).

Luego basado en el anuario de Cochilco 2011 se tiene que ese año Chile produjo 1,360 Kton de Cobre Blíster, por lo que si se considera una razón de 1.8, se tiene que ese mismo año en el país se produjo más de 2,400 Kton de escorias que fueron depositadas en botaderos. Desde una perspectiva más histórica se cree que actualmente en Chile hay más de 40 Mton de escorias depositadas (Sanchez, Reyes, & Valenzuela, 2010). Cómo lo veremos más adelante, a juicio del autor, este valor tiende a subestimar si se considera únicamente la producción de los últimos veinte años.

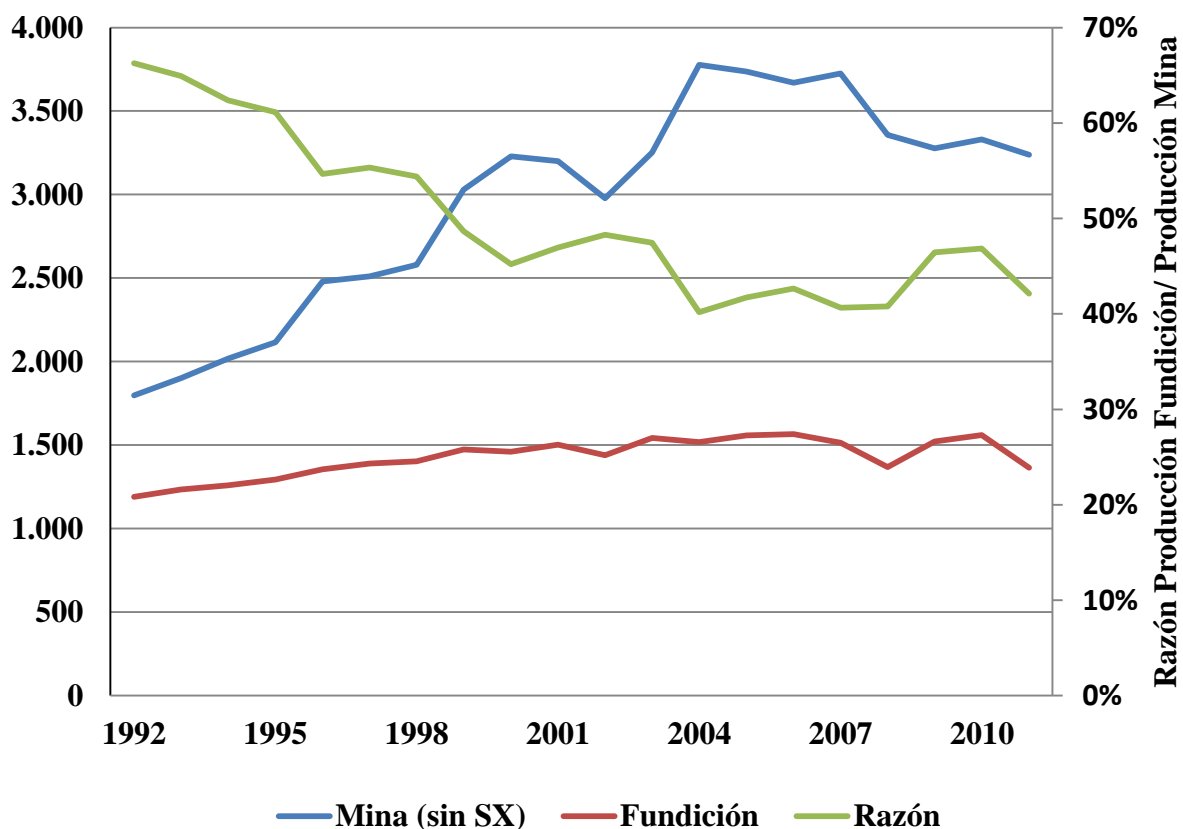
Así resta entonces determinar si la composición de estos 2.4 Mton de escorias producidas el año 2011 es interesante desde la perspectiva de los Elementos Críticos Energéticos. En términos generales más del 95% de la escoria a depositar se compone de óxidos de Aluminio y Hierro, sílice y Zinc (Sanchez, Reyes, & Valenzuela, 2010) y (División El Teniente, Codelco, 2000). El resto de la masa se compone principalmente de Cobre, óxido de Magnesio y de Calcio. Al analizar la composición típica del concentrado de Cobre chileno, ya sea de origen porfídico o IOCG se tiene que la composición es bastante similar y el único elemento considerado crítico dentro del concentrado de Cobre es el Telurio, el cual en promedio tiene una ley de 40 g/t en el concentrado (Cochilco, 2005). Luego si se considera que en promedio cerca del 30% del Telurio y Selenio contenido en el concentrado de Cobre es depositado junto con la escoria en el botadero (Ayres, Ayres, & Rade, 2002) se tiene que la ley de Telurio en la escoria debe ser cercana a los 6-7 g/t. Esto, desde el punto de vista del valor contenido no parece ser interesante puesto que el valor no supera los 2 US\$/ton de escoria. De todas formas en este análisis es necesario conocer datos medidos experimentalmente en cada uno de los botaderos de escoria sin embargo el valor no debiese divergir en demasía.

A pesar de que ya se ha dimensionado el volumen y calidad del recurso metalúrgico asociado a las escorias de fundición se vuelve interesante detenerse en una tendencia que se ha observado durante los últimos 20 años en Chile.

Como se verá en el siguiente gráfico la participación de la industria de fundición y conversión de Cobre ha ido perdiendo relevancia en términos relativos respecto del total de Cobre producido en la mina. A comienzos de la década del 90 cerca del 60% del Cobre producido en Chile era fundido y convertido en el territorio nacional, hoy en día este valor no alcanza el 48%.



Destacar que para este caso se consideró que la producción de Cobre desde la mina corresponde al total de Cobre producido en Chile descontando el Cobre producido mediante el método de extracción por solvente, pues sólo así se puede evaluar cuanta relevancia ha perdido la fundición respecto del total de Cobre que eventualmente será fundido en otro país.



**Gráfico 4.2.2-1 Producción chilena de Cobre Mina y Fundición**

Elaboración propia. Fuente: Cochilco

Este fenómeno ocurre porque Chile no fue capaz de aumentar su capacidad de fundición de forma proporcional a su capacidad de explotación.

A su vez esto se debe a dos razones, la subvención de China a las fundiciones de ese país (lo que hace perder competitividad a las fundiciones nacionales) y también tiene relación con el hecho de que Chile no ha establecido una política país respecto del aprovechamiento de todos los subproductos asociados a la fundición y posterior electro-refinación del Cobre.

Si bien desde el punto de vista de las escorias de fundición esto no pareciera significar un gran valor, veremos más adelante que para el caso de los barros anódicos (subproducto obtenido en la etapa siguiente a la obtención del ánodo) sí es una pérdida importante no sólo desde el punto de vista netamente económico, sino también de la oportunidad de que Chile participe en un mercado estratégico como es el del Telurio.

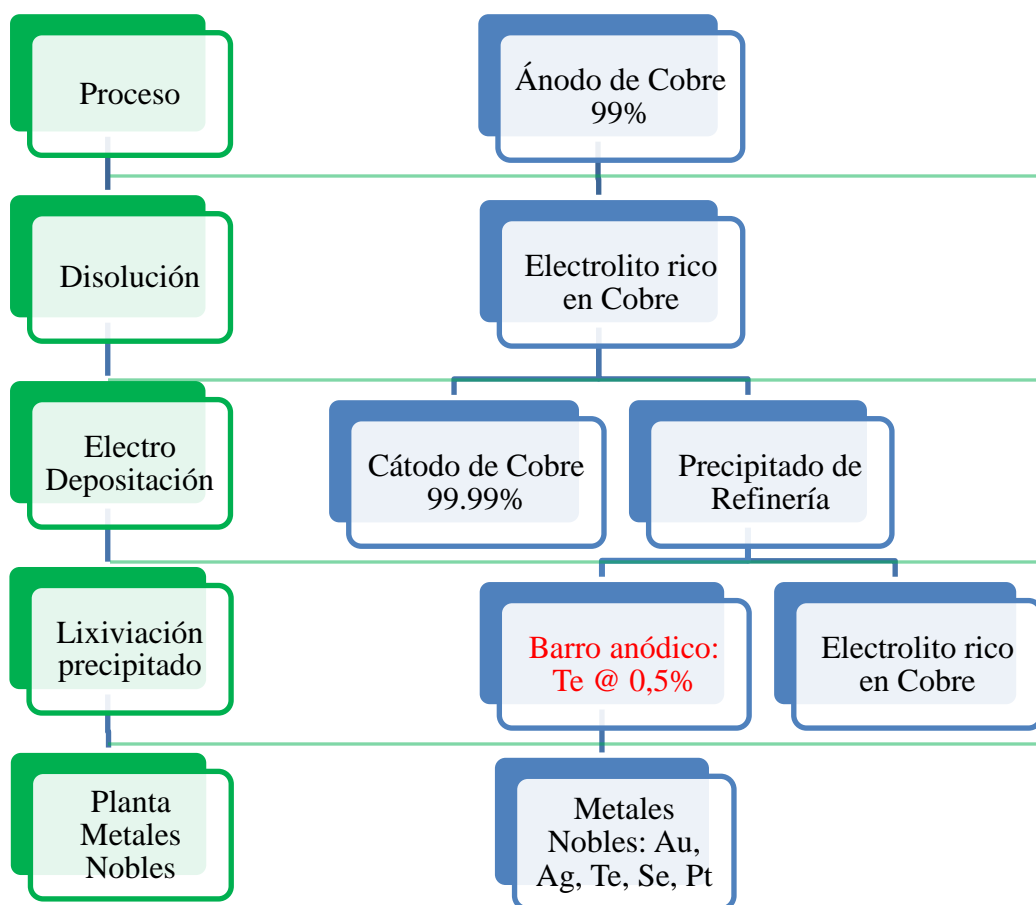
### 4.2.3 Barro anódico

Una vez obtenido el ánodo en la rueda de moldeo se tiene que el nivel de pureza del producto debe ser aún mayor para ser comercializado como cátodo de Cobre de alta pureza. Este proceso busca elevar la concentración de Cobre desde un 99% hasta un 99.99%. Para esto los ánodos obtenidos en el proceso anterior son sometidos a un proceso de electro-refinación que, términos generales, consiste en una disolución completa del ánodo en un medio ácido (generalmente ácido sulfúrico) dentro de una celda de refinación. Luego los iones de Cobre disueltos en el medio son eléctricamente forzados a depositarse en las placas de cátodo producto de la corriente eléctrica que circula a través de éstas. Dado el control exacto del diferencial de potencia en las placas, así como también de la corriente el proceso de electro-depositación es altamente selectivo permitiendo que sólo el Cobre sea el que se deposite en las placas. Así se alcanzan purezas por sobre el 99.99% de Cobre.

Por otro lado toda la masa presente en el ánodo que no fue depositada en el cátodo va sedimentando en el fondo de las piscinas de refinación, y su composición es extremadamente valiosa puesto que más del 25% corresponde a Cobre y la masa restante es rica en elementos preciosos como Oro, Plata, Platino, Selenio y Telurio entre otros. Esta masa, que se denomina como “precipitado de refinería”, es posteriormente lixiviada con el objetivo de recuperar todo el Cobre contenido en ella, y es este proceso de lixiviación el que genera como subproducto el barro anódico. A su vez, este barro se compone del “precipitado de refinería” pero sin el Cobre que éste último contenía.

Una vez obtenido el barro anódico, éste se lleva a su posterior procesamiento para recuperar diversos metales como Oro, Plata, Telurio, Selenio y Platino.

En el siguiente diagrama queda representado el proceso anteriormente explicado



**Diagrama 4.2.3-1 Diagrama Electro refinación Cu**

Elaboración propia. Fuente: Apuntes Profesor L. Cifuentes

En el diagrama anterior están descritos los procesos, en la columna de la izquierda, y los productos intermedios en cada uno de estos, columna de la derecha. En rojo se encuentra el barro anódico, que representa el recurso metalúrgico en cuestión para esta sección.

Actualmente en Chile existen sólo tres faenas de refinación eléctrica de ánodos de Cobre, todas pertenecientes a Codelco y asociadas a sus fundiciones: Refinería Chuquicamata, Potrerillos y Ventanas. Estas tres faenas durante el año 2011 produjeron más de 999 kTon de cátodos de Cobre, lo que se traduce en que más de 345 Kton de Cobre fino fueron llevadas a fundición pero no fueron refinadas por medio del proceso electrolítico (COCHILCO, 2012).

Por otro lado, históricamente las refinerías de Chuquicamata y Ventanas poseían su propia planta de metales nobles (PLAMEN) donde una fracción de los barros anódicos producidos en sus tres refinerías era procesada y por lo tanto se recuperaba Oro, Plata, Telurio, Selenio entre otros elementos. Sin embargo el año 1997, y después de 30 años de operación, la PLAMEN de Codelco Norte fue cerrada (Codelco Chile, 2012), mientras que el año 2012 y producto de problemas ambientales la planta de metales nobles de Ventanas también decidió suspender su operación durante el primer semestre del año 2013 (División Ventanas, Codelco, 2012).

Cómo lo veremos más adelante ambas decisiones han forzado a Codelco a exportar la totalidad de su producción de barros anódicos y también a iniciar los estudios necesarios para construir una nueva planta de metales nobles en el complejo portuario Mejillones (Codelco Chile, 2013).

Corresponde entonces estimar la producción de barro anódico en Chile, para lograr cuantificar el tamaño de este recurso, sin embargo es necesario realizar una distinción entre este recurso metalúrgico y los anteriormente revisados. Ocurre que los barros anódicos como tal han sido comercializados y procesados desde hace más de cincuenta años, por lo que no es correcto aseverar que Chile no participa de este mercado. En ese sentido, la interrogante válida corresponde a entender si Chile ha desarrollado al máximo su mercado de barros anódicos. Ese desarrollo tiene que ver con la ubicación que Chile ha ocupado en la cadena de valor de este recurso y también guarda relación con la cantidad de barros anódicos que Chile produce y cuánto podría, desde el punto de vista de los recursos metalúrgicos, producir. Más adelante se verá que Chile no ha logrado desarrollar este potencial en ambos sentidos, ha perdido posición en la cadena de valor y ha dejado oportunidades para aumentar la producción de barros anódicos en Chile.

De todas formas dado que esta sección de la investigación busca dimensionar el volumen y la calidad de los recursos, para el caso de los barros anódicos esta etapa consistirá en determinar la actual producción de Chile (volumen), la composición de estos barros (calidad) y finalmente dimensionar la cantidad de barros anódicos que Chile podría producir pero no lo hace (potencial). Este último punto será abordado desde el punto de vista de los recursos, en el sentido que buscará determinar la cantidad de barro anódico que Chile no aprovecha cuando comercializa concentrados y/o ánodos de Cobre (y por lo tanto no recupera los barros anódicos), es evidente que esta visión debe ser contrastada con la capacidad operacional con que cuenta Chile (tanto como de fundición y refinería de Cobre) sin embargo ese análisis será realizado en capítulos posteriores.

Para determinar el volumen de la actual producción de barros anódicos en Chile es necesario conocer la tasa de producción de barro respecto de la producción de cátodos de Cobre, valor que varía ampliamente si se considera distintas fuentes de información. Algunos autores cercanos a la academia postulan que por cada tonelada de cátodo de Cobre se producen cerca de 6 Kilogramos de barro anódico, en este caso el autor considera una ley de Cobre en el barro del 25% (lo correcto sería hablar de precipitado de refinería más que barro anódico) (Ayres, Ayres, & Rade, 2002). Por otro lado, en base a la declaración de impacto ambiental entregada por la división de Ventanas de Codelco el año 2007, por cada tonelada de cátodo de Cobre se producen 1.5 kilogramos de barro anódico carente de Cobre (División Ventanas, Codelco, 2007). Si se considera que de los 6 kilogramos propuestos por el primer autor, en el proceso de lixiviación del precipitado de refinería se recuperara todo el Cobre y nada más que el Cobre, se tendría que la producción de barro anódico carente de Cobre sería cerca de 4.5 Kilogramos por tonelada de cátodo refinado. Ambos valores divergen por un factor de tres.

Por otro lado durante el año 2012 Codelco presentó dos declaraciones de impacto ambiental asociadas al transporte de barros anódicos entre sus distintas divisiones y puertos del país. Desde su división de Ventanas, Codelco presento la necesidad de transportar cerca de 840 toneladas de barro anódico por año (División Ventanas, Codelco, 2012), mientras que de Codelco Norte 1300 toneladas por año y la división Salvador solicitó permiso para 350 toneladas anuales (Codelco Chile, 2012). Sumando los tres valores, da un total cercano a las 2500 toneladas por año, si a esto se le agrega que durante el año 2013 Codelco no podrá procesar ninguna fracción de su producción de barros anódicos puesto que la planta de Metales Nobles de Chuquicamata cerró el año 1997 (Codelco Chile, 2012) y la de Ventanas no operará durante el año 2013 (División Ventanas, Codelco, 2012) es razonable suponer que ambas declaraciones ambientales buscaban permitir el libre tránsito del total de barros anódicos producidos por Codelco.

Si se considera además que los últimos años la producción de cátodos de las tres refinerías es cercana a los 1000 kTon de Cobre, entonces en ese caso el factor de producción de barro anódico considerado por ambas declaraciones ambientales es del orden de 2.5 Kilogramos de barro por cada tonelada de cátodo de Cobre. Destacar que en ambas declaraciones ambientales se entrega que el rango de contenido de Cobre en los barros oscila entre 0.4 y 8.8% por lo que la tasa de producción de barro anódico carente de Cobre debiese bajar a lo más a 2.3.

En cualquiera que sea el caso, y a juicio de la confiabilidad de las fuentes de acuerdo al autor, se decide suponer que la producción de barro anódico será equivalente a 1.5 kilogramos por cada tonelada de cátodo de Cobre. La razón de este supuesto guarda relación también con el carácter operacional de la información emitida por Codelco para su estudio de impacto ambiental del año 2007. Además las declaraciones ambientales antes comentadas probablemente consideren el intervalo superior del rango operacional de las actuales faenas de Codelco, puesto que desde el punto de vista de los permisos tiene sentido cubrirse de un eventual aumento en la producción.

De esta forma se tiene que Chile produce, desde el punto de vista operacional discutido anteriormente, un total de 1,500 toneladas de barro anódico carente de Cobre al año si se consideran las 1,000 Kton de Cobre refinado que produjo Chile el año 2011, lo que se traduce en casi 2,000 toneladas al año de precipitado de refinería, si es que se asume un 25% de Cobre en éste.

Una vez definido el volumen de barros anódicos producidos en Chile se tiene que la composición de éste es sumamente valiosa, no sólo desde el punto de vista de elementos críticos energéticos, sino también de elementos más convencionales cómo el Oro y la Plata.

En la siguiente tabla se procede a exponer cuales son los rangos de diversos elementos en la composición de los barras anódicos.

**Tabla 4.2.3-1 Rangos de composición barro anódico**

<b>Elemento</b>	<b>% Min</b>	<b>% Max</b>
Ag	16.32	35
Au	0.2	0.716
Al	0.09	0.141
As	0.7	10
Bi	0.23	2
Ca	0.03	0.115
Cu	0.4	8.867
Fe	0.1	0.246
Mg	0.01	0.019
Ni	0.013	0.03
Pb	1	8
Sb	4	16
Se	8.8	18
Te	0.5	3

Elaboración propia. Fuente: Codelco

Desde el punto de vista netamente estratégico se tiene que de los elementos constituyentes de los barras anódicos solamente el Telurio corresponde a un Elemento Crítico Energético, sin embargo es evidente que por su valor, tanto el Oro como la Plata son extremadamente relevantes en la composición del barro anódico. En la siguiente tabla se comparan el valor contenido de los dos componentes principales de este recurso metalúrgico y el del único componente estratégico: Oro, Plata y Telurio

**Tabla 4.2.3-2 Rango de Valor contenido de Barras Anódicos**

<b>Elemento</b>	<b>Valor Min [US\$/Kg]</b>	<b>Valor Max [US\$/Kg]</b>
Ag	115	247
Au	85	304
Te	1.4	8.4

Elaboración propia. Fuente: Codelco

De la tabla anterior queda en evidencia que el Telurio no representa un aporte importante al total del valor contenido de los barras anódicos, su participación es entre 1 y 2% del total.

Sin embargo para analizar el verdadero valor de los barros anódicos es importante destacar los siguientes dos fenómenos:

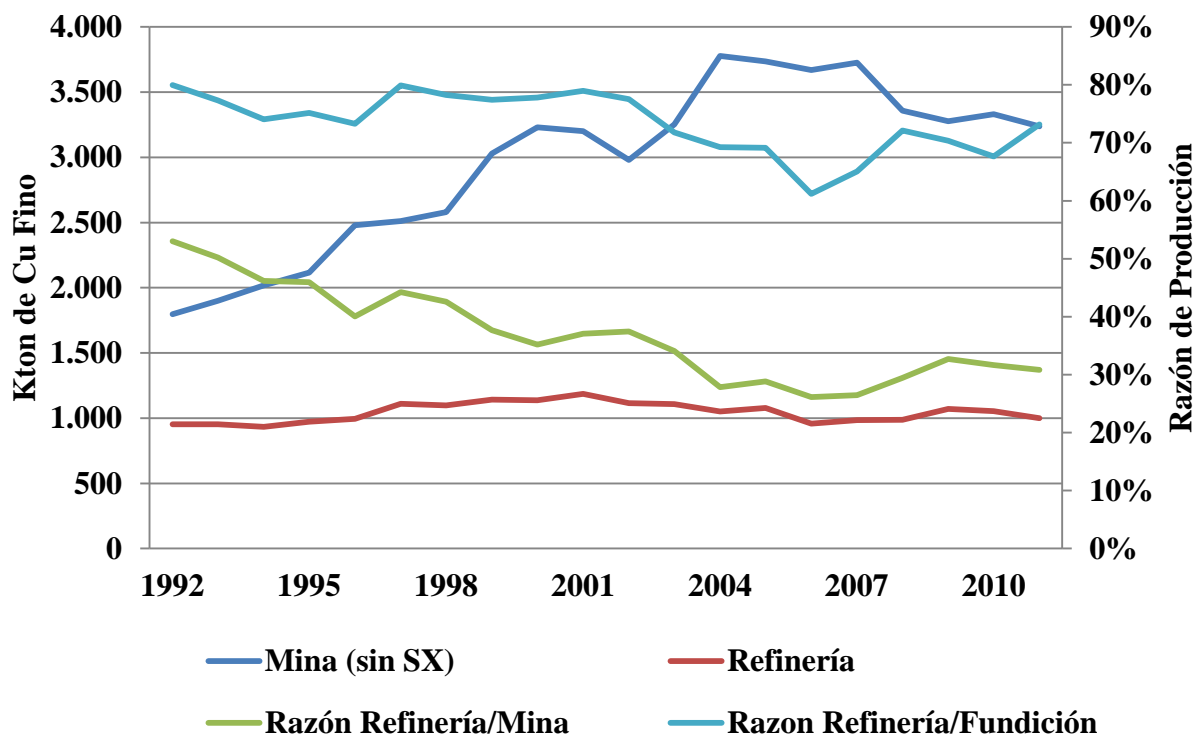
- a. El Telurio es considerado ampliamente un elemento estratégico para el desarrollo de tecnologías energéticas, en particular la tecnología fotovoltaica de alta eficiencia (hecho explicado en detalle en los capítulos anteriores de esta investigación y respaldado con informes de diversos países de occidente).
- b. La principal fuente de Telurio (más del 90%) proviene de la refinación electrolítica de cátodos de Cobre, es decir de barros anódicos (Audion & Labbé, 2010).

Ocurre entonces que más allá del valor contenido de Telurio en los barros anódicos, este recurso metalúrgico representa la mayor fuente de Telurio en el mundo y por ende Chile, como principal productor de Cobre del mundo y como el segundo país con mayor capacidad de refinación electrolítica de Cobre del mundo (International Copper Study Group, 2013), puede jugar un rol preponderante en este mercado. Si a esto se le agrega además que en los últimos años a nivel mundial la hidrometalurgia -como método de obtención de Cobre- ha ido aumentando respecto del total de Cobre producido, se tiene que el carácter estratégico de aquellos países que produzcan Cobre mediante el método de fundición-refinación será cada vez mayor.

Finalmente, respecto del potencial que tiene Chile como productor de barro anódico se puede medir estimando la cantidad de barros anódicos que se dejan de producir en el país producto de la transacción de concentrado, ánodos de Cobre y RAF (Cobre refinado a fuego).

Para desarrollar esta medición es necesario identificar tres fuentes de “pérdida” de barros anódicos asociados a la comercialización de productos intermedios en la cadena de valor: concentrado de Cobre, ánodos de Cobre y por último Cobre refinado a fuego. Para cuantificar las pérdidas asociadas a la no electro-refinación de ánodos de Cobre y RAF basta con comparar la cantidad de Cobre refinada versus la fundida. Por su parte el recurso no aprovechado en la exportación de concentrado de Cobre se obtiene al comparar la participación del Cobre electrolítico respecto del total de Cobre producido en Chile desde la mina descontado lo producido mediante hidrometalurgia (LIX-SX-EO) puesto que este Cobre no debiese ser sometido a refinación.

En el siguiente gráfico queda expuesto cómo en Chile la refinación electrolítica de Cobre, a partir de ánodos, ha tendido a disminuir si se compara con el total de Cobre producido en la mina (descontado el Cobre obtenido por SX). Esto se explica, al igual que para la disminución de la fundición vista en la sección anterior, producto del aumento que ha tenido en Chile la producción de Cobre como concentrado. Una vez más queda en evidencia que Chile no logró prever que el aumento sostenido de su producción de Cobre no sería acompañado por su capacidad de refinación.



**Gráfico 4.2.3-1 Producción en Chile de Cobre Mina y Refinería**

Elaboración propia. Fuente: Cochilco

Por su parte, la razón de la cantidad de Cobre refinado versus el Cobre de fundición también ha tendido a la baja. Hace veinte años atrás más del 75% del Cobre fundido era refinado en Chile y hoy en día este valor no supera el 68%. Históricamente la disparidad entre fundición y refinería se debe a que de las siete fundiciones existentes sólo tres poseen refinería. A su vez la baja en la última década se debe a la expansión de la capacidad productiva de la fundición Altonorte, de esta forma aumentó la capacidad de fundición de Chile pero no la de refinería.

Desde un punto de vista más cuantitativo Chile entre los años 1992 y 2011 produjo un total de 28.5 Mton de Cobre fino en productos posteriores a fundición, ánodos y RAF. En ese mismo periodo la producción electrolítica de Cobre alcanzó los 20.8 Mton de cátodos de Cobre, por lo que un total de 7.2 Mton de Cobre fino fundido en Chile no fue refinado. Esto se traduce en que Chile dejó de producir alrededor de 10.8 Kton de barras anódicas si se considera un factor de 1.5 Kg de barro anódico por tonelada de cátodo de Cobre producida y que el proceso de refinación alcanza una recuperación del 100% del barro anódico.

Por su parte, realizando el mismo análisis pero esta vez respecto de todo el Cobre producido en Chile, se tiene que durante ese periodo de tiempo a nivel país se produjo un total de 52.7 Mton de Cobre fino sin contabilizar la producción mediante LIX-SX-EO de esta forma Chile dejó de producir 30.3 Mton de Cobre electrolítico.



Esta vez las pérdidas de producción de barro anódico superan las 45 Kton. Recordar que el valor contenido mínimo del barro anódico supera los 200 US\$/kg.

Queda en evidencia entonces que Chile posee un potencial importante como proveedor de barro anódico y por ende de Telurio. Esta relevancia a nivel mundial no ha sido del todo desarrollada puesto que Chile no ha buscado avanzar en la cadena de valor de los barros anódicos y tampoco ha desarrollado nueva capacidad productiva para evitar la pérdida de este recurso mediante la comercialización de productos intermedios de Cobre como son los ánodos y el concentrado de Cobre. Claramente este recurso será estudiado desde el punto de vista económico, industrial y estratégico tomando una visión de carácter pública de forma tal se pueda sugerir una estrategia pertinente al respecto.

#### **4.2.4 Ripios de lixiviación**

En términos generales la obtención de Cobre mediante la lixiviación de minerales tiene por objetivo principal lograr recuperar el Cobre presente en minerales oxidados que generalmente se encuentran en la zona oxidada propia de los yacimientos de tipo pórfido cuprífero. Además de esta aplicación, en la actualidad la bio-lixiviación se ha utilizado como método de lixiviación de minerales supérgenos de sulfuros de Cobre, puesto que gracias a la presencia de bacterias se logra mantener el potencial Redox necesario para la disolución anódica del Azufre lo que permite la posterior disolución del Cobre (Vargas, 2003).

En el capítulo de anexos se adjunta un análisis en detalle de este recurso, mientras que en esta sección se exponen únicamente los resultados y supuestos más relevantes. De los 2.03 Mton de cátodos de Cobre mediante SX que fueron producidos en Chile se sabe que 94.7 Kton provienen de yacimientos tipo IOCG. Luego para el caso de la producción no desglosada por Cochilco, que representa cerca de un 7% del total, no se logra conocer el origen geológico del metal. Dado que esta producción titulada como “otros” por la Comisión Chilena de Cobre representa un total 383.7 Kton de Cobre fino se tiene que la producción de cátodos mediante el método de extracción por solvente varía entre 1,915 Kton de Cobre fino (en el caso de que “otros” corresponda en su totalidad a yacimientos de tipo pórfido cuprífero) y 1,646 Kton de Cobre fino (en el caso de que “otros” corresponda en su totalidad a yacimientos distintos a los pórfidos cupríferos) (COCHILCO, 2012).

Bajo el supuesto conservador de que el valor corresponde a 1,646 Kton de cátodos de Cobre, considerando además que la ley media de los minerales es de 1% se tiene que si la recuperación de Cobre global del proceso es de un 80% (lixiviación, SX y depositación), entonces el año 2011 Chile lixivió un total de 205 Mton de minerales oxidados de Cobre.

Luego, dada una pérdida de la masa del mineral de 5% producto de la lixiviación, se tiene que durante ese año en Chile se produjo cerca de 196 Mton de rípios de lixiviación. Es evidente que este valor puede cambiar considerablemente si se modifican los supuestos, dentro de los más relevantes son la ley media de estos minerales y la fracción de Cobre que proviene de yacimientos tipo pórfido cuprífero.

Por otro lado, desde el punto de vista metalúrgico, el proceso de extracción por solvente no conlleva una modificación importante en la estructura mineralógica general de la alimentación a la planta.

Al contrario de lo que ocurre con la flotación y fundición (donde existe molienda y un proceso pirometalúrgico), en el proceso de LIX-SX-EO sólo ocurre una disolución de aquellos elementos más solubles como son Cobre, y Hierro (ENAMI, 2010) por lo que el mineral original no debiese cambiar en forma importante su composición ni tampoco su estructura mineralógica de tal forma que elementos trazas que eventualmente estuviesen presentes en la zona oxidada del yacimiento sufrieran un proceso de concentración o algo similar. En otras palabras, si el mineral original no correspondía a un yacimiento interesante desde la perspectiva de los Elementos Críticos Energéticos, el proceso sufrido en la lixiviación no va a cambiar esta realidad desde el punto de vista metalúrgico como sí ocurre en el proceso de los sulfuros de Cobre donde en los barros anódicos se obtienen interesantes concentraciones de Telurio.

A partir de la discusión generada en los párrafos anteriores se concluye que el potencial de este recurso es interesante desde el punto de vista del volumen (más de 180 Mton de rípios fueron producidas en Chile el año 2011), sin embargo dado el tipo de minerales que se tratan y el proceso en sí que estos minerales sufren se descarta que los rípios de lixiviación puedan ser fuente de elementos críticos estratégicos.

### 4.3 Óxidos de Hierro, Cobre y Oro

Este tipo de depósito representa, junto con los de tipo Fierro Apatito, lo más interesante desde el punto de vista de las Tierras Raras en Chile. Como fue visto en el capítulo anterior se tiene que este tipo de yacimientos poseen -en su modelo teórico- minerales compuestos por estos elementos. En su momento se determinó que el valor contenido de la roca asociado a la presencia de Tierras Raras no representaba un gran interés, entre 5 y 10 US\$/ton de mineral, sin embargo esto puede cambiar considerablemente si se considera los recursos metalúrgicos asociados al procesamiento del mineral con el objetivo de la recuperación de Cobre. Este cambio puede deberse a un aumento en la ley de Tierras Raras en los relaves de la operación (si se supone que no existe una concentración de estos elementos en el concentrado de Cobre) o también al hecho de que existe un ahorro no menor asociado al hecho de que el eventual recurso ya se encuentra preparado mecánicamente (molienda) y por lo tanto esta etapa no sería necesaria en el caso de evaluar un futuro proyecto.

De esta forma se vuelve interesante determinar el comportamiento de las Tierras Raras en los procesos de flotación y concentración de Cobre y en el de lixiviación, extracción por solvente y electroobtención. ¿Se concentrarán estos elementos juntos con el Cobre o se concentrarán en el relave del proceso? O tal vez, simplemente no hay separación selectiva, esto es que la ley no varía en ninguno de los productos obtenidos. En este punto del trabajo se tratará de cuantificar la producción de relaves y rípios de lixiviación asociada a este tipo de yacimientos y determinar si éstos representan un recurso atractivo desde el punto de vista de los elementos críticos energéticos.

Es importante comprender que desde el punto de vista productivo, el proceso de obtención de Cobre a partir de yacimientos tipo IOCG es bastante similar al proceso para casos del tipo pórfido cuprífero. Existen dos grandes líneas de producción, la de óxidos de Cobre (como es el ejemplo de Manto Verde) y la de sulfuros de Cobre (cómo es la operación del yacimiento Candelaria en Tierra Amarilla). Así los productos obtenidos son también equivalentes, del proceso de lixiviación de óxidos se obtiene principalmente rípios y cátodos (LIX-SX-EO), mientras que de la flotación de sulfuros se obtiene relave y concentrado de Cobre. Si este concentrado es fundido entonces es posible obtener escoria de fundición y barro anódico en el caso de que el producto sea llevado a cátodo de alta pureza (electro-refinación). Sin embargo, y como se verá más adelante, la producción de escorias y barro anódico serán descartados de la discusión por dos razones principales, la primera es que la principal operación de IOCG que procesa sulfuros de Cobre es Candelaria (Manto Verde procesa óxidos de Cobre únicamente) y esta compañía exporta la totalidad de su producción como concentrado de Cobre y por ende no se obtienen escorias ni barro anódico asociado a este mineral. A pesar de esto, existen pequeñas y medianas operaciones mineras que sí explotan este tipo de yacimiento y su producción es comercializada a ENAMI y por ende eventualmente podría ser fundida y electro-refinada en Chile.

Sin embargo ocurre que desde el punto de vista piro-metalúrgico no se hace distinción si el concentrado original proviene de un yacimiento tipo IOCG o pórfido cuprífero y por lo tanto no es posible hacer una distinción entre las escorias y barros obtenidos por la fundición de un recurso tipo IOCG o porfídico.

Considerando esto se optó por asociar estos recursos a los yacimientos de tipo pórfido cuprífero puesto que representan una parte muchísimo mayor de la producción nacional de Cobre si se compara con los yacimientos IOCG.

Antes de continuar es importante nombrar que la única eventual diferencia del proceso productivo entre IOCG y pórfidos cupríferos puede darse en aquellos casos donde la presencia de Fierro en el mineral IOCG es incorporada en el proceso. Algunas operaciones pequeñas, generalmente de óxidos de Cobre, someten al mineral conminuido a una concentración magnética de mediana intensidad con el objetivo de remover el Fierro y así poder elevar la ley de Cobre contenida en el proceso aguas abajo. Otras veces se ha logrado recuperar el Fierro de los relaves de flotación de minerales provenientes de yacimientos IOCG, ejemplo de esto es el acuerdo alcanzado entre Compañía Minera del Pacífico (CAP) y el ya mencionado yacimiento Candelaria donde este último le comercializó a CAP sus relaves para recuperar el Fierro contenido en el recurso (CAP, 2011).

Desde el punto de vista productivo de los yacimientos IOCG en Chile se tiene que actualmente existen sólo dos operaciones de la gran minería asociadas a estos yacimientos: Compañía Minera Candelaria y Manto Verde perteneciente a Anglo American Chile. La primera procesa sulfuros de Cobre y como producto final obtiene concentrado de Cobre que lo comercializa en Asia con créditos producto del Oro y Plata contenidos en el concentrado (FCX, 2013).

A su vez, Manto Verde procesa óxidos de Cobre a través del método de lixiviación y extracción por solvente por lo que su comercialización se basa en cátodos de Cobre de alta pureza (Anglo American Chile, 2012). Si bien existen pequeñas y medianas faenas mineras que extraen su mineral de este tipo de yacimiento, no existe un catastro en detalle de estas operaciones por lo que el trabajo se ve limitado a las operaciones anteriormente nombradas.

Volver a destacar que si bien en las estadísticas de producción de Cochilco existe un ítem denominado “otros” que representa cerca del 7% de la producción nacional de Cobre, no es posible hacer seguimiento de las operaciones responsables de esa producción, por lo que en este capítulo se remitirá a trabajar en base a estas dos operaciones y se buscará determinar la existencia de relaves y ripios asociados a operaciones anteriores que sean representativas y que, dado la envergadura que en su momento tuvieron, se conozca información al respecto.

### 4.3.1 Relave

Cómo fue explicado anteriormente, el proceso de obtención de relave para yacimientos de tipo IOCG es equivalente al realizado en las operaciones de pórfidos cupríferos por lo que no se volverá a explicar y diagramar el proceso en cuestión.

En el capítulo de anexos se encuentra en detalle el análisis de esta sección, mientras que en este capítulo se presentan los resultados más relevantes. Así, de las tres faenas identificadas (Candelaria, P. Aguirre Cerda y Matta) y tomando los mismos supuestos considerados en la Tabla 4.3.1-1, se tiene que durante el año 2011 y bajo los supuestos antes comentados en Chile se produjo 16 Mton de relave proveniente de yacimientos de tipo IOCG.

**Tabla 4.3.1-1 Producción Relave IOCG año 2011**

	Cobre Alimentado [Kton]	Relave producido [Kton]
Candelaria	148.4	18,080
Pedro A. Cerda	7.42	905
Planta Matta	12	1,460
Total	167.82	20,445

Elaboración propia. Fuente: CCMC, ENAMI y Freeport McMorran

Corresponde entonces determinar la calidad de este recurso, cuyo origen geológico lo hace interesante como fuente de Tierras Raras. Desde el punto de vista experimental se tiene que el año 1997 la Compañía Contractual Minera Candelaria (CCMC) ingreso una declaración de impacto ambiental puesto que buscaba reubicar los relaves de la Compañía Ojos del Salado en el tranque de la compañía Candelaria (CCMC, 1997). Para ese entonces la compañía presento la composición media de ambos relaves, en cuyo análisis se consideraron los óxidos mayores (Al, Fe, Mg y Si) además de elementos traza como Oro, Plata y Telurio.

Los resultados presentados en la declaración son los siguientes:

**Tabla 4.3.1-2 Composición media Relave Ojos del Salado y Candelaria**

Elemento	Unidad	Ojos del Salado	Candelaria
Ag	g/t	1	1.6
Au	g/t	0.14	0.1
Fe	%	16.7	22.7
Te	%	<0.0002	<0.0002

Elaboración propia. Fuente: CCMC

De los resultados anteriores se puede deducir que no existe un potencial interesante en los relaves generados por estas faenas. Esta aseveración es válida por lo menos en el caso del Telurio. La interrogante que se genera es si elementos como las Tierras Raras no fueron medidos o los resultados obtenidos fueron tan bajos que no era necesario reportarlos. Dado que esto no queda claro en el documento de la declaración ambiental y tampoco ha sido publicado por otros autores que han estudiado estos relaves (Dold & Fontbote, 2002) no es posible realizar una aseveración al respecto. Sin embargo, cómo fue publicado en el capítulo de recursos geológicos, el distrito punta del cobre posee variadas leyes de Tierras Raras y dependen fuertemente de la zona de alteración y el yacimiento en el que se mide.

En particular se tiene que para el yacimiento de Candelaria las Tierras Raras que son consideradas Elementos Críticos Energéticos suman un total que varía entre 40 y 60 g/t, destacando principalmente el Itrio y el Neodimio. Luego, si se realiza el restrictivo supuesto de que todas estas Tierras Raras quedan concentradas en el relave, entonces dado que la recuperación en peso de la flotación de Cobre no supera un 4% se puede estimar que las leyes de estos elementos no subirían más de un 5%. A su vez si tenemos que el total de Tierras Raras en cuestión se concentran junto con el Cobre, entonces su ley en el concentrado debiese aumentar cómo máximo a 1,500 g/t. Claramente el primer caso deja el relave del proceso prácticamente en la misma concentración que la roca original, sin embargo los costos asociados a la preparación mecánica del recurso ya están pagados.

Por su parte, de ser cierta la segunda situación hipotética, esto se contradiría con la composición del concentrado de Cobre que reporta la compañía.

En el año 2010, la empresa solicitó un estudio de monitoreo marino costero de la bahía de Caldera, en el documento se reporta la composición media del concentrado de Cobre que ellos cargan en esa bahía y no se reporta la concentración de las TTRR (CCMC, 2010). La información se presenta en detalle para cada año, desde 1995 hasta 2009. En el reporte se consideran tanto las leyes de los elementos principales (Fe y Cu) cómo también elementos menores cuyas concentraciones no superan los 100 g/t (Cd, Hg y Mo entre otros) esto puede interpretarse de que la leyes de Tierras Raras en su concentrado de Cobre no representa un valor relevante. De esta forma la segunda alternativa de concentración se vuelve improbable. Como es de esperar la situación real del proceso de concentración de Cobre es que las Tierras Raras se distribuyan tanto en el concentrado como en el relave, sin embargo dado el argumento anterior es el relave el que más cantidad de Tierras Raras abarca.

De esta forma se tiene que los relavas de flotación de Cobre a partir de yacimientos de tipo IOCG no presentan concentraciones interesantes de Tierras Raras y tampoco de Telurio.

### 4.3.2 Escoria y barro anódico

La obtención de escoria y barro anódico en los procesos de fundición y refinación de Cobre proveniente de yacimientos IOCG es equivalente a lo obtenido en el procesamiento de Cobre proveniente de pórfidos cupríferos. Esto se debe a que en términos concretos ambos concentrados de Cobre son similares (misma ley de Cobre) y por lo tanto de existir una diferencia en cómo procesar estas materias se tratara básicamente de distintas cantidades de fundente u otra variable operacional del estilo, sin embargo el proceso en sí corresponde al mismo.

De esta forma, de la fundición de un concentrado de Cobre proveniente de un yacimiento IOCG se obtendrá una escoria fundamentalmente similar a la obtenida al fundir un mineral de origen porfídico, sin embargo dada las diferencias en elementos menores entre ambos yacimientos es de esperar que la composición entre ambas escorias difiera en sus constituyentes menores, como podría ser las Tierras Raras u otro elemento similar. Esto mismo ocurre para los barros anódicos donde la composición de éstos está dada por la composición de los ánodos y por ende los elementos traza presentes en el ánodo dependerán de los elementos menores que puedan existir en el concentrado.

Sin embargo, la realidad operacional es bastante distinta puesto que en la fundición no existe una diferenciación por el origen del concentrado, si no que la razón de Fierro-sílice, la concentración de Arsénico y otros elementos menores presentes en el Concentrado son los que definen las variables operacionales del proceso con el objetivo de obtener ánodos de la calidad deseada.

Luego la variabilidad composicional de los barros anódicos y de las escorias de fundición ocultan la variabilidad geológica del Cobre procesado por lo que no es posible asegurar que la fundición de Cobre de un tipo de yacimiento produce un cierto tipo de escoria, ni tampoco la refinación de un tipo de ánodo produce un cierto tipo de barro anódico.

Si a este hecho se le agrega además que la principal operación de sulfuros de Cobre proveniente de un yacimiento IOCG es Compañía Contractual Minera Candelaria, la cual exporta la totalidad de su Cobre como concentrado se tiene entonces que en Chile la principal fuente de Cobre fundido proviene de yacimientos porfídicos por lo que es razonable asociar las actuales producciones de escoria y barros anódicos a este tipo de yacimiento. Siendo de esta forma que no existe recursos metalúrgicos de tipo escoria o barro anódico relacionados con los yacimientos de tipo IOCG.

### 4.3.3 Ripios

La obtención de Cobre a partir de la lixiviación de minerales oxidados o sulfurados cuyo origen son de tipo IOCG es, desde el punto de vista metalúrgico, equivalente a lo que ocurre con minerales proveniente de pórfidos cupríferos. El proceso consiste en la disolución del Cobre en un medio ácido mediante la irrigación de ácido sulfúrico en el mineral chancado. Dado esto los tipos de productos obtenidos en el proceso son los mismos: ripios de lixiviación, cátodos de electro obtención, impurezas obtenidas en la piscina de depositación y los descartes provenientes de la limpieza de la fase acuosa del proceso.

Desde el una perspectiva operacional se tiene que la división Manto Verde, perteneciente a Anglo American, es la única faena que a partir de un yacimiento IOCG produce una cantidad importante de Cobre (más de 60 Kton de cátodos al año) mediante la lixiviación y posterior extracción por solvente. En este sentido lograr estimar la producción nacional de ripios de lixiviación a partir de este tipo de yacimiento es prácticamente imposible. Ocurre que existen varias faenas mineras, como Carmen Bajo en las cercanías de Copiapó, que comercializan ya sea sus minerales de óxidos de Cobre o el electrolito obtenidos después de la lixiviación y por lo tanto se vuelve imposible distinguir si el origen de este recurso es porfídico o de tipo IOCG. Una aproximación bastante general sería hacer ciertos supuestos respecto de la planta de lixiviación y SX que ENAMI posee en su planta de beneficio Manuel Antonio Matta, ubicada en Copiapó, Tercera Región de Atacama. De acuerdo a la información publicada por ENAMI la planta de SX y cátodos posee una capacidad de 7,200 toneladas de cátodo de Cobre al año, lo que representa cerca de un 12% de la producción de Manto Verde.

Desde la perspectiva de la calidad de estos recursos se conoce que el yacimiento Manto Verde posee, como elementos asociados, a algunas Tierras Raras livianas (Sillitoe R. H., 2003) y (Vila, Lindsay, & Zamora , 1999). Sin embargo estos elementos parecieran no hacerse presente en la zona oxidada del yacimiento (Lindsay, 1994) puesto que en esta zona no se identifican minerales que puedan asociarse a estos elementos. Lo que eventualmente ocurre, y que tendría bastante sentido geológico, es que sea la zona de sulfuros del yacimiento la que posee una anomalía de estos elementos. En ese caso y dado que la operación de Manto Verde consiste, hasta el momento por lo menos, en la extracción de óxidos mediante la lixiviación de Cobre (Anglo American Chile, 2012) entonces no es de esperarse un ripio que posea interesantes concentraciones de Tierras Raras livianas. En otras palabras, de existir un potencial de Tierras Raras en el yacimiento Manto Verde, este potencial es aún geológico puesto que la zona de un eventual enriquecimiento de estos elementos aún no ha sido sometida a algún proceso metalúrgico para la recuperación de Cobre.

De esta forma se tiene que no es de esperarse que los ripios obtenidos en la lixiviación de minerales oxidados de Cobre provenientes de yacimientos tipo IOCG sean una fuente interesante de Elementos Críticos Energéticos.



#### 4.4 Hierro Apatito

Las operaciones de yacimientos de Hierro en Chile son representadas principalmente por el grupo Compañía Minera del Pacífico (CMP) perteneciente al conglomerado Compañía Aceros del Pacífico (CAP) por lo que la sección de Hierro apatito de este capítulo se basará en las faenas que esta empresa posee y los procesos productivos a analizar serán en base a lo que la compañía realiza. Destacar que se pueden obtener diversos productos a partir del procesamiento de los minerales de Hierro, sin embargo serán los de CMP los considerados para este análisis.

El proceso productivo al cuál se somete el mineral de Hierro dependerá de tres variables críticas: ley de Hierro, nivel de impurezas como Azufre, Sílice y Fósforo y finalmente de la granulometría que el mineral va adquiriendo a lo largo del proceso.

Como todo proceso minero, la primera etapa es la extracción del mineral del yacimiento. Luego este mineral es chancado y sometido a una concentración magnética, de donde se obtienen cuatro productos principales:

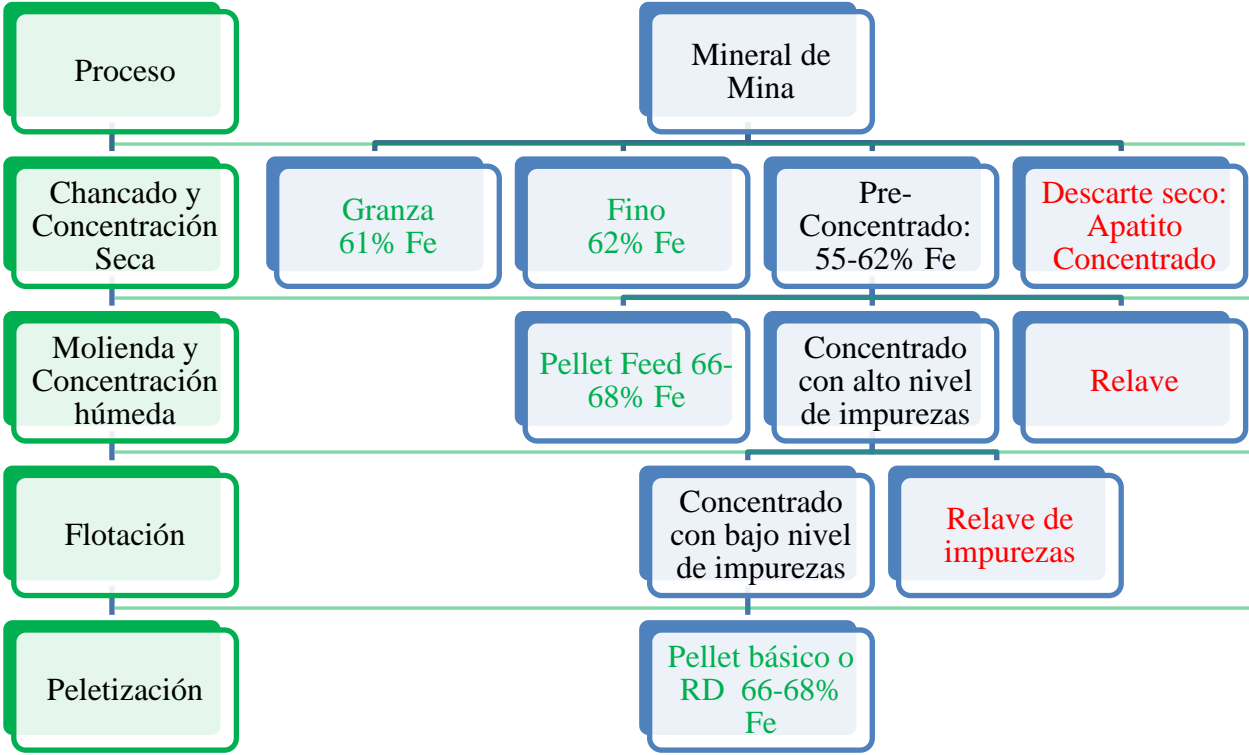
- a. Granzas: posee un 61% de Fe y su tamaño varía entre 10 y 30 milímetros. No presenta un nivel importante de impurezas
- b. Fino: posee un 62% de Fe y su tamaño varía entre 50 micrones y 10 milímetros. No presenta un nivel importante de impurezas.
- c. Pre-concentrado: posee una ley variable de Hierro entre 55 y 62% y un nivel de impurezas tal que aún no es un producto comercializable. Este producto es sometido a un segundo proceso aguas abajo (molienda, concentración y peletización).
- d. Descarte: se acopia en botadero.

En algunas ocasiones el producto fino es aglomerado para obtener “SinterFeed”. La distribución de la producción de cada uno de estos productos dependerá principalmente del mineral y en segunda instancia del procesamiento al cuál es sometido.

Bajo el caso de que se obtiene un pre-concentrado (que es la realidad para el caso de las faenas de CAP) este producto debe ser sometido a un proceso húmedo con el objetivo de elevar el contenido de Hierro en el producto y también en algunos casos de disminuir el nivel de impurezas de éste. Así el pre-concentrado es sometido a una molienda en húmedo y una posterior concentración magnética proceso del cual se obtiene un producto denominado “Pellet Feed”, el cual posee una ley de Hierro que varía entre 66 y 68%. Si este producto no presenta un nivel elevado de impurezas entonces es comercializable, sin embargo si el nivel de impurezas es elevado entonces el producto es sometido a un proceso flotación y peletización. La flotación busca eliminar las impurezas presentes y luego la peletización consiste en aglomerar los finos de Hierro para formar “Pellet” que alimentarán el proceso piro-metalúrgico de producción de Acero. En algunos casos, el proceso de peletización adhiere un compuesto alcalino en el “Pellet” en cuyo caso el producto se denomina básico o auto-fundente.

El producto de descarte del proceso en húmedo es un relave compuesto por el rechazo de la concentración magnética en húmedo (proceso “Pellet Feed”) o una mezcla entre este rechazo y lo obtenido como descarte del proceso de flotación (proceso “Pellet”).

En el siguiente diagrama se expone el proceso anteriormente discutido



**Diagrama 4.4-1 Proceso productivo del Hierro**

Elaboración propia. Fuente: CAP

En la ilustración anterior están en color verde aquellos productos finales que son comercializados como insumo para la industria siderúrgica. Por otro lado en color rojo están aquellos descartes que, desde el punto de vista de los Elementos Críticos Energéticos, se busca determinar si representan un recurso interesante en relación a su volumen y calidad.

Antes de dimensionar los diferentes recursos es necesario hacer un análisis respecto de la industria del Hierro en Chile y cómo son determinadas sus diversas estadísticas. Ocurre que existe una gran diferencia entre la industria del Hierro y del Cobre puesto que los productos comercializables de este último son estándares y además dada la relevancia del Cobre en la economía existe un seguimiento a la producción muchísimo más exhaustivo comparado a la minería del Hierro.

En ese sentido se contrastarán diversas fuentes de información respecto de la producción de Hierro en Chile (identificándose discrepancias) y luego se realizarán supuestos operacionales respecto de la distribución másica de cada uno de los ítems expuestos en el diagrama anterior. Finalmente con estos valores y supuestos se dimensionaran los recursos.

Desde el punto de vista productivo se tiene que en Chile el principal actor es la CMP, por lo que el reporte de producción que ellos entreguen es una fuente sumamente relevante en la cuantificación de la industria del Hierro en Chile. A esta información se le suma también lo expuesto por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) y por Cochilco respecto de la producción de este elemento, sin embargo cada una de estas entidades entrega un reporte con perspectivas distintas, así CMP publica la producción total cómo la suma de las cantidades producidas de cada uno de sus productos (granzas, finos, pellet feed y pellet), sin especificar la cantidad de Hierro contenido en cada uno de estos productos. Por su parte el SERNAGEOMIN entrega la cantidad de Hierro fino producida en Chile, mientras que Cochilco presenta valores donde no se especifica si corresponde a Hierro fino o a productos de Hierro sin embargo dado que estos últimos valores son bastante similares a lo reportado por CMP se entiende que la comisión informa las toneladas de producto de Fierro.

En la siguiente tabla queda expuesta la información reportada por estas tres entidades para los últimos diez años de la industria del Hierro en Chile

**Tabla 4.4-1 Producción de Hierro Reportada**

<b>Año</b>	<b>2002</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>
<b>SERNAGEOMIN [Mton Fe]</b>	4.4	4.9	4.8	4.7	5.2	5.4	5.7	5.0	5.9	7.7
<b>Cochilco [no específica]</b>	7.3	8.0	8.0	7.9	8.6	8.8	9.3	8.2	9.1	12.6
<b>CMP [Mton de Productos]</b>	6.4	7.2	7.4	7.2	7.7	7.9	8.4	8.5	10.5	12.0
<b>Ley Fe en Productos 1 [%]</b>	60%	61%	61%	60%	61%	61%	61%	61%	64%	61%
<b>Participación CMP [%]</b>	88%	90%	93%	92%	90%	89%	90%	104%	115%	95%

Elaboración propia. Fuente: CMP, SERNAGEOMIN y Cochilco

De la información expuesta en la tabla anterior se puede inferir que la información entregada por Cochilco se refiere a las toneladas de productos de Hierro, ya sea granza, fino, pellet feed o pellet que fueron producidas en el país, esto debido a la similitud de los valores entregados por CMP para cada uno de los años en cuestión. Sin embargo ocurre que durante los años 2009 y 2010 sólo la producción de CMP es superior a lo que Cochilco estimo como producción país. Si bien las diferencias son pequeñas, esto acusa un error metodológico importante. Ahora bien, se estimó la ley de Fe en los productos obtenidos según Cochilco (Ley Fe en Productos 1) en base a los finos de Hierro producidos en Chile (SERNAGEOMIN).

Dado los resultados arrojados se tiene que la ley del producto oscila entre 60 y 61% (excepto año 2010), sin embargo esta es la mínima ley de un producto de Hierro comercializable por lo que se desprende que la información entregada por el Servicio no se refiere al Hierro extraído de la mina sino más bien al Hierro contenido en cada uno de los productos obtenidos de lo contrario habría que asumir que la recuperación de Fe es perfecta en todo el proceso metalúrgico lo que evidentemente no es posible.

Finalmente respecto de los años 2009 y 2010 existe una discrepancia entre Cochilco y CMP, en particular para el año 2010 la diferencia es 1.4 Mton de producto. Luego si se observa que para ese mismo año la ley de Fe en productos aumentó sorpresivamente a 64% (es el único año donde la ley supera el 61%) se pueden dar dos casos, que el Servicio se haya equivocado o simplemente que Cochilco subestimó la producción forzando a un aumento en la ley y una discrepancia con los datos entregados por CMP.

De esta forma se decide que los datos de producción a considerar confiables serán los emitidos por CMP y que se estimará una participación de esta empresa equivalente al 90% del total de la industria del Hierro en Chile. Así se podrá estimar la producción nacional de productos de Hierro y junto con los datos de SERNAGEOMIN se podrá determinar la ley media de Hierro de estos productos.

En la siguiente tabla se expone la producción de los años 2011 y 2010 de CMP en función de cada uno de los productos obtenidos

**Tabla 4.4-2 Producción CMP desagregada**

<b>Ítem [Kton]</b>	<b>2011</b>	<b>2010</b>
<b>Total</b>	<b>11,995</b>	<b>10,495</b>
<b>Valle del Huasco</b>	<b>6,708</b>	<b>6,404</b>
Planta de Pellets	5,547	5,666
Pellet Autofundente	2,335	2,622
Pellet Reducción Directa HyL	649	1,046
Pellet Feed	2,304	1,723
Pellet Chips	259	275
Distrito Algarrobo	622	559
Granzas Algarrobo	485	459
Granzas Cristales	137	100
Los Colorados	539	179
SinterFeed	539	179
<b>Valle del Elqui</b>	<b>3,602</b>	<b>2,161</b>
Granzas	920	402
Finos	830	67
Pellet Feed	1,852	1,692
<b>Hierro Atacama</b>	<b>1,685</b>	<b>1,930</b>

Elaboración propia. Fuente: CMP

Una vez determinadas las fuentes que serán utilizadas para la estimación de la producción de Hierro en Chile es necesario conocer la cantidad de productos que se obtienen en seco (granzas, finos) y aquellos productos que se obtienen en húmedo (pellet feed y pellet). Así se podrá estimar la cantidad de descarte en seco y en húmedo producido en Chile. Para esto se considerará la producción que CMP reporte de cada uno de sus productos (tabla 4.4-2) y posteriormente se supondrá que el 10% restante de producción será mediante una concentración en seco, esto basado en el hecho de que sólo CMP posee plantas de peletización en Chile.

A partir de la tabla anterior se puede determinar la cantidad de productos de Hierro obtenidos a partir de un proceso seco (granza, fino y SinterFeed) y de un proceso húmedo (Pellet Feed y Pellet).

Destacar que la producción asociada al proyecto Hierro Atacama corresponde al procesamiento de los relaves de Candelaria (CCMC) por lo que su origen geológico de tipo IOCG obliga a descartar esta producción dentro de la estadística de Hierro a partir de yacimientos de Hierro-Apatito

En la siguiente tabla quedan resumidas las participaciones de los diversos productos de CMP

**Tabla 4.4-3 Participación por producto CMP**

<b>Proceso</b>	<b>Producto [Kton]</b>	<b>2011</b>	<b>2010</b>	<b>Promedio</b>
<b>En seco</b>	Granza	1,542	961	1,252
	Fino	830	67	449
	SinterFeed	539	179	359
	<b>Total seco</b>	<b>2,911</b>	<b>1,207</b>	<b>2,059</b>
<b>En húmedo</b>	Pellet Feed	4,156	3,415	3,786
	Pellet Autofundente	2,335	2,622	2,479
	Pellet Reducción Directa HyL	649	1,046	848
	Pellet Chips	259	275	267
	<b>Total húmedo</b>	<b>7,399</b>	<b>7,358</b>	<b>7,379</b>
<b>Global</b>	Participación en seco	28%	14%	22%
	Participación en húmedo	72%	86%	78%
	<b>Total</b>	<b>10,310</b>	<b>8,565</b>	<b>9,438</b>

Elaboración propia. Fuente: CMP

Se tiene entonces que del total de productos de Hierro obtenidos por CMP cerca del 78% corresponde a aquellos obtenidos mediante el proceso húmedo y solamente el 22% restante se obtiene de forma directa por el proceso seco. Tomando esta distribución promedio cómo lo que ha ocurrido en los últimos años y considerando algunas variables operacionales se podrá estimar la producción de descarte seco y húmedo que se obtuvo durante los años 2011 y 2010 y se podrá extrapolar ese valor a lo que ocurrió durante la última década.

Respecto de la calidad de estos recursos, entendida como el valor contenido en Elementos Críticos Energéticos, desde el punto de vista geológico es el mineral de Apatito el que está relacionado con la presencia de Tierras Raras, teniendo generalmente asociado una ley de 19% de óxidos de Tierras Raras, principalmente del grupo de las livianas (Brithis Geological Survey, 2011). Por otro lado se tiene que el Apatito no presenta propiedades magnéticas como la Magnetita o Hematita puesto que no presenta Hierro en su estructura molecular, de esta forma en el proceso de concentración del Hierro se tiene que el Apatito será de los primeros minerales en quedar descartado del proceso por lo que su presencia será muchísimo mayor en los descartes en seco y no debiese esperarse una concentración de éste en los relaves en húmedo.

Se procede entonces a determinar la cantidad de descartes producidos por esta faena y determinar la calidad de estos como fuente de Elementos Críticos Energéticos.

#### **4.4.1 Descarte seco**

Si se analiza la productividad de la zona del Huasco de CMP se tiene que la compañía posee dos operaciones mineras Los Colorados y Distrito Algarrobo (mina Algarrobo y Cristales) y una planta de Pellets. De esta forma todo el proceso en seco ocurre en las cercanías de cada faena minera mientras que el proceso en húmedo ocurre en la planta.

Durante el año 2011 la faena minera Los Colorados alimentó a planta un total de 10.6 Mton (CAP, 2011) de mineral con una ley media de Fierro de 46% (CAP, 2013). A partir de este mineral se produjo un total de 6.4 Mton de pre-concentrado para alimentar la planta de Pellets y 0.5 Mton de SinterFeed. Dado que no se obtuvo ningún otro producto a partir de ese mineral se tiene que el descarte seco producido alcanzó los 3.7 Mton durante el año 2011. De esta forma se tiene que la recuperación en peso del proceso en seco en la mina Los Colorados corresponde a 66%. Respecto a las operaciones de producción de granza que ocurren en el distrito Algarrobo no existe información disponible, sin embargo dada la baja producción que significa (menos del 10% de la producción de la zona del Huasco) se dejará fuera de la cuantificación.

Por su parte en la zona del Valle del Elqui, la faena de CMP corresponde a Minas El Romeral donde se incluye, aparte de la mina, un proceso de concentración en seco y una planta de Pellet Feed. De acuerdo a la capacidad nominal de diseño de la planta se tiene que ésta tiene una capacidad de procesar 7 Mton de mineral año con una producción de 4 Mton distribuidas entre tres productos posibles: granza, fino y pre-concentrado (CAP, 2012). Esto indica una recuperación en peso de 57% para la faena en cuestión.

A partir de estos resultados queda en evidencia que el comportamiento productivo del proceso dependerá fuertemente de los objetivos propuestos a producir, es decir la cantidad de granzas, finos y pre concentrados que se planifique obtener.

De esta forma se dificulta lograr estimar el comportamiento promedio de la última década cuando se conoce la distribución productiva de los últimos dos años solamente. A pesar de esto se puede indicar con propiedad que durante el año 2011 la CMP produjo un total de 6.1 Mton de descarte en seco si se considera los flujos reportados por la empresa para ese año. Para el año 2010 este valor fue un poco menor siendo aproximadamente 5.8 Mton. Si estos valores se comparan con el total de productos obtenidos para cada año, se tiene que el 2011 CMP produjo 12 Mton de producto y 6.1 Mton de descarte, este último equivale en peso al 51% de la producción. En el 2010 CMP produjo 10.5 Mton de producto y el descarte producido equivale al 55% de éste valor. De esta forma se puede estimar que en promedio por cada tonelada de producto obtenida por CMP se generan 530 kilogramos de descarte seco que terminara en un botadero.

Respecto de la composición de estos rechazos no es posible acceder a una información oficial de la empresa, por lo que sólo es posible llevar a cabo un supuesto respecto de los resultados obtenidos en los recursos geológicos para los yacimientos de Hierro Apatito. En el capítulo anterior se obtuvo que Cerro Carmen y Sierra Áspera eran los yacimientos representativos de la faja ferrífera costera. En particular se logró dimensionar el valor contenido para un recurso indicado en Cerro Carmen el cuál arrojó un valor cercano a los 35 US\$ por tonelada de mineral. Si se considera que en los yacimientos de CAP están presentes esas mismas leyes de Tierra Raras y que además todas éstas se concentran en su totalidad en los rechazos producidos en la concentración magnética del Hierro se podría estimar la ley de TTRR en los rechazos y el valor contenido de éstos.

En la siguiente tabla se exponen estos resultados bajo el supuesto de que la concentración magnética en seco posee una recuperación en peso de 65% y que además el 100% de las TTRR presentes en el mineral se concentraran en los rechazos.

**Tabla 4.4.1-1 Ley Tierras Raras en rechazos secos**

Elemento	Ley en rechazo seco [ppm]
Tb	9
Y	378
Nd	75
Eu	3
Dy	55
Valor Contenido [US\$/ton]	101

Es evidente que el supuesto aquí considerado es sumamente fuerte puesto que las leyes y concentraciones de TTRR en diversos yacimientos pueden variar en demasía, sin embargo dado la inexistencia de la información necesaria estos supuestos son obligatorios. Por último, de acuerdo al precio de Cobre considerado en este trabajo, 101 dólares de valor contenido son equivalentes a una ley de Cobre de 1.4%.

#### 4.4.2 Relave y relave de impurezas

El relave, como descarte, se obtiene a partir del proceso de molienda y flotación que sufre el mineral de Hierro para luego ser sometido a un proceso de peletización con el objetivo de obtener pellet feed o directamente un pellet. Este mineral puede ser obtenido directamente de la mina (cómo ocurre algunos años en el caso del Minas El Romeral) o puede ser un pre-concentrado obtenido posterior a una concentración magnética en seco (como ocurre en la planta de pellet del Huasco). Cualquiera que sea el caso, el proceso de peletización implica una generación de relave asociado a la remoción de descarte con el objetivo de elevar la ley y producir un producto comercializable. En algunos casos es necesario remover las impurezas puesto que sus leyes son elevadas, en ese caso se obtiene como desecho un relave de impurezas. Dado que este último relave es inferior en peso al relave convencional (ya que sólo proviene de la remoción de impurezas) entonces se enfocará el análisis en el relave convencional.

Para la zona del Huasco, particularmente la planta de Pellet, el mineral a peletizar corresponde a un pre-concentrado obtenido en la planta de Los Colorados. Dado que en este caso el proceso incorpora también la producción de Pellet (y no sólo pellet feed) es necesario comprender que en la obtención del Pellet existe un aumento de la masa puesto que se agregan aditivos al producto con el objetivo de cumplir normas de comercialización. Ejemplo concreto es la incorporación de una sustancia alcalina en el pellet auto-fundente. Este proceso generalmente produce un aumento entre un 2 y 5% del peso del concentrado que se obtiene posterior a la molienda y concentración en húmedo. En ese sentido para estimar la producción de relave de manera más precisa se considerará cómo alimentación el pre-concentrado que ingresa al proceso y como producto el concentrado que se obtiene y que posteriormente será sometido a peletización.

De acuerdo a la información reportada por CMP se tiene que el año 2010 se alimentó 6.6 Mton de pre-concentrado de Hierro obteniéndose 5.6 Mton de concentrado, el cual una vez sometido al proceso de peletización produjo un total de 5.7 Mton de diversos productos tipo pellet (Pellet Feed y Pellet). Para el periodo siguiente los valores fueron 6.3 Mton de pre-concentrado alimentado a la planta de Pellet obteniéndose cerca de 5.2 Mton de concentrado. De esto se desprende que en el proceso de molienda y concentración en húmedo que ocurre en la planta de Huasco, que consiste en una flotación inversa para remover impurezas, existe una recuperación en peso en torno a un 83% (lo no flotado), por lo que la producción sólida de relave (lo flotado) corresponde a un 17% del pre-concentrado alimentado a planta. Luego si se mide la producción de relave en función del peso de productos de pellet obtenido, entonces se tiene que la producción de relave corresponde a un 19% del peso obtenido cómo producto final.

De esta forma el año 2011 la planta de pellet de Huasco produjo 170 Kton secas de relave, mientras que en el año 2010 este valor fue cercano a las 160 Kton secas de relave. Destacar que en la actualidad estos relaves son depositados mediante un emisario bajo el mar en la costa ubicada en las cercanías de la planta.



Respecto de la planta de pellet feed existente en la zona del Valle del Elqui se tiene que su alimentación varía entre mineral extraído directamente de la mina y pre-concentrado obtenido en el proceso en seco. Se le agrega a esto además el hecho de que esta faena sólo produce pellet feed por lo tanto no existe un aumento de masa como ocurría en el caso anterior. Durante el año 2010 la planta de pellet feed fue alimentada por 2.9 Mton de una mezcla entre mineral de mina y pre-concentrado. A partir de esta alimentación se produjo un total de 1.7 Mton de Pellet Feed, lo que conduce a un recuperación en peso global del proceso cercana a un 59%.

Durante el año 2011 el proceso fue alimentado con 30 Kton menos respecto al año 2010, sin embargo produjo un poco más de 1.8 Mton, el aumento pareciera deberse a una mejora operacional de la faena. En este periodo la recuperación en peso es cercana a un 65%. Finalmente durante el año 2011 y 2010 la faena produjo en promedio un poco más de 1 Mton secas de relave. Este valor se condice con lo presentado por la compañía en una declaración de impacto ambiental entregada el año pasado (CAP, 2012). Esto significa que la producción de relave se estima equivalente al 58% del peso de pellet feed obtenido en la planta.

Por su parte, para la calidad del recurso nuevamente no existe información oficial disponible por lo que el análisis deberá ser más cualitativo y tomando ciertos supuestos. Si se considera que el mineral de Apatito es el que provee de Tierras Raras a este tipo de yacimiento y que además al no poseer Hierro en su estructura el magnetismo de éste es relativamente bajo cuando se compara con el magnetismo de la magnetita o hematita, entonces es de esperar que las Tierras Raras se concentren en su mayoría en el rechazo seco obtenido en la concentración en seco aguas arriba (planta de pellet feed en Huasco). Para aquellas plantas que se alimentan de una mezcla entre pre-concentrado seco y mineral directamente desde la mina (planta de pellet en Valle del Elqui) se obtiene un relave húmedo el cuál es una mezcla entre dos relaves de distinta naturaleza. El primero es un relave húmedo de similares características al rechazo seco obtenido en la concentración magnética en seco, mientras que el segundo relave es de similares características al obtenido en la planta de Huasco. Dado que este último representa menos del 17% de la alimentación del pre-concentrado (basado en lo que ocurre en la planta de Huasco), el relave global obtenido en la planta de pellet de Valle del Elqui es principalmente un relave similar al obtenido en los rechazos secos de la concentración magnética pero que se encuentra molido y húmedo. Así la composición y el valor contenido del relave en perspectiva de los Elementos Críticos Energéticos debe ser similar a lo obtenido en los rechazos en seco evaluados en la sección anterior.

#### 4.5 Análisis de recursos metalúrgicos

Para los procesos metalúrgicos asociados a los yacimientos denominados pórfidos cupríferos se obtuvo que los volúmenes de relave producidos en Chile son sumamente interesantes y que las actuales leyes de algunas Tierras Raras, como el Neodimio, en estos relaves son suficientes para participar en más de un 30% del mercado. Sin embargo esto contrasta con el hecho de que el valor contenido no es alto y por lo tanto la viabilidad económica de extraer estos recursos no es evidente. Así se identifica un recurso de gran volumen pero de baja calidad. De esta forma la investigación en nuevas tecnologías de extracción de Tierras Raras a partir de relaves de Cobre podría transformar este recurso y volverlo competitivo a nivel mundial. Es necesario recordar que al ser relave los costos de molienda (proceso intensivo en energía) están cubiertos y que por lo tanto existe una ventaja respecto de los minerales in situ.

Dentro de los yacimientos porfídicos los barros anódicos también son un actor relevante en esta investigación. Ocurre que a nivel país el aumento de la producción de concentrado de Cobre y el estancamiento de la capacidad de fundición y refinación durante los últimos diez años ha hecho que el país pierda participación en la producción y maquila de los barros anódicos. Estos barros, que son de elevado valor contenido, además equivalen al 90% del Telurio producido a nivel mundial. Así en la pérdida de participación en la maquila de barro anódico se incluye no participar del mercado de uno de los elementos más críticos según el DoE y el JRC-IET de la comunidad europea. Así el Telurio es un candidato interesante a estudiar en profundidad en la tercera y última etapa de esta investigación.

Respecto de los recursos metalúrgicos asociados a los yacimientos denominados IOCG se tiene que son de bajo volumen si se compara con los yacimientos porfídicos. Además dada la baja recuperación en peso del proceso de sulfuros y de óxidos no es de esperar leyes interesantes en los relaves ni tampoco en los ripios de lixiviación. Por último para el caso puntual del yacimiento Candelaria sería interesante comprender el comportamiento de las Tierras Raras en el proceso de flotación del Cobre para identificar si existe una oportunidad de concentrar estos elementos, sería interesante también estudiar la composición de los barros anódicos obtenidos en la electrorefinación del concentrado de Cobre de Candelaria.

Para el caso de las faenas de CMP asociadas a yacimientos de Hierro Apatito no fue posible tener una medición certera del valor contenido en sus relaves y rechazos secos, sin embargo tomando como supuesto lo ocurrido en Cerro Carmen se obtuvieron resultados interesantes, en particular para el relave obtenido en la planta de pellet de la Cuarta Región puesto que existiría un recurso con una preparación mecánica completa (chancado y molienda).

Se tiene entonces que los recursos metalúrgicos en Chile son de gran envergadura sin embargo su competitividad no es evidente. Sólo el barro anódico y el Telurio se desprenden como alternativas posibles y competitivas con la tecnología actual.

## **Capítulo 5 Telurio**

### **5.1 Elección**

Una vez determinado el potencial de los distintos recursos geológicos y metalúrgicos que posee Chile, es necesario determinar cuáles de estos representan una fuente interesante de Elementos Críticos Energéticos. Al respecto y basado en lo expuesto en el capítulo anterior de la investigación (Tabla 3.1-1) se tiene que los elementos en cuestión corresponden a Neodimio, Disproseo, Itrio, Europio, Terbio, Telurio, Galio e Indio. Tomando en cuenta los resultados obtenidos en las etapas anteriores y considerando además que algunos de estos elementos pertenecen a un mismo grupo se tiene que para el análisis se tendrán tres grupos: Tierras Raras, Telurio y Otros. En el primer grupo quedan incluidos los cinco primeros elementos pues todos ellos son Tierra Raras, el segundo grupo será únicamente Telurio y finalmente el grupo Otros incorpora Galio e Indio. Por último, dado que el Escandio fue considerado en los recursos geológicos del yacimiento Imán, este elemento será considerado de manera anexa en el grupo de Tierras Raras.

Se procede entonces a realizar un análisis de los distintos grupos con el objetivo de plantear los resultados más importantes obtenidos en las etapas anteriores y así poder decidir cuál o cuáles de estos elementos posee un potencial interesante en Chile. Finalmente aquellos elementos en los que Chile si posea potencial serán considerados en la última etapa de esta investigación la que consiste principalmente en un análisis económico de su mercado (considerando oferta, demanda, aplicaciones, estructura de mercado entre otros) y luego se determinara la atractividad del mercado para finalmente considerar la competitividad que un eventual productor en Chile de este elemento poseería.

#### **5.1.1 Tierras Raras**

Desde el punto de vista de los recursos geológicos presentes en Chile, el potencial más interesante lo poseen los yacimientos de Fierro Apatito (Cerro Carmen y Sierra Áspera) y en menor grado los yacimientos de tipo IOCG. El primero de estos fue más profundamente estudiado por la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CChEN), al punto de que los investigadores definieron recursos indicados por cerca de 4 Mton de mineral con una ley media estimada de 760 g/ton de Tierras Raras totales. A partir de esto se estimó que el valor contenido asociado a las cinco Tierras Raras en cuestión alcanza los 35 US\$/ton de mineral.

Por su parte, el estudio realizado ( MARSCHIK & FONTBOTÉ, 2011) en el distrito Punta del Cobre entrega valores interesantes de Tierras Raras sin embargo el valor contenido es muchísimo inferior, siendo en el mejor de los casos para la mina Trinidad donde se obtienen cerca de 11 US\$/ton.

Respecto de los recursos metalúrgicos no existen resultados interesantes. Dado que geológicamente los pórfidos cupríferos no son una fuente de Tierras Raras, es necesario enfocar el análisis en los recursos metalúrgicos de operaciones de yacimientos tipo IOCG y Fe-Ap. Para el primero de estos yacimientos no fue posible determinar la composición de su relave, sin embargo bajo los supuestos considerados en el capítulo anterior no es de esperarse un aumento significativo de la leyes de Tierras Raras en los relaves, esto producto que la recuperación en peso de la flotación de Cobre no supera un 4% y tampoco existe evidencia de leyes de Tierras Raras en los concentrados de estas faenas, en particular la de Mina Candelaria.

Respecto de los recursos aguas abajo (escorias, barro y otros) no es posible distinguir entre aquellos producidos por minerales de yacimientos tipo IOCG o porfídicos, por lo que en base a lo obtenido en el análisis de los recursos metalúrgicos del proceso de pórfidos no pareciese existir una concentración de Tierra Raras en la escoria de fundición o en los barros anódicos. Por último los rípios de lixiviación, principalmente para el caso de mina Manto Verde, no representan interesantes leyes de Tierras Raras puesto que sí bien hay estudios que así lo indican, estos elementos deberían estar presentes en zonas de mayor profundidad donde ya no existen minerales oxidados y por ende no son sometidos al proceso de lixiviación.

De esta forma toda la información recopilada respecto de las concentraciones de Tierras Raras en diversos recursos dentro de Chile se tiene que el de mayor potencial corresponde al mineral indicado cercano al yacimiento de Cerro Carmen. El valor contenido alcanza los 35 US\$/ton. Poniendo estos valores en el contexto mundial de Tierras Raras, los resultados no son alentadores. Si bien en la actualidad más del 95% de la producción de estos elementos proviene de China, las Tierras Raras se han transformado en un foco importante de exploración a nivel mundial con el objetivo de reducir la dependencia global respecto de China.

De acuerdo a lo publicado por TechnologicalMetalsResearch (sociedad dedicada al estudio de mercados de elementos tecnológicos) hoy en día existen más de cincuenta proyectos de exploración de Tierras Raras fuera de la soberanía china. Estos proyectos han estimado sus recursos o reservas bajo las líneas de Ni 43-101, JORC Code o SAMREC Code, por lo que la validez de la información está asegurada, por lo menos desde el punto de vista geo-estadístico (Hatch & Lifton, 2013). De acuerdo a la última versión publicada por los autores se tiene que para estos 51 proyectos, la ley media de Óxidos de Tierras Raras alcanza 0.7%, y el tonelaje total de estos proyectos supera los 6,600 Mton. Luego si se realiza el mismo análisis pero esta vez para sólo los cinco elementos considerados críticos se tiene que la ley es de 0.16% de Óxidos. Luego utilizando la misma proyección de precios que fue considerada anteriormente (Tabla 3.1-1) se tiene que el valor contenido promedio de estos yacimiento supera los 250 US\$/ton si se considera únicamente estos cinco elementos.

Respecto del Escandio, presente en el yacimiento Imán, agrega una cantidad importante de valor al proyecto sin embargo existen dos factores a considerar respecto de este proyecto. El mercado del Escandio es de entre 10 y 20 toneladas anuales y las principales dos fuentes son los relaves de operaciones de Titanio en Rusia y algunos yacimientos mineros en China por lo que es un mercado bastante pequeño y concentrado. El segundo factor es el yacimiento Tomtor al este de Rusia, este depósito posee más de 150 Mton de mineral de Sc con una ley media de 480 gr/t (Basov, 2013) la cuál es más de diez veces superior a lo encontrado en Imán. El volumen y calidad del yacimiento ruso y el actual comportamiento del mercado del Escandio hacen difícil proyectar una participación de Imán en el mercado en cuestión.

De esta forma queda en evidencia que en un corto y mediano plazo los actuales recursos chilenos de Tierras Raras no parecen tener potencial para poder competir con los yacimientos de otros países. Obviamente el largo plazo está controlado por variables que no han sido expuestas, cómo puede ser un aumento sustancial del consumo de estos elementos (nuevos recursos serán necesarios) y que junto con una mejora tecnológica hagan de los recursos nacionales una oportunidad competitiva en el mercado mundial de Tierras Raras. Cabe recordar además las limitaciones de la etapa de catastro de recursos, donde fueron excluidos todos los yacimientos de minería no metálica y donde además se consideró sólo los yacimientos que actualmente se conocen y por lo tanto en ningún caso es una conclusión categórica. Sería interesante realizar un nuevo trabajo donde otro tipo de recursos sean considerados (minería no metálica) y también reforzar la exploración en el territorio nacional con el objetivo de tener un mayor conocimiento geológico-económico del país.

### **5.1.2 Telurio**

Este elemento se consideró por sí sólo (no cómo las Tierras Raras o “Otros”) producto de que es el elemento donde Chile pareciera tener un potencial muy relevante en el mercado y que hoy en día no se está aprovechando.

Desde el punto de vista de los recursos geológicos no pareciera existir un potencial interesante en Chile puesto que el Telurio se presenta únicamente en los yacimientos porfídicos (para el caso de Chile) y dado sus bajas concentraciones no es posible extraerlo directamente desde el mineral. De esta forma, y cómo fue visto anteriormente, la gran fuente de Telurio que posee Chile corresponde a los barros anódicos que se obtienen a partir de la electro-refinación de los ánodos de Cobre que ocurre en las tres refinerías de Chile: Chuquicamata, Potrerillos y Ventanas, siendo todas pertenecientes a Codelco.

La ley de Telurio en los barros anódicos oscila entre 0.5 y 3% en peso y sí se considera además que por cada tonelada de Cobre electro-refinado que se obtiene se producen cerca de 1.5 Kg de barro anódico se tiene que Chile en los últimos años produce cerca de 1,500 toneladas de este recurso metalúrgico. De esta forma Chile produce a partir de sus refinerías entre 7.5 y 45 toneladas de Telurio al año. Y si bien estos valores nada se asemejan a la industria del Cobre, se tiene que anualmente la producción Telurio es entre 400 y 500 toneladas, dependiendo de la fuente bibliográfica utilizada. Por un lado el British Geological Survey (BGS) estimó que la producción de Telurio para los años 2010 y 2011 alcanzo un total de 105 y 96 toneladas respectivamente (BGS, 2012). Por su parte el United State Geological Survey (USGS) no reporta producción global para estos años, sin embargo de acuerdo a su anuario estadístico la producción conjunta de Japón, Perú, Canadá y Rusia alcanzó 123 toneladas el año 2010 y un total de 115 toneladas para el periodo siguiente (USGS, 2012).

A pesar de esto, la misma institución estimó que el año 2011 la producción mundial de Telurio era aproximadamente 500 toneladas (USGS, 2012), este valor se condice con lo reportado por la Universidad de Moscú que, para el año 2010 estimó una producción entre 400 y 600 toneladas por año (Kul'chitskii & Naumov, 2010). Por último el Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) estimó que para el año 2010 la producción de Telurio alcanzó las 250 (Audion & Labbé, 2010), por lo que no existe consenso en la estimación de la producción.

A pesar de la divergencia de la información, en cualquiera que sea los casos el potencial de Chile representa una fracción importante del actual mercado del Telurio.

Analizando el problema desde una perspectiva distinta se tiene que todas las fuentes anteriormente citadas concuerdan en que más del 90% de la producción de Telurio proviene de la maquila de los barros anódicos obtenidos a partir en la electro-refinación de ánodos de Cobre. Así el potencial de producción de Telurio de un país puede medirse como la capacidad de refinería electrolítica de Cobre que éste posee. Para el caso puntual de Chile, la capacidad de refinería supera los 1,100 Kton de Cobre de alta pureza, este valor ubica al país en el segundo con mayor capacidad de refinería de este tipo después de China (International Copper Study Group, 2013).

Se le agrega a lo anteriormente expuesto que durante la última década la producción de Cobre mediante el método de extracción por solvente ha ido aumentando respecto de la producción mundial de Cobre, y dado que esta línea de procesamiento no produce barro anódico es de esperarse que este recurso vaya volviéndose cada vez más escaso y por lo tanto aumente su valor, prueba de esto han sido las intenciones de las empresas locales de aumentar su capacidad de refinería o de invertir en generar nueva capacidad.

Codelco busca un mejoramiento técnico de la refinería de Chuquicamata (para lograr producir más de 700 Kton de cátodos de Cobre), mientras que Anglo American y ENAMI consideraron la alternativa de incorporar la electro-refinación en sus operaciones de Chagres y Paipote respectivamente (Minería Chilena, 2008). Esto debió aumentar la producción de barro anódico en el país. Así queda en evidencia que Chile posee un potencial al respecto que hoy en día no se está aprovechando, y por lo tanto el Telurio posee argumentos suficientes para que su mercado sea estudiado en profundidad en esta etapa de la investigación.

Se le agrega a todos estos argumentos el hecho de que la norma REACH de importaciones en la comunidad europea ha hecho que se replanteen las importaciones de productos minerales intermedios donde los barros anódicos podrían verse directamente afectados (Weishaupt, 2009).

Así queda en evidencia que el Telurio representa una oportunidad de desarrollo en Chile y por lo tanto será estudiado en profundidad en las futuras secciones de esta investigación.

### **5.1.3 Otros**

A este grupo corresponden el Galio e Indio. La razón de agruparlos y también de porqué el Telurio no fue incluido en este grupo guarda relación con el hecho de que no se ha reportado un potencial geológico o metalúrgico de estos elementos en Chile. De toda la investigación realizada de la geología de los yacimientos chilenos y la composición de los productos metalúrgicos que se obtienen en el país en ningún caso se acusó presencia de alguno de estos elementos. Por lo que no es de esperar que Chile posea un potencial al respecto, sin embargo se vuelve a nombrar las limitaciones del estudio realizado en esta investigación y por lo tanto esta afirmación no puede ser considerada categórica y por ende será el aumento en el conocimiento geo-científico de la geología económica del país lo que en el tiempo dirá si esta afirmación es del todo correcta o no.

Destacar además que tanto para los recursos geológicos y metalúrgicos se decidió considerar aquellos más importantes para la industria minera del país, por lo que operaciones menores y/o aisladas del contexto minero del país cómo es la mina El Toqui (operación de Oro y Zinc) quedaron excluidos de la investigación.

Desde un punto de vista productivo, se tiene que el total de Galio producido en el mundo se obtiene a partir del hidróxido de aluminio que se obtiene del proceso Bayer en el procesamiento de bauxita (Moss, Tzimas, Kara, Willis, & Kooroshy, 2011). A partir de esto, y dado que Chile no posee yacimientos económicos de bauxita (Moreno & Gibbons, 2007), no es de esperar recursos metalúrgicos interesantes que puedan competir con lo que globalmente ocurre en la industria.

Por parte del Indio el caso es similar, casi la totalidad de este elemento se obtiene a partir del proceso de refinación del Zinc y lo restante de la refinación de Estaño. De estos dos mercados Chile participa únicamente del Zinc a través de la mina El Toqui, ubicada en la décimo primera región de Aysén. Esta faena sin embargo sólo produce concentrado de Zinc el cuál es posteriormente exportado para su refinación, de esta forma la obtención de Indio en territorio nacional se hace imposible. A esto se le agrega además que la producción total de la mina para el año 2011 fue de 36 Kton de Zinc fino (COCHILCO, 2012), mientras que a nivel mundial para ese mismo periodo se produjo más de 12 Mton de Zinc fino (USGS, 2013) por lo que la participación de la minera es inferior al 0.3% de la industria mundial.

Finalmente todo el argumento expuesto anteriormente hace descartar estos dos elementos como candidatos a ser producidos de manera competitiva en Chile y por lo tanto no serán considerados en la etapa posterior de la investigación.

Basado en la información geo-científica que actualmente se tiene de la geología chilena y de los diversos recursos metalúrgicos nacionales, el país sí posee un potencial en el mercado del Telurio que no ha aprovechado y también se puede descartar, hasta el momento, una eventual producción nacional de Tierras Raras, Indio y Galio que logre ser competitiva a nivel mundial. Esta aseveración, sobre todo la que guarda relación con los elementos en los que Chile no posee potencial, posee dos fuentes importantes de error: la simplificación del modelo geológico de Chile y también el hecho de que la baja competitividad de los recursos catastrados es una propiedad que puede variar en el tiempo si es que situaciones de aumentos importantes en el consumo de Tierras Raras (y por ende un aumento de precio) logren transformar estos recursos en unos de carácter más competitivo. Lo que es claro, hasta este momento, es que de generarse una curva de oferta agregada de estos elementos, los recursos chilenos estarían ubicados en la zona de mayor costo. Esto puesto que las leyes –y el valor contenido- es notoriamente inferior que los recursos existentes a nivel mundial.

Todo esto lleva a considerar al Telurio como el único candidato a la tercera y última sección de esta investigación. Este análisis será sumamente interesante puesto que el potencial de Chile está presente en la actualidad, no se trata de un proyecto a futuro, y por lo tanto las conclusiones que se obtengan de este estudio pueden ser interesantes desde una perspectiva pública (para que Chile aproveche de mejor forma sus recursos minerales) y también desde una perspectiva privada, donde una empresa pueda tomar participación de este mercado con la intención de hacer uso del potencial que hoy en día destaca a Chile y que el país no ha sabido aprovechar. Se procede entonces a realizar un análisis en detalle del mercado del Telurio

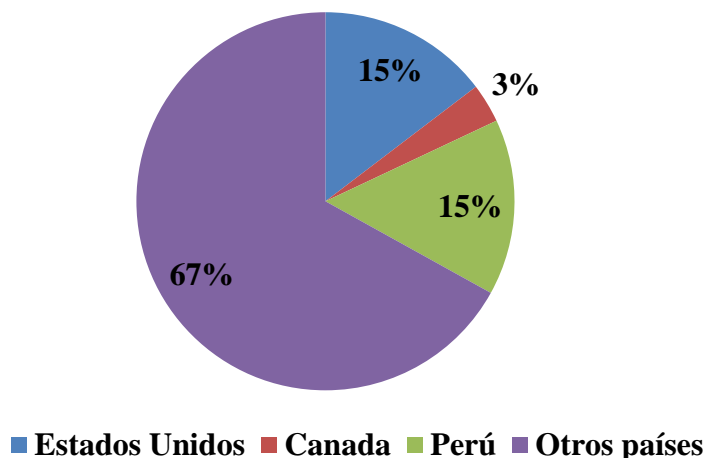


## 5.2 Antecedentes del Telurio

El Telurio (Te) corresponde a un elemento químico semi-metálico de número atómico 52, un peso atómico de 127.6 [gr/mol] y que pertenece al grupo 16 de la tabla periódica. Descubierta en 1782 por el Barón Franz Joseph Müller von Reichenstein en Nagyszeben (conocida actualmente como Sibiu, Transilvania, Rumania), la historia del descubrimiento, aislación y posterior denominación del elemento conlleva un importante nivel de males entendidos y disputas honoríficas. Esta historia y las generalidades del Telurio se abarcan en profundidad en el Capítulo 8 de anexos.

### 5.2.1 Recursos y reservas

Tomando la definición de recurso y reserva utilizada por el USGS se tiene que en la actualidad la única fuente de Telurio considerada son los yacimientos porfídicos de Cobre. El USGS publicó para el año 2012 un total de 24,000 toneladas de Telurio como reservas donde se considera que del total de Te presente en los ánodos de Cobre, sólo la mitad es recuperable mediante la maquila de los barros anódicos. En el siguiente gráfico quedan distribuidas estas reservas en los principales cuatro países



**Gráfico 5.2.1-1 Distribución de las reservas de Telurio**

Elaboración propia. Fuente: USGS

La razón de porque sólo los yacimientos de Cobre se consideran como reservas de Telurio se debe a que el 90% de la producción de este elemento proviene de este tipo de yacimiento y por ende es el principal recurso de Telurio que existe.

La producción restante proviene de las faenas de Plomo y también de los polvos metalúrgicos que se obtienen a partir de la fundición de Cobre y otros elementos. Destacar que Chile no aparece en las estimaciones siendo que es el país de mayores reservas de Cobre del mundo y el segundo con mayor capacidad de refinería de ánodos de Cobre después de China (USGS, 2012).

Se hace difícil comprender porque Chile no aparece en las estadísticas de las reservas de Telurio, por lo que se podría suponer que el USGSS considera aquella información que ha sido reportada por las empresas y en Chile éstas no reportarían esta información.

Otra metodología de estimación de las reservas de Telurio, también basada en las reservas de Cobre, fue realizada por el Buró de Investigación en Geología y Minería de Francia (BGRM). La investigación supone que por cada tonelada de mineral de Cobre procesada mediante flotación y fundición se produce 1 gramo de Telurio.

Basado en una ley de Cobre recuperable de 1.5% y considerando que para el año 2010 se reportaron 443 Mton de Cobre en minerales sulfurados, entonces se estima que las reservas de Telurio asociadas a las reservas de sulfuros de Cobre corresponden a 28,800 toneladas (Audion & Labbé, 2010). Si bien este valor es relativamente cercano a lo publicado por el USGS (24,000 toneladas) la distribución de estas reservas de Telurio no guardan relación con las reservas de Cobre.

**Tabla 5.2.1-1 Reservas de Telurio según M-J**

Región	País	Reservas de Te [t]	Reservas de Te [%]
África	R.D del Congo	1.700	8.5
	Zambia	2.000	10.1
	Otros	300	1.5
Asia	Filipina	700	3.5
	Otros	1.900	9.5
Europa	Rusia	800	4.0
	Otros	1.600	8.0
América del Norte	Canadá	700	3.5
	Estados Unidos	3.000	15.1
América Latina	Chile	5.500	27.6
	Perú	500	2.5
	Otros	300	1.5
Oceanía	Australia	500	2.5
	Otros	400	2.0
Total		19.900	100.0

Elaboración propia. Fuente: Mining Journal en base a lo publicado por BGRM

Para agregar más a la discusión existe una estimación realizada por Mining Journal el año 2001 (tabla 5.2.1-1) donde se consideran las reservas de Telurio en función de las reservas de Cobre sulfurado por país (Crowson P. , 2001). Si bien los valores podrían estar desactualizados, han pasado más de 10 años desde ese estudio, posee muchísima más certeza que los datos entregados por el USGS.

Destacan de estos resultados que el país con mayores reservas de Telurio es Chile, con más del 27% de las reservas mundiales, sin embargo el país no aparece en las estadísticas del USGS. Además, desde la perspectiva de los valores absolutos se tiene que entre ambas estimaciones el total de reservas estimadas son similares, ambas cercanas a 20,000 toneladas de Telurio. Sin embargo casos como el de Perú son puntos conflictivos si se considera que el 2001 se les asignó un 2.5% de las reservas totales mientras que para el año 2012 sus reservas representaban más del 15%.

Luego, si se considera las estimaciones realizadas por el USGS para el año 2001 se tiene que los valores entre ambas estimaciones son muy similares y para Perú en particular son iguales.

**Tabla 5.2.1-2 Reservas de Telurio año 2001 Mining Journal y USGS**

Región	País	Reservas de Te [t]	Reservas de Te [%]	Reservas de Te [t]	Reservas de Te [%]
África	Congo	1.700	8.5		0.0
	Zambia	2.000	10.1		0.0
	Otros	300	1.5		0.0
Asia	Filipina	700	3.5		0.0
	Otros	1.900	9.5		0.0
Europa	Rusia	800	4.0		0.0
	Otros	1.600	8.0		0.0
América del Norte	Canadá	700	3.5	700	3.5
	Estados Unidos	3.000	15.1	3.000	14.9
América Latina	Chile	5.500	27.6		0.0
	Perú	500	2.5	500	2.5
	Otros	300	1.5		0.0
Oceanía	Australia	500	2.5		0.0
	Otros	400	2.0		0.0
Otros				16.000	79.2
Total		19.900	100.0	20.200	100

Elaboración propia. Fuente: USGS y Mining Journal en base a lo publicado por BGRM

La única gran diferencia es que el USGS asignó casi un 80% de las reservas al ítem “otros” mientras que la estimación del Mining Journal es más detallista y distribuye las reservas en distintos países. Finalmente ambas llegaron a que para el año 2001 las reservas de Telurio correspondían a 20,000 toneladas.

Sería interesante poder determinar en base a las actuales reservas de Cobre una distribución de reservas de Telurio sin embargo la definición de reserva per se considera que su explotación es económicamente viable, en ese sentido es necesario determinar que fracción de las reservas de Cobre serán sometidas al proceso de flotación fundición, pues sólo así se podrá determinar las cantidades de Telurio que estarán disponibles a ser extraídas de la eventual producción de ese Cobre.

Si bien este tema sería interesante de investigar, se aleja de los objetivos de este trabajo por lo que no corresponde profundizar más el análisis. A grandes rasgos hay que destacar que las reservas de Telurio se estiman a partir de las de Cobre y si bien Chile es el país con mayores reservas de Cobre del mundo, el país no aparece dentro de las estadísticas del USGS. Esto acusa desde ya una pérdida de la situación estratégica que Chile posee en el mercado del Telurio.

#### **5.2.1.1 Tendencias y pronóstico**

Desde una perspectiva más de largo plazo se ha generado una tendencia en la exploración geológica en buscar nuevas fuentes de Telurio, en particular yacimientos del tipo Oro- Telurio (de donde se descubrió el Telurio) y también yacimientos de Zinc con mayores concentraciones de Telurio (USGS, 2012). Prueba de la relevancia que ha ido tomando los yacimientos auríferos es que el Centro de Excelencia en Depósitos Minerales de Australia ha incluido este tipo de recursos como parte de los yacimientos a estudiar en profundidad para construir herramientas de exploración (ARC Centre of Excellence in Ore Deposits , 2012).

Es de esperar entonces que en un plazo de 10 años existan importantes modificaciones en la comprensión de las reserva de Telurio en el mundo, modificaciones que pueden darse desde una perspectiva metalúrgica (se logra recuperar más Telurio en el proceso de refinación del Cobre) o geológica con el descubrimiento de nuevos yacimientos que puedan representar una fuente importante de Telurio.

En el caso de tratarse de avances metalúrgicos Chile no debiera perder la posición que hoy posee puesto que será necesario incorporar las mejoras tecnológicas que vayan creándose, sin embargo si otro tipo de yacimientos se vuelven interesantes para recuperar Telurio entonces esta situación en la que Chile hoy en día se encuentra irá perdiendo valor y en esa situación se volverá aún más complejo intentar hacer un uso estratégico de la industria chilena del Cobre como una fuente relevante de Telurio para el mundo.

## **5.2.2 Mercado**

En esta sección se buscará entender cuál ha sido la historia del mercado del Telurio en función de las variables principales: producción, precio y consumo. Además busca comprender la situación actual de este sector económico en base a los datos que se encuentran disponibles. Dado que existe discrepancia entre las diversas fuentes entonces se vuelve necesario entablar una discusión respecto de la credibilidad de las diferentes fuentes de información e intentar correlacionarlas con el objetivo de lograr distinguir aquellos datos que son correctos y aquellos que no lo son.

Como información histórica (1930-1990) se considerara la serie que el USGS posee para el precio del Telurio y la producción mundial de este elemento. Esto se debe a que esta institución es la única en el mundo que ha estado monitoreando este mercado y el de todos los minerales por más de 80 años. Esta información será contrastada en la etapa de historia reciente (1990-2010) con otras fuentes con el objetivo de validar los datos publicados por la institución norteamericana. Estas otras fuentes consideran servicios geológicos de otros países (Inglaterra y Austria) además del anuario estadístico de producción del World Metal Statistics, siendo esta última fuente la más fidedigna y que será validada con publicaciones del Mining Journal para algunos años de este periodo.

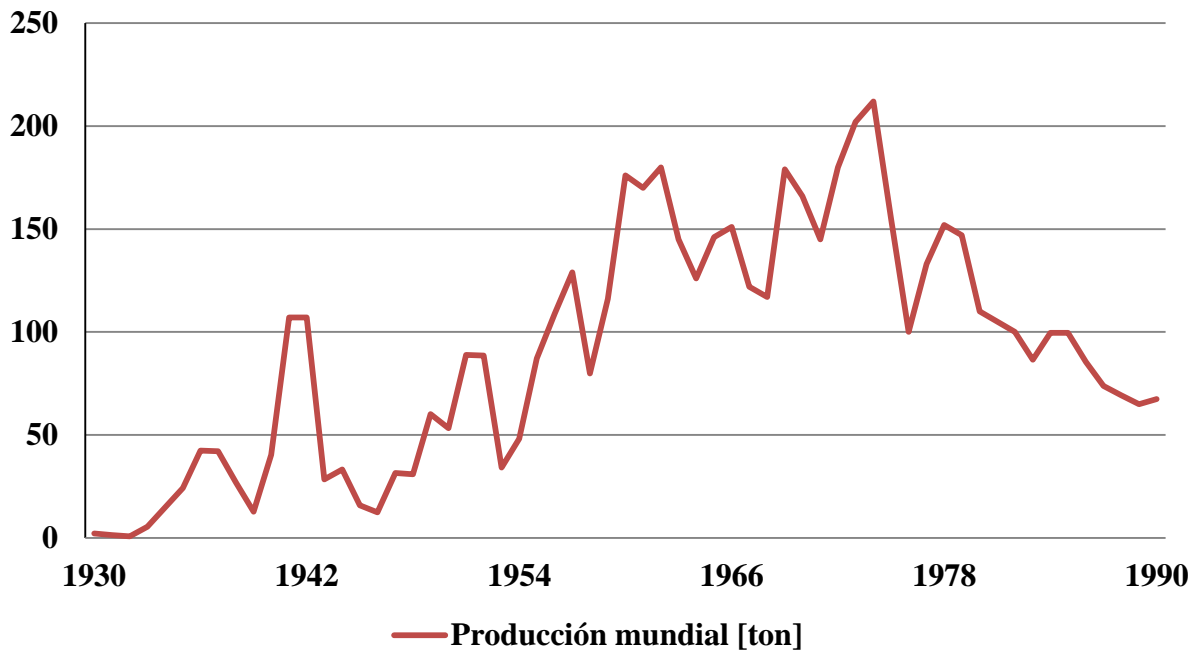
Finalmente la actualidad del mercado (2010-2012) será trabajada con diversas fuentes de información, entre las que destaca el USGS, publicaciones de la Universidad de Moscú y otras fuentes.

### **5.2.2.1 Historia (1930-1990)**

Si bien el Telurio como elemento fue descubierto a fines del siglo XVIII, sólo existen estadísticas de producción y precio a partir de 1930 por lo que hay más de 150 años en que no se tiene registro respecto de este mercado. A partir de 1930, en Estados Unidos, se empieza a generar la estadística básica de producción, precio y principales aplicaciones de diversos elementos menores, entre los que se encuentra el Telurio.

Este trabajo, realizado en su momento por el Buró de Minas de Estados Unidos y que posteriormente fue relegado al Servicio de Geología (USGS), consistió básicamente en recopilar la producción de los países más importantes y que además hacían pública sus producciones de metales menores. De esta forma la estadística de producción incluye únicamente a países como Canadá, Japón, Perú, Rusia y al mismo Estados Unidos. Como se verá más adelante este catastro no logra abarcar una parte importante de la producción mundial de Telurio sin embargo entrega información relevante del comportamiento histórico de la oferta del Telurio.

En el siguiente gráfico se encuentra la producción histórica mundial de Telurio desde 1930 hasta el año 1990 asociada a los países anteriormente nombrados.



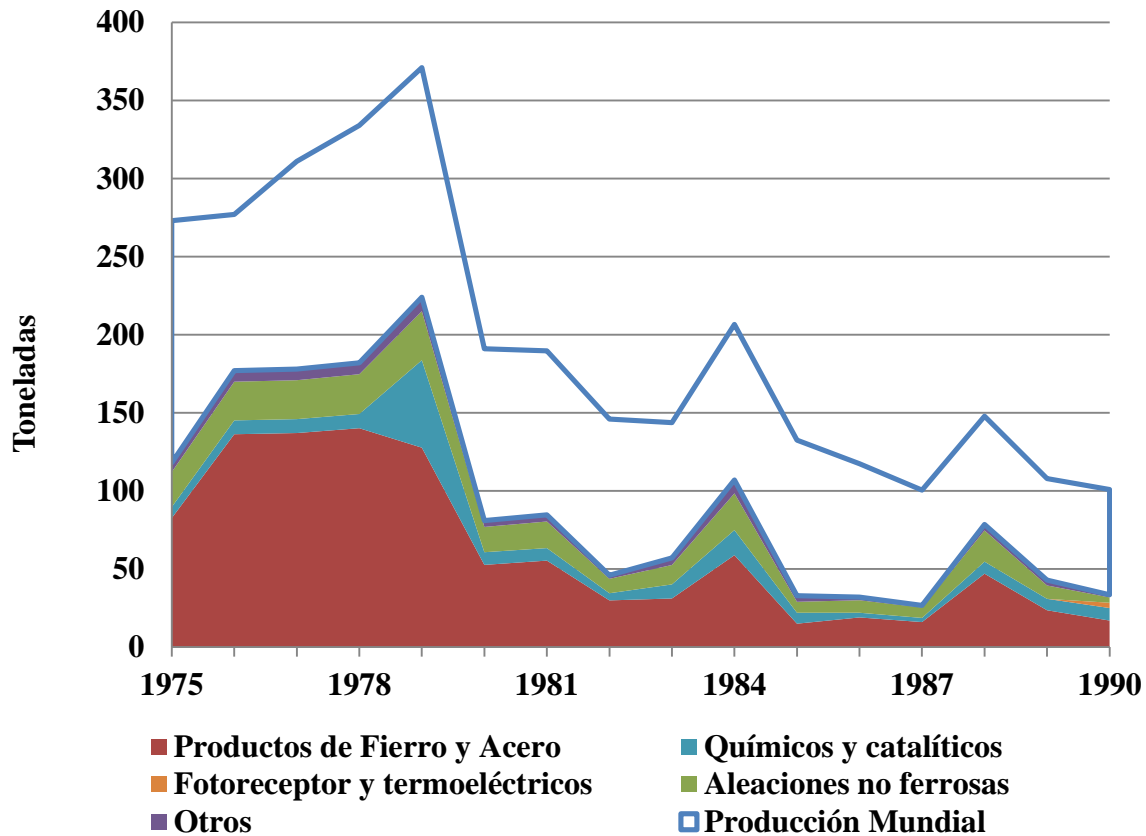
**Gráfico 5.2.2.1-1 Producción mundial de Telurio 1930-1990 según USGS**

Elaboración propia. Fuente: USGS

En términos generales se aprecia que existe una tasa creciente de consumo entre los años 1930 y mediados de la década del 70', y luego a partir de esta fecha la producción mundial tiende a disminuir para llegar a producciones inferiores a las 100 toneladas por año. Volver a destacar que estos datos corresponden a los publicados por el USGS y por lo tanto sólo consideran los países que publican sus producciones de metales menores. A modo de ejemplo, para el año 1990 el USGS reporta una producción de 68 toneladas, mientras que por su parte para ese mismo año el World Metal Statistics reporta un total de 217 toneladas. Sin embargo no existen otros registros distintos al USGS para el periodo 1930-1990, por lo que será en la parte de historia reciente donde se podrá comparar lo publicado por el instituto norteamericano y lo hecho por la base de datos inglesa.

Respecto de las aplicaciones o usos que históricamente ha tenido el Telurio, sólo se conocen datos de lo ocurrido internamente en Estados Unidos entre los años 1975-1990. Se ha reportado el consumo aparente de Telurio dentro de ese país, desglosado por los distintos usos y si bien no es posible generalizar el perfil de consumo de EEUU al resto del mundo ocurre que el consumo interno entrega una idea general de cómo han variado las aplicaciones del Telurio a lo largo del tiempo. Además si se considera que el consumo de Estados Unidos representa, en promedio, un 85% de la producción de cada año (entre 1975 y 1990) según lo reportado por el USGS, entonces este país si posee cierta representatividad al momento de buscar entender los destinos finales que el Telurio ha tenido en el mundo entre los años 1975 y 1990.

En el siguiente gráfico queda representado el perfil de consumo de Telurio en Estados Unidos y también la producción mundial reportada por el USGS.



**Gráfico 5.2.2.1-2 Principales aplicaciones del Telurio en EEUU y producción mundial**

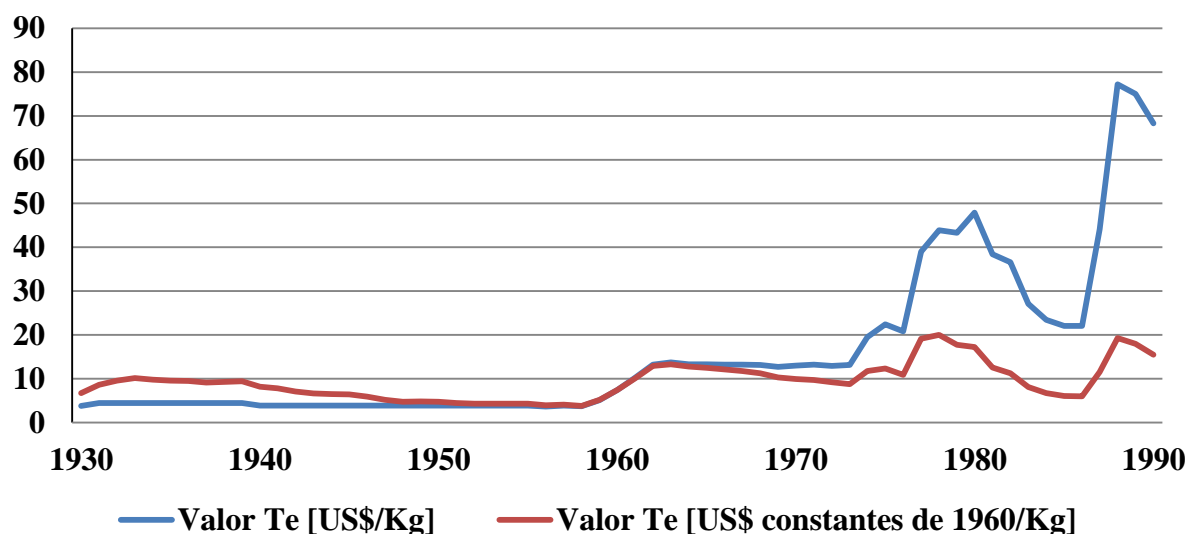
Elaboración propia. Fuente: USGS

Entendiendo más en detalle el origen de la curva de producción se tiene que existieron alzas registradas en los años 1941 y 1951 que no están representadas en el gráfico anterior y que se deben particularmente a un aumento del consumo producto de la segunda guerra mundial y el conflicto en la península coreana respectivamente. Sin embargo dado que la oferta superaba la demanda, el precio no sufrió variaciones importantes en esas fechas. Por su parte el aumento prácticamente constante que sufre durante las décadas del 60 y 70 se asocian a aumentos del consumo en aplicaciones particulares cómo son las aleaciones ferrosas y no ferrosas y también en el área de termoelectrónicos. En el gráfico anterior queda en evidencia el importante rol que tenían los productos de Hierro y Acero en el consumo de Telurio.

Luego, el descenso que se produce en la década delos 80 se debe principalmente a la crisis económica mundial de ese periodo, lo que indujo una menor demanda de acero y sus respectivas aleaciones y por lo tanto se reduce el consumo de Telurio en su principal aplicación.

A fines de los ochenta, existe un aumento importante del consumo de Telurio en aleaciones no ferrosas y ferrosas principalmente, esto induce incluso que los inventarios de este elemento prácticamente desaparecieran (USGS, 2012).

Respecto de la historia del precio se tiene que ocurre una situación bastante estable entre los años 1930 y 1960, luego se genera una tendencia a la alza para volver a estabilizarse en un precio de 15 US\$/Kg, periodo que duraría hasta mediados de la década de los 70'. Luego existe una relevante tendencia a la alza entre 1975 y 1990 con un aumento de un 400% del precio del Telurio en dólares corrientes, sin embargo al considerar la deflación del dólar americano el precio de este elemento tendió a variaciones que cómo promedio bordean los 15 US\$ de 1960 por año.



**Gráfico 5.2.2.1-3 Precio Telurio a dólares constantes de 1960 y corrientes**

Elaboración propia. Fuente: USGS

Se destaca de este gráfico que el aumento en el consumo de Telurio entre los años 1975 y 1980 no es posible asociarlos con una reducción de su precio. Incluso al contrario, justamente en ese periodo se genera una leve alza en el precio del elemento para luego bajar su precio y también su consumo. En ese periodo, y de acuerdo a los datos publicados por el USGS la producción de Telurio trató de adecuarse a la creciente demanda puesto que el año 1976 hubo un desbalance neto dado que la demanda superó la oferta. Este fenómeno podría asociarse a una demanda inelástica ya que para los últimos cuatro años del análisis (1987-1990) la elasticidad precio de la demanda fue inferior a -1. De todas formas este comportamiento es bastante localizado puesto que en los años previos la elasticidad presenta un comportamiento oscilatorio.

De esta forma, y cómo la teoría económica lo determina, no es el precio la única variable que determina la producción u oferta de un elemento mineral, en particular el Telurio.



Destacar que los aumentos en la demanda discutidos previamente no tuvieron una influencia relevante en el precio del elemento, esto se debe principalmente a que siempre existió una cantidad importante de inventario que mantuvo cierta estabilidad en el precio pero que sin embargo a fines de 1990 se acaba y por ende el precio se vuelve una variable muchísimo más oscilante (USGS, 2012).

Es evidente que las fuertes variaciones que ha sufrido la producción, el precio y el consumo del Telurio se deben principalmente a su estructura de mercado. Dado que es un elemento cuya fuente principal posee un carácter de subproducto entonces la producción no se encuentra ligada al consumo sino más bien a la disponibilidad del elemento en los procesos del Cobre principalmente. Esto genera enormes volatilidades de precio y de los almacenamientos existentes. En el análisis en profundidad de la oferta y de la demanda de los últimos cinco años se intentará identificar cuáles han sido las variables que han explicado el comportamiento del mercado del Telurio.

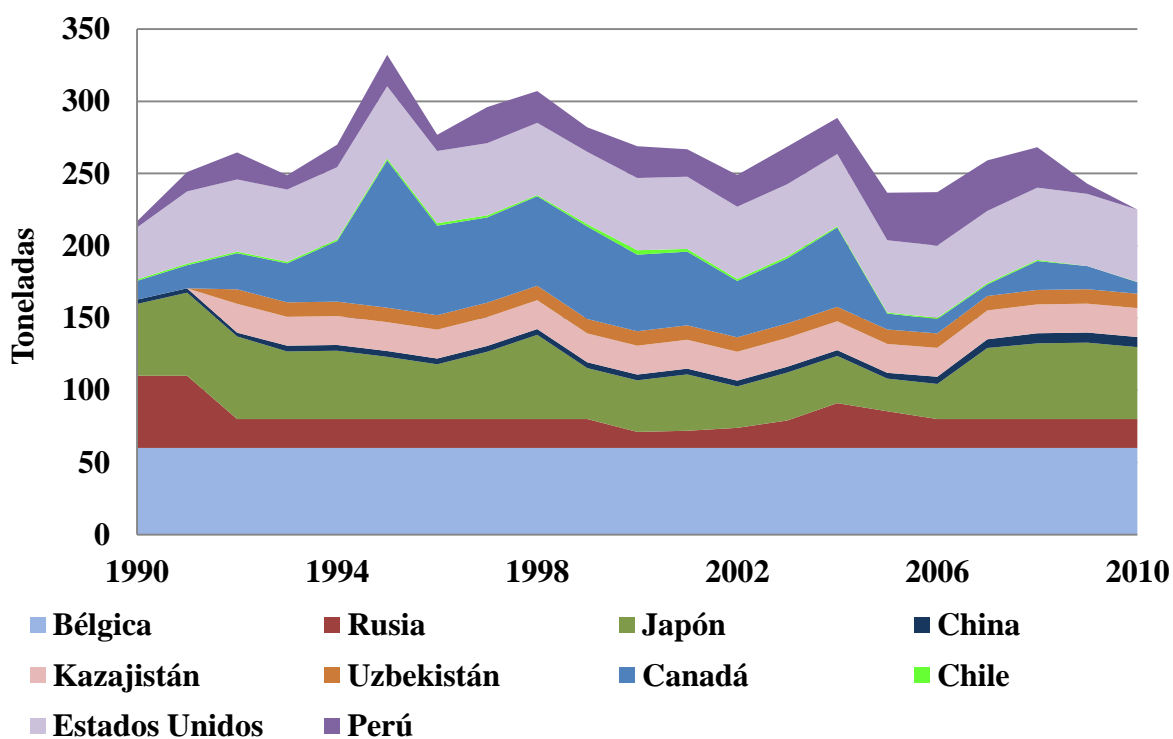
#### **5.2.2.2 Historia reciente (1990-2010)**

En las dos décadas que involucra este periodo de historia reciente el mercado del Telurio ha sufrido importante modificaciones, sobre todo en su precio y también en las cantidades producidas. Como fue expuesto anteriormente, para este periodo se cuenta con la base de datos del World Metal Statistics Yearbook (1990-2010) donde está desglosada la producción mundial según cada país. Para los últimos cuatro años (2007-2010) el USGS posee estimaciones de la producción mundial sólo que no genera un desglose por país, veremos que ambos valores divergen considerablemente.

Respecto de la demanda y el perfil de aplicaciones del Telurio en este periodo se tienen tres fuentes de información el USGS que año a año publica una estimación de estos valores y la segunda y tercera fuente son publicaciones esporádicas del Mining Journal (1990, 1995 y 2000) y del Mining Review (1990-1994) donde también se difunde esta información.

Así se utilizarán los datos del USGS como tendencia, mientras que el Journal servirá para validar la información del instituto norteamericano. Por último los datos de precio seguirán siendo los publicados por el USGS puesto que así se mantiene la metodología de estimación de éste.

En el siguiente gráfico se encuentra resumida la producción de Telurio del mundo para los últimos veinte años, desagregada por país. Todo esto en base a lo publicado por el World Metal Statistics (World Metal Statistics, 1999-2011).



**Gráfico 5.2.2.2-1 Producción de Telurio por país según WMS**

Elaboración propia. Fuente: WMS Yearbook

Al ser la estadística desagregada por país pareciera ser más fidedignas que las entregadas de forma global por otras instituciones, sin embargo de acuerdo al WMS algunos países como Bélgica, Estados Unidos, Rusia y otros han mantenido casi constante su producción a lo largo del periodo en cuestión. Esto por un lado puede indicar cierta incerteza por parte de la base de datos, pero al realizar comparaciones con otras fuentes de datos pareciera ser razonables.

Para la primera década de este periodo, 1990-2000, se cuenta con las publicaciones aisladas del Mineral Handbook realizadas por Phillip Crowson, donde de acuerdo al autor durante el año 1990 se produjeron 184 toneladas de Telurio, mientras que el año 2005 y 2006 la producción fue de 332 y 277 respectivamente.

Si bien la estimación para el año 1990 no es exactamente la misma que lo presentado por el WMS se tiene que tanto para el año 1995 y 1996 ambas publicaciones reportan la misma producción tanto a nivel global y desagregado por país (Crowson P. , 1998) y (Crowson P. , 1991).

En la siguiente tabla se resume la producción desagregada por país según Crowson.

**Tabla 5.2.2.2-1 Producción de Telurio en toneladas según Crowson 1990 1995 y 1996**

Región	País	1990	1995	1996
Europa	Bélgica	60	60	60
	Rusia	5	20	20
Asia	Japón	50	43	38
	China	-	4	4
	Kazajistán	-	20	20
	Uzbekistán	-	10	10
	Filipinas	6	-	-
América	Canadá	13	102	62
	Chile		1	2
	Estados Unidos	36	50	50
	Perú	4	22	11
	Otros	10	-	-
	Total	184	332	277

Elaboración propia. Fuente: Mineral Handbook

De esta forma se tiene que la información reportada por el WMS se condice de buena forma con lo hecho por Crowson, por lo que la base de datos de producción del WMS queda validada para esta década.

Para la siguiente década de la historia reciente se tiene como referencia las publicaciones de los servicios geológicos de Estados Unidos (USGS), Inglaterra (BGS) y Austria (BMW FJ), estos han publicado para los años 2005-2010 la producción de Canadá, Estados Unidos, Japón, Perú y Rusia.

En la siguiente tabla se resume cada una de las publicaciones, estando en rojo aquellos valores que discrepan de forma importante del resto de la estadística. Destacar además que aquellos valores especificados como “-“ significan que no fueron publicados ya sea porque no se consideró o porque se mantuvo confidencial para respetar los intereses de privados. A su vez los valores iguales a cero son en caso en que sí hubo una estimación y ésta arroja una producción nula (BGS, 2012), (BGS, 2010), (USGS, 2007-2010), (BMW FJ, 2011-2013).

**Tabla 5.2.2.2-2 Producción de Telurio de algunos países en diversas fuentes**

<b>Año</b>	<b>Fuente</b>	<b>Canadá</b>	<b>EE UU</b>	<b>Perú</b>	<b>Japón</b>	<b>Rusia</b>
<b>2005</b>	<b>WMS</b>	11	50	32.9	22.6	25.4
	<b>USGS</b>	75	-	22	22	-
	<b>BGS</b>	11	50	33	23	-
	<b>BMW FJ</b>	11	-	33	23	-
<b>2006</b>	<b>WMS</b>	10	50	37	24.3	20
	<b>USGS</b>	75	-	33	20	-
	<b>BGS</b>	11	50	37	24	-
	<b>BMW FJ</b>	11	-	37	24	-
<b>2007</b>	<b>WMS</b>	8	50	35	49.2	20
	<b>USGS</b>	14	-	35	41	34
	<b>BGS</b>	14	50	35	41	-
	<b>BMW FJ</b>	14	50	35	41	-
<b>2008</b>	<b>WMS</b>	20	50	28	52.4	20
	<b>USGS</b>	19	-	28	46.5	34
	<b>BGS</b>	20	50	28	47	-
	<b>BMW FJ</b>	19	50	28	47	-
<b>2009</b>	<b>WMS</b>	16	50	7	52.9	20
	<b>USGS</b>	16	-	7	49.2	34
	<b>BGS</b>	16	50	7	49	-
	<b>BMW FJ</b>	16	50	7	49	-
<b>2010</b>	<b>WMS</b>	8	50	0	49.8	20
	<b>USGS</b>	8	-	0	47	34
	<b>BGS</b>	8	50	0	47	-
	<b>BMW FJ</b>	8	50	0	47	-

Elaboración propia. Fuente: WMS Yearbook, USGS, BGS, BMW-FJ

De la tabla anterior se desprende básicamente que el instituto inglés junto con el austriaco maneja prácticamente la misma estadística. A su vez para Canadá el USGS es el más contradictorio, sobre todo para los años 2005 y 2006, mientras que el World Metal Statistics tiende a sobre estimar la producción de Japón respecto de las otras tres fuentes de información, de todas formas las cantidades en diferencia no superan las 5 toneladas, lo que significa menos de un 10% de la producción nipona.

Todas las fuentes de información concuerdan que la producción de Estados Unidos alcanza las 50 toneladas por año, este valor no aparece en el USGS puesto que la han mantenido confidencial dado que no corresponde a un valor agregado de empresas, sino más bien a lo producido por la única empresa estadounidense que participa del mercado.

Finalmente el país con mayor falta de información es Rusia, donde por un lado el WMS le ha asignado una producción constante equivalente a 20 toneladas por año, mientras que el USGS hizo lo mismo sólo que a un valor de 34 toneladas por año.

Cabe destacar que la producción contabilizada por el USGS para los 5 países en cuestión es en promedio de 112 toneladas por año de Telurio para el periodo 2007-2010, si a esto se le agregan las supuestas 50 toneladas por año que Estados Unidos produce, entonces da un promedio de 162 toneladas al año. Este valor, que corresponde a mediciones reales dista bastante de la producción mundial que el mismo USGS estima para el periodo 2007-2010. La institución norteamericana sostiene que en este periodo la producción de Telurio del mundo osciló entre 450 y 500 toneladas por año (USGS, 2007-2010). Esta estimación concuerda con lo propuesto por los investigadores de la universidad de Moscú que sostienen que la producción de Telurio para el año 2010 osciló entre 500 y 600 toneladas (Kul'chitskii & Naumov, 2010).

De esta forma se concluye que la producción histórica reciente de Telurio es materia de discusión dentro del ámbito público y privado y sólo se puede aseverar que la producción oscila entre 200 (WMS) y 500 (USGS) toneladas por año. Además está evidenciado que los principales países productores en este periodo han sido Bélgica, Canadá, Estados Unidos y Japón. Sin embargo para efectos del trabajo posterior es necesario determinar cuál fuente será la considerada y dado que la cantidad de países catastrados en la base de datos del WMS es superior a la hecha por el USGS se tiene que la información provista por WMS es más fidedigna y por lo tanto será la considerada para futuros análisis en esta investigación.

Respecto del consumo durante este periodo es complejo encontrar fuentes de información para cada uno de los años, sin embargo existen ciertas estimaciones cualitativas por parte del USGS que serán además complementadas con estimaciones cuantitativas que tanto el USGS y Phillip Crowson realizaron para algunos años en particular.

Comenzando con la información se tiene que el consumo mundial y de Estados Unidos tuvo el siguiente comportamiento durante este periodo (USGS, 2005), (Crowson P. , 1991), (Crowson P. , 1998).

**Tabla 5.2.2.2-3 Consumo mundial y EEUU de Telurio en toneladas**

<b>Región</b>	<b>Fuente</b>	<b>1990</b>	<b>1995</b>	<b>1996</b>	<b>2004</b>
Estados Unidos	Mineral Handbook	80	96	122	107
	USGS	34	46	74	63
	Diferencia	46	50	48	44
Mundial	Mineral Handbook	215	246	277	-
	USGS	-	-	-	220
Participación EE UU	Mineral Handbook	37%	39%	44%	49%

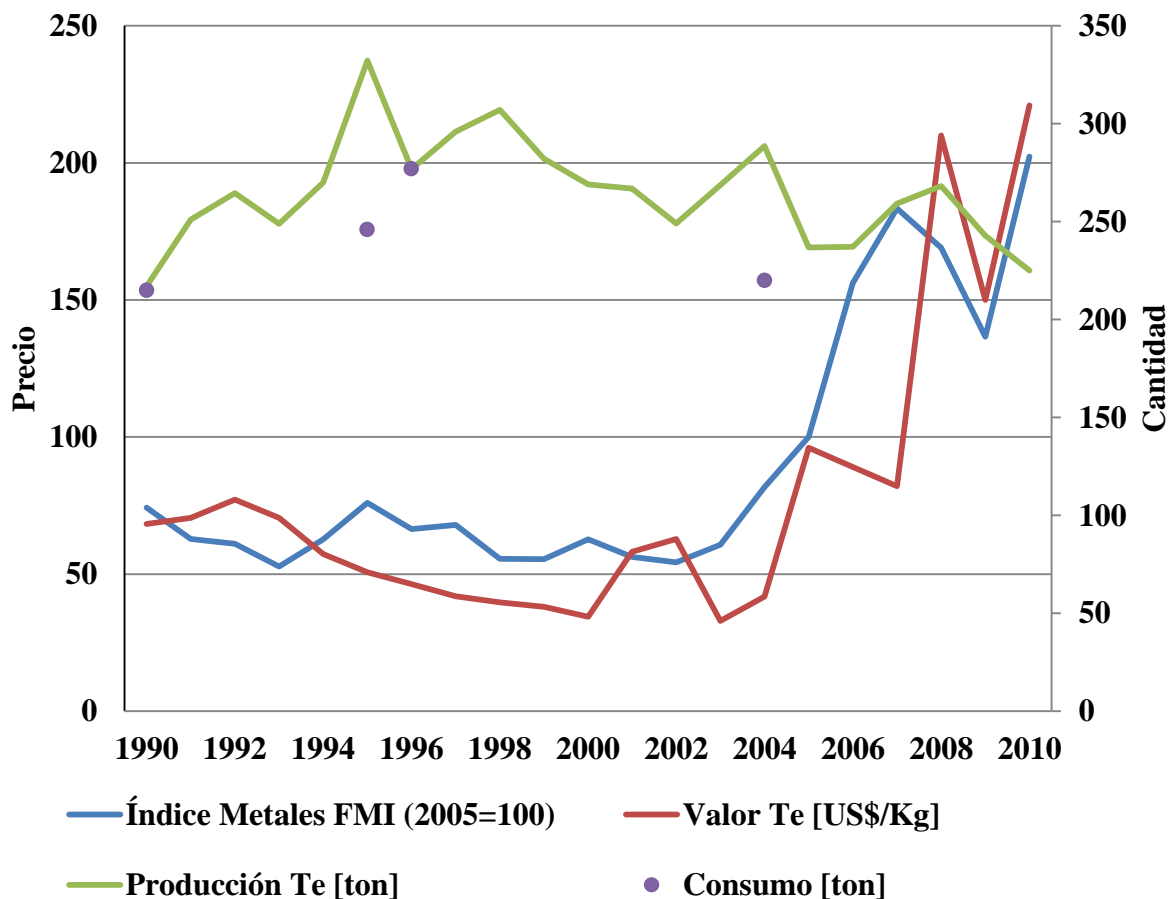
Elaboración propia. Fuente: Mineral Handbook, USGS

Se destaca de estos valores que para el caso de Estados Unidos la producción estimada entre el USGS y el Mineral Handbook difiere en 50 toneladas, que justamente corresponden a la estimación de la producción de Estados Unidos, es decir en otras palabras el USGS reporta la importación de Telurio de Estados Unidos de forma que no sea posible deducir la producción interna. Destaca además que el valor estimado de la producción de EEUU para el año 2004 (en color rojo) no fue obtenido de la fuente directamente (Mineral Handbook) si no que fue supuesto en función de la producción reportada por el USGS para dentro de Estados Unidos, agregándole además la producción interna del país norteamericano y restando finalmente su exportación de Telurio. La participación de Estados Unidos en el consumo mundial de Telurio para el año 2004 (también en rojo) se estimó a partir del valor anteriormente deducido.

Luego se tiene que las estimaciones de la producción mundial son congruentes entre sí puesto que si bien no tenemos el reporte para un mismo año, ambas publicaciones concuerdan en que en esos años la producción oscilaba entre 200 y 250 toneladas de Telurio al año.

Respecto de las aplicaciones en este periodo, existe concordancia entre las diversas fuentes de que a nivel mundial la principales aplicaciones fueron en aleaciones metalúrgicas ya sea ferrosas o no ferrosas (entre un 50 y un 75% a lo largo del periodo). Este valor fue un poco menor para Estados Unidos, donde un 50% fue para aleaciones ferrosas y un 10% para las no ferrosas. Destacar que esta tendencia se mantuvo a nivel mundial sin embargo en EE UU (que representa cerca de un 40% del consumo) a medida que se avanzó en el tiempo se fue trasladando su consumo de aleaciones a la industria química (que incluye los usos en gomas industriales) y al sector de xerografía (fotocopias), este último a mediados de la última década tendió a decaer hasta valores prácticamente nulos puesto que se introdujo la tecnología de compuestos orgánicos en la industria de las fotocopias lo que indujo una reducción total en el consumo de Telurio. Esta disponibilidad relativa de Telurio fue utilizada por aplicaciones electrónicas (celdas solares y artículos termoeléctricos) que para el año 1996 no estaban en los usos principales y en menos de 10 años (2004) alcanzó el 22% del consumo interno de Telurio. Para fines del año 2010 el panorama global era completamente distinto, siendo la principal aplicación mundial de Telurio las celdas solares (40%), los artículos termoeléctricos (30%), aleaciones metalúrgicas ferrosas y no ferrosas (15%) y por último en gomas industriales (5%). (USGS, 2011)

Finalmente se tiene que el precio del Telurio ha tenido, durante este periodo un comportamiento bastante similar a la mayoría de los principales mercados mineros. Es relevante destacar que en los últimos años la presencia de especuladores en el mercado del Telurio ha tenido consecuencias en su precio, estos especuladores apuestan al almacenamiento de Telurio para una futura comercialización a un precio superior al adquirido (USGS, 2005). Si se compara por ejemplo con el índice de metales del Fondo Monetario Internacional que considera los mercados del Cobre (27%), Aluminio (36), Hierro (3.6%), Estaño (0.4%), Níquel (3%), Zinc (1.7%), Plomo (0.6%) y Uranio (1.4%) se obtiene el siguiente gráfico



**Gráfico 5.2.2.2-2 Precio Te, Índice de metales (FMI) y Producción Te (WMS)**

Elaboración propia. Fuente: FMI, USGS, WMS

Queda en evidencia entonces que el precio del Telurio ha tenido un comportamiento similar al resto de los metales, destacando el ya reconocido aumento de los precios de estos productos en los últimos diez años, pasando el índice desde un valor de 60 en el año 2003 para que siete periodos después el índice posea un valor de 200, lo que le entrega un crecimiento anual promedio de 19%. Para el caso puntual del Telurio se tiene que en este mismo periodo el precio cambio desde 33 US\$/Kg hasta 221 US\$/Kg, esto induce un crecimiento anual promedio de 29%.

Luego, si bien el crecimiento entre ambos valores es distinto (19% y 29%) se tiene que las importantes variaciones anuales del precio del Telurio hace que este tipo de estadística sea fuertemente dependiente del periodo considerado, en otras palabras si para el caso del Telurio se considera el periodo 2002/2010 entonces el precio aumento desde 63 US\$/Kg hasta los 221 US\$/Kg antes mencionado. En este caso el crecimiento equivalente anual es de 18%, bastante similar a lo encontrado para el índice de precios del FMI.

De esta forma, más que comparar crecimiento, es interesante identificar que las tendencias son muy similares, incluso situaciones locales como la ocurrida entre los años 2008-2010 donde ambos curvas presentan un decaimiento muy similar en el año 2009.

Respecto del precio del Telurio en sí, ocurre que a comienzos de la primera década del periodo hubo un consumo de Telurio que no era esperado (aumentó el uso en aleaciones con acero) y que por lo tanto consumió prácticamente la totalidad de los inventarios existentes en ese entonces, prueba de esto es que para el año 1990 la producción estimada se iguala al consumo estimado de Telurio, este fenómeno que sólo ocurrió a comienzos de esa década indujo un panorama más estable en los precios para esos años, para luego decaer producto de un exceso de oferta comparado con la demanda existente (USGS, 2012).

A partir del 2005, aumentan fuertemente las especulaciones realizadas en el mercado del Telurio, puesto que su aplicación en la manufactura de celdas solares de alta eficiencia supuso que no existía una oferta suficiente del elemento para abarcar el insipiente mercado fotovoltaico. Sin embargo las apariciones de nuevas tecnologías y el abaratamiento de costos de las más antiguas han mantenido en suspenso la interrogante si la actual infraestructura del mercado del Telurio es suficiente para proveer de este elemento a la demanda de paneles fotovoltaicos. Prueba de eso, y como lo veremos en la sección de actualidad del mercado, es que el año 2012 el precio medio del Telurio fue de 155 US\$/kg, mientras que sólo un año atrás el precio supero los 340 US\$/kg.

La diferencia entre lo ocurrido a comienzos de 1990 donde el aumento de la demanda relativo a la oferta indujo una estabilización del precio, mientras que en el 2005 las especulaciones indujeron un aumento importante del precio del Telurio deja en evidencia que este mercado se ve más influido por variables especulativas que por variaciones en la oferta y demanda, esto es propio de mercados que son subproductos y cuyo volumen en dinero (que es pequeño) permite que las variables especulativas influyan de forma muy importante en la dinámica del mercado.

### **5.2.2.3 Actualidad (2010-2012)**

Para los últimos tres años la producción de Telurio a nivel mundial se estima cercana a las 500 toneladas, por un lado el USGS publicó que para el año 2011 su estimación de producción de Telurio correspondía a un valor entre 500 y 550 toneladas y que durante el año 2012 esta producción tendió a caer levemente (USGS, 2012) y (USGS, 2013). Esto concuerda con lo publicado por (Kul'chitskii & Naumov, 2010) donde para el año 2010 se estimó una producción entre 400 y 600 toneladas, este valor discrepa fuertemente de la producción estimada por el World Metal Statistics para este mismo periodo, donde de acuerdo al buró el año 2010 la producción fue de 225 toneladas.

Queda la duda entonces de por qué existe una diferencia tan relevante entre las dos primeras fuentes y la tercera, y se tiene que probablemente se deba a que el WMS obtiene una estimación a partir de la información que recopilan de diversos países y a partir de eso estiman la producción como la suma agregada de las producciones consideradas. Por su parte el USGS y la Universidad de Moscú probablemente lo estimen a partir de tendencias mundiales del mercado del Telurio y no como una suma agregada de producciones por país.



Prueba de esto es que para ninguna de estas dos instituciones la producción global reportada se asemeja a la suma agregada por país que ellos mismos han reportado. Luego si bien la estimación de estos países es menos precisa se tiene que guardan más relación con el mercado que lo publicado por el WMS puesto que no corresponde a una suma agregada sino más bien a una estimación de a partir de tendencias. De esta forma se estima que la producción actual de Telurio oscila alrededor de 500 toneladas por año.

Respecto a los países participantes de esta producción, se tiene una situación bastante poco explicativa. En la siguiente tabla se presenta la producción por país, agregada y estimada para los tres años de este periodo en función de distintas fuentes de información

**Tabla 5.2.2.3-1 Producción de Telurio 2010, 2011 y 2012**

Producción Telurio	WMS	USGS	
	2010	2011	2012
Bélgica	60	-	-
Rusia	20	34	35
Japón	49.8	40	35
China	7	-	-
Kazajistán	20	-	-
Uzbekistán	10	-	-
Canadá	8	6	-
Chile	0.2	-	-
Estados Unidos	50	50	50
Perú	0	-	-
Total Agregado	225	130	120
Estimación	-	525	500

Elaboración propia. Fuente: USGS, WMS Yearbook

Queda en evidencia que la producción por país es congruente entre ambas fuentes si es que el país fue considerado por las dos publicaciones. Casos como esto son Rusia y Japón donde la variación de producción posee cierta continuidad, en el caso de Estados Unidos los números en rojo corresponden a mantener la producción que este país ha tenido los últimos 10 años (según el WMS) puesto que el USGS no publica la producción interna de ese país.

Por otro lado existen importantes países productivos que no son considerados por ambas fuentes, ejemplo son Bélgica con más de 60 toneladas por año y los países de la ex unión soviética que para el año 2010 produjeron más de 30 toneladas. Esto claramente provoca un desconocimiento importante sobre este mercado, en particular si se considera que en el mejor de los casos (mediciones del WMS) prácticamente la mitad de producción mundial de Telurio estimada no se conoce el país de referencia. De esta forma se vuelve difícil determinar los principales productores de Telurio del mundo, y simplemente se maneja la estadística de la mitad de este mercado.

Respecto del consumo no existe información oficial para estos tres años en cuestión. El USGS publicó por última vez el año 2004 su estimación del consumo mundial de Telurio. A partir de ese año simplemente se ha referido a si el consumo ha variado o no respecto del año anterior. De esta forma se estimó que el año 2004 el consumo mundial alcanzó las 220 toneladas (USGS, 2005) y que en los siguientes años el consumo tendió a aumentar (en el 2005, 2007, 2008, 2010 y 2011) y a disminuir (en el 2006, 2009 y 2012) respecto del respectivo año anterior.

Suponiendo que esta unidad de medida “levemente” se mantiene constante en el tiempo se tiene que actualmente el consumo mundial de Telurio debe ser superior a las 220 toneladas por año, tal vez algo cercano a 300 toneladas. Por otro lado se tiene que la Universidad de Moscú estima el consumo chino entre 80 y 100 toneladas para los últimos años (Kul’chitskii & Naumov, 2010), si a esta estimación se le agrega el balance nacional del consumo de Telurio que realiza el USGS para Estados Unidos entonces se podría obtener una estimación bastante general del consumo mundial de Telurio.

**Tabla 5.2.2.3-2 Flujos de Telurio en EEUU en toneladas**

<b>Flujo [ton]</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>
Importación + Producción	42	71	55
Exportación	59	39	70
Producción	50	50	50
Consumo interno	33	82	35
Importación + Producción	92	121	105

Elaboración propia. Fuente: USGS

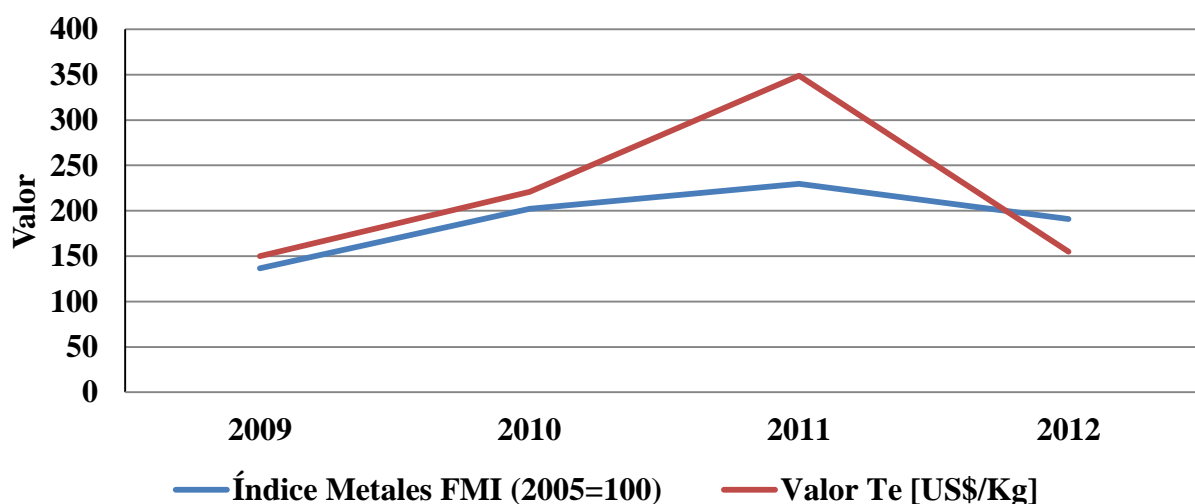
De esta información se desprende que Estados Unidos ha tenido un consumo interno promedio de 50 toneladas los últimos tres años, lo que se suma al consumo medio de China que corresponde a 100 toneladas por año, entregando un total de 150 toneladas. Es evidente que el consumo mundial de Telurio supera esta suma agregada puesto que sus aplicaciones son globalmente utilizadas y no es razonable considerar que más del 60% de la producción de un mercado no es consumido.

Otra forma de abordar la estimación del consumo de Telurio del mundo es posible a través de tres factores claves:

- a. El año 2011 la producción mundial de paneles solares de Cadmio Telurio fue de 2 GWp (Giga watt peak) (Fraunhofer, 2012).
- b. Por cada GW de potencia instalada en paneles de tecnología CdTe se consumen entre 69 y 100 toneladas de Telurio (Woodhouse, Goodrich, Margolis, James, Lokanc, & Eggert, 2012) y (USGS, 2012).
- c. Durante el año 2011 el consumo de Telurio en celdas solares representó un 40% del consumo mundial (Selenium Tellurium Development Association, 2012).

A partir de estos tres factores se puede estimar que el consumo mundial de Telurio para el año 2011 fue entre 345 (para el caso de 69 toneladas por GWp producido) y 500 toneladas (para el caso de 100 toneladas por GWp producido). Estos valores parecieran ser bastante razonables puesto que se acercan más a la producción estimada a nivel mundial. Respecto de la distribución del consumo del Telurio en función de la aplicación se tiene que para el año 2012 el 40% eran paneles fotovoltaicos, 30% equipos termoeléctricos, 15% en aleaciones metalúrgicas (ferrosas y no ferrosas), 5% en gomas industriales y un 10% restante en otras aplicaciones menores.

Finalmente el precio del Telurio en estos últimos tres años ha sufrido importantes variaciones, las cuales han sido controladas principalmente por las especulaciones realizadas sobre una eventual escasez de Telurio para la tecnología de paneles solares. Esta escasez debía generar un aumento sustancial en el precio del Telurio (año 2011) sin embargo ya para el año 2012 las especulaciones fueron disminuidas por la reducción de costos de paneles de menor tecnología que le quitaron mercado a este tipo de paneles.



**Gráfico 5.2.2.3-1 Precio del Telurio e Índice de Metales FMI**

Elaboración propia. Fuente: FMI, USGS

Como se había visto en el periodo de historia reciente el precio del Telurio tenía un comportamiento acorde a lo ocurrido con el resto de los metales, sin embargo ya en la actualidad, sobre todo durante el año 2011, el precio del Telurio aumenta en mayor forma si se compara con el índice del FMI, esto refleja lo comentado previamente sobre el hecho de que durante este periodo las especulaciones en el Telurio tuvieron un rol fundamental en la definición de su precio.

Suponiendo entonces que en la actualidad la producción mundial de Telurio se acerca las 525 toneladas por año, y que durante los últimos tres periodos el precio ha tenido un valor medio de 240 US\$/Kg entonces el mercado de este elemento es de 126 MUS\$.

### **5.2.3 Aplicaciones, sustitutos y reciclaje**

A pesar de tener una historia de mercado relativamente corta si se compara con otros metales como el Cobre o el Hierro, se tiene que el Telurio posee un historial de aplicaciones muy variado y en distintas situaciones, algunas recién emergiendo (fotovoltaicas y termoeléctricos) y otras aplicaciones que en su momento fueron importantes pero que en la actualidad han sustituido este elemento por otros de distinta índole (xerografía). De esta forma se puede decir que el Telurio ha experimentado la sustitución completa en algunas aplicaciones y en otras se ha visto recién comenzando a ser partícipe y pareciese no poseer sustituto.

En términos generales se tiene que el Telurio posee dos particularidades que le dan la mayoría de sus aplicaciones: ser un metaloide con lo que aumenta la “maquinabilidad” de ciertos metales (aleaciones ferrosas y no ferrosas) y ser un fotoconductor con lo que cambia sus propiedades eléctricas como resistencia y carga electroestática al ser sometido a luz, estos cambios permiten su aplicación en celdas solares y xerografía respectivamente. Respecto de la sustitución del Telurio se tiene que es posible en algunas de sus aplicaciones metalúrgicas, sin embargo se pierde un poco de eficiencia en el proceso. En sus aplicaciones más electrónicas existen dos casos, para los paneles solares no existe sustitución del Telurio directamente sino que existen otras tecnologías fotovoltaicas; para el caso de los termoeléctricos el Telurio es sustituible; además de que diversas aleaciones pueden jugar un rol similar.

Por último se tiene que el reciclaje del Telurio hoy en día representa menos del 10% de la oferta mundial del elemento y generalmente es recuperado de sus aplicaciones electrónica (Enterprise and Industry European Commission, 2010) aunque como veremos más adelante se espera que esta tasa vaya en aumento.

En el capítulo 8.2 de anexos se analiza en detalle cada una de las principales aplicaciones que tiene y ha tenido el Telurio a lo largo de su historia.

### **5.2.4 Chile y el mercado del Telurio**

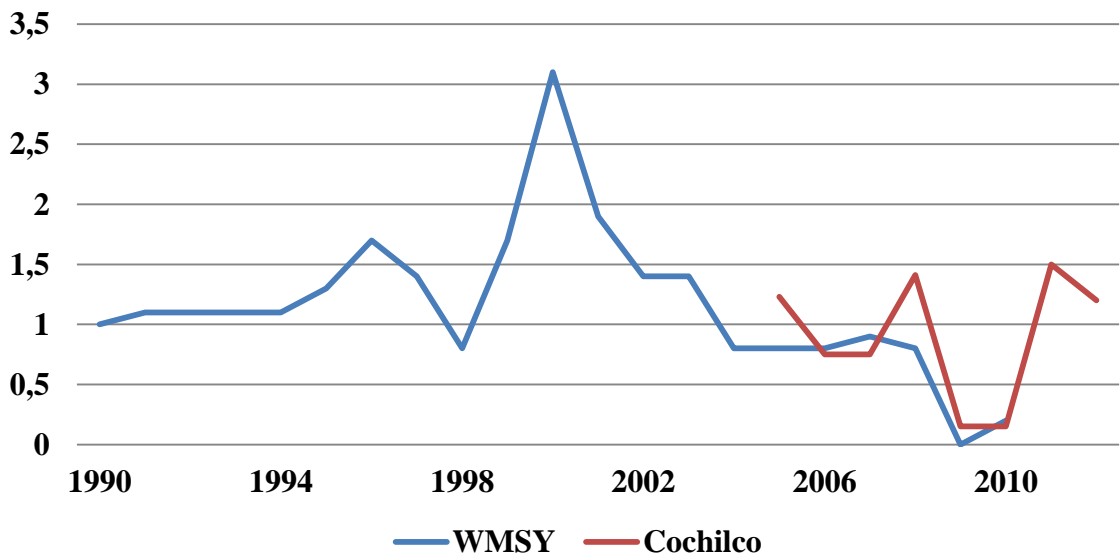
En términos generales se puede decir que la producción de Telurio es altamente dependiente de la producción de Cobre, esto pues más del 90% de la producción mundial de Telurio se obtiene a partir de la maquila de los barros anódicos de Cobre. De esta forma la producción de Cobre y la capacidad de fundición y refinería de un país corresponden a las claves estratégicas para determinar su potencial como partícipe del mercado mundial de Telurio. Cabe entonces estudiar en profundidad el caso de Chile, puesto que siendo el país con la mayor producción de Cobre del mundo por más de dos décadas y cuya actual capacidad de refinería lo ubica en el segundo país con mayor capacidad instalada para este proceso, su participación en el mercado del Telurio ha sido más bien opaca o prácticamente inexistente si se compara con el potencial que posee.

El objetivo de esta sección es realizar un análisis en detalle de la participación de Chile en el mercado del Telurio, luego estimar cuál ha sido la producción aparente de Telurio en el país para luego cuantificar el valor comercial que no hemos sabido recuperar. Como lo veremos más adelante Chile ha tenido una leve producción de Telurio a lo largo de los últimos veinte años y a pesar de ser el segundo país de mayor producción de barro anódico, las comercializaciones de éste último no consideran como elemento pagable al Telurio, por lo que en otras palabras Chile ha estado “regalando” casi su totalidad de producción de Telurio al mundo.

Respecto de las fuentes de información a utilizar en esta parte del trabajo, se cuenta con la producción publicada por el World Metal Statistics además de la base de datos de la Comisión Chilena del Cobre (Cochilco) donde existe registro de los contratos de minerales que han ocurrido en el país. Con esta información y considerando supuestos técnicos responsables será posible alcanzar los objetivos planteados.

**5.2.4.1 Participación histórica**

De acuerdo al World Metal Statistics Chile ha producido Telurio entre 1990-2010 con un valor medio de 1.16 toneladas de refinado al año. Por su parte, de acuerdo a la base de datos manejada por COCHILCO entre los años 1990 y 2012, la única empresa minera que ha reportado la comercialización de Telurio ha sido CODELCO y sólo entre los años 2005-2012, durante ese periodo el promedio de producción alcanzó 0.9 toneladas de Telurio refinado al año.



**Gráfico 5.2.4.1-1 Producción chilena de Telurio en toneladas**

Elaboración propia. Fuente: WMS Yearbook, Cochilco

En el gráfico anterior se observan que entre los años coincidentes entre ambas fuentes de información, 2005-2010, la producción publicada por ambas son bastante coincidentes, sólo en los años 2005 y 2008 los valores son divergentes, además en general COCHILCO publicó una producción mayor a la hecha por el buró. Es importante destacar que de acuerdo al conocimiento del autor, CODELCO tuvo dos plantas de metales nobles (Chuquicamata y Ventanas), en estas plantas se trataban los barros anódicos producidos en las tres refinерías de Codelco (Chuquicamata, Ventanas y Paipote) y se recuperaba Oro, Plata, Selenio y algunos platinoides, sin embargo el Telurio nunca fue parte del proceso productivo de Codelco. Es probable que lo registrado por COCHILCO como comercialización de Telurio corresponda más bien a un subproducto de las plantas de metales nobles de Codelco, el cuál era rico en Telurio sin embargo no era producción de Telurio refinado. Esto es claramente una suposición y se funda en el hecho de que nunca ha sido publicada la recuperación de Telurio refinado en las operaciones de la cuprífera.

Respecto de la información obtenida en la base de datos de COCHILCO se tuvo acceso a los destinos de estas comercializaciones, destacando principalmente China y Bélgica.

**Tabla 5.2.4.1-1 Destinos Comercialización de Telurio en Chile**

<b>Destino</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>
Bélgica	-	0.75	-	-	-	0.15	-	-
Canadá	-	-	-	-	-	-	-	0.3
Chile	-	-	-	-	-	-	-	0.45
China	1.23	-	0.75	1.41	0.15	-	-	0.45
Estados Unidos	-	-	-	-	-	-	0.9	-
Filipina	-	-	-	-	-	-	0.6	-
Total	1.23	0.75	0.75	1.41	0.15	0.15	1.5	1.2

Elaboración propia. Fuente: Cochilco

Desde una perspectiva de la comercialización de los barros anódicos producidos en Chile se tiene que este producto es tranzado bajo las partidas arancelarias “Barros Anódicos de Plata” y/o “Barros Anódicos de Oro” y en ambos casos los “elementos pagables” (entiéndanse como aquellos elementos por los que se realiza un pago en la transacción del barro) corresponden a: Plata, Oro, Paladio, Platino (algunas veces) y Selenio (algunas veces), así el contenido de Telurio de estos barros no es parte de la negociación que ocurre al respecto. De acuerdo a la base de datos anteriormente citada se tiene que para el periodo 1990-2012 sólo hubo transacciones de barro anódico (ya sea de Plata o de Oro) a partir del año 2004 en adelante.

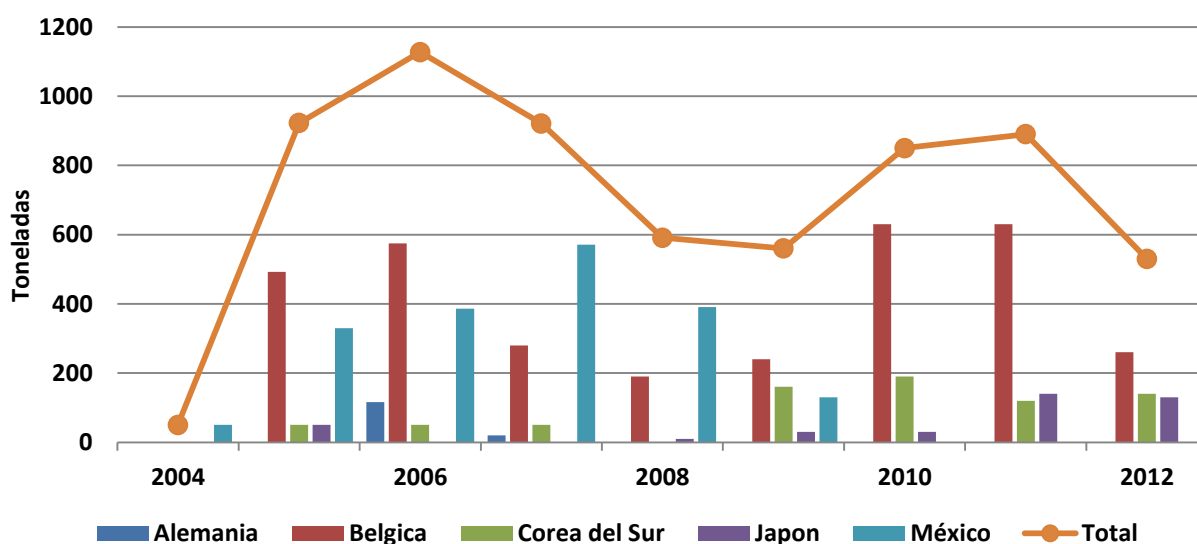
Particularmente la comercialización de los barros anódicos de Oro ocurrió entre los años 2005 y 2006 siendo los principales destinos Bélgica nuevamente y México. En la siguiente tabla queda resumida la información a la cual se tuvo acceso.

**Tabla 5.2.4.1-2 Cantidades [ton] y destinos de comercialización de Barros Anódicos de Au**

País	2005	2006
Alemania	27	9
Bélgica	70	24
Japón	9	0
México	63	48
Total	169	81

Elaboración propia. Fuente: Cochilco

Por su parte, los barros anódicos de Plata conforman un volumen muchísimo mayor y su comercialización abarcó desde el año 2004 hasta la actualidad. Nuevamente destacan como principales destinos Bélgica y México. En el siguiente gráfico queda expresada la información a la que se tuvo acceso.



**Gráfico 5.2.4.1-2 Cantidades [ton] y destinos de comercialización de Barros Anódicos de Ag**

Elaboración propia. Fuente: Cochilco

Resaltan como análisis diversos fenómenos, sin embargo lo principal es el importante rol que juegan Bélgica y México como destino de los barros anódicos de Plata, juntos representan más del 80% del total de barro comercializado desde Chile. Esto evidentemente se condice con el hecho de que Bélgica anualmente posee una producción de 60 toneladas de Telurio (el productor más importante de acuerdo a las estadísticas consideradas) mientras que su participación en la producción de Cobre desde la mina es prácticamente nula.

Respecto de México no existe estadística asociada a producción de Telurio, sin embargo entre los años 2004-2011 el país ha producido más de 23,800 toneladas de “barras de Cobre aleadas con Telurio” según reporta el Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2004-2011), las que significaron más de 200 millones de dólares en exportación de productos metálicos con manufactura.

Así queda evidencia que la importación de barros anódicos en México aportó, entre otras materias primas, Telurio para la manufactura de barras de Cobre aleadas. Cabe destacar que aparentemente no existe producción de Telurio en México, han existido intentos pero ninguno se ha materializado (Green 2008), y tampoco el país es importador de Telurio (de acuerdo a la estadística presentada por el SGM) por lo que la única fuente de Telurio para México son los barros anódicos de Plata que importa desde Chile. Por último destacar que en los últimos tres años Chile dejó de exportar barro anódico a México por lo que es probable que el país norteamericano haya buscado otras fuentes de barro anódico o directamente de Telurio.

Otro fenómeno relevante es que la producción nacional de barro anódico se estima en 1,500 toneladas anuales (basado en la producción de Cobre refinado), sin embargo en ninguno de los años donde se obtuvo acceso a los acuerdos comerciales las transacciones de barro alcanzan esos volúmenes, en el mejor de los casos el año 2006 se comercializó 1,100 toneladas, esto puede deberse a que durante esos periodos CODELCO si estaba operando su planta de metales nobles de Ventana (la de Chuquicamata ya estaba cerrada), o simplemente no se tuvo a la totalidad de los acuerdos.

De esta forma se tiene que diversos países, como Bélgica y México, han sabido agregar valor a su industria metalúrgica mediante la adquisición de productos no elaborados como es el barro anódico del cual han recuperado entre otros elementos el Telurio y han sabido incorporarlo en sus diversas industrias como las barras de Cobre aleadas con Telurio (México) y productos químicos de CdTe para celdas solares (Bélgica).

#### **5.2.4.2 Producción aparente**

Dado entonces que Chile participa de manera muy menor en el mercado del Telurio, que la comercialización del barro anódico producido en el país no considera al Telurio como “elemento pagable” y que además por su condición de principal productor de Cobre posee un potencial interesante para expandir su participación en el mercado en cuestión, se vuelve relevante estudiar cual ha sido la producción aparente de Telurio en Chile durante los últimos años y cuantificar cuanto valor se ha perdido al no ser considerado en las comercializaciones de los barros anódicos.

Evidentemente en esta sección sólo se podrá medir el valor perdido en función del contenido de Telurio que se dejó de pagar, sin embargo debe ser necesario considerar la pérdida que tendrá en el tiempo el hecho de que Chile no haya tomado un rol más activo en el mercado de Telurio.



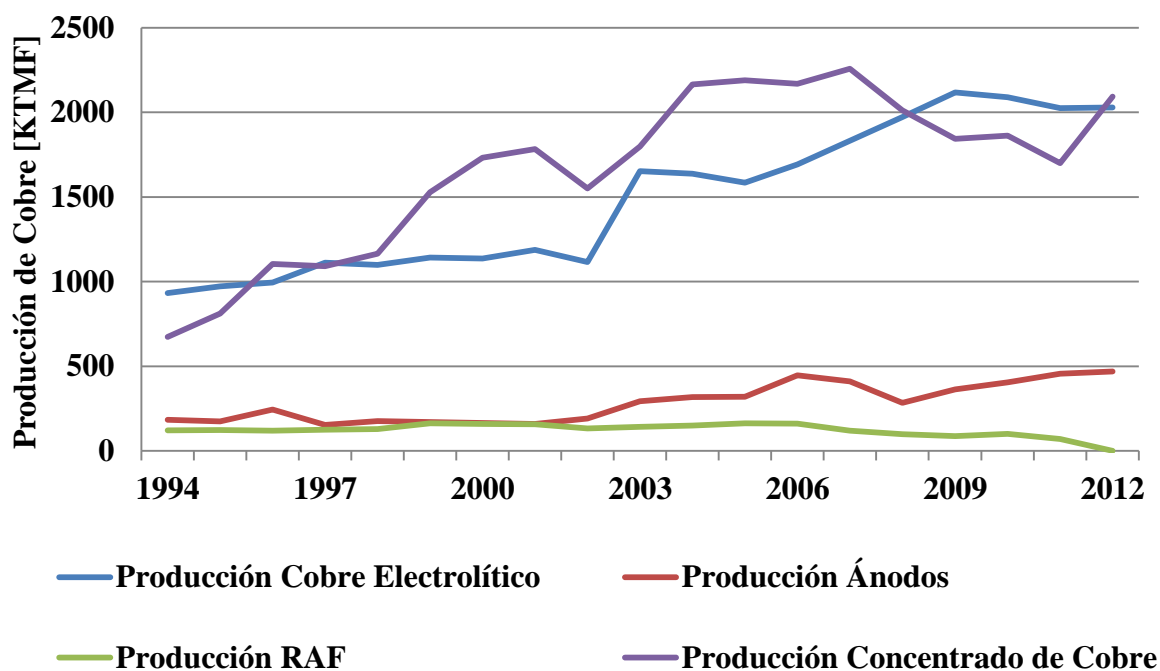
Esto claramente es complejo de cuantificar sin embargo es relevante tenerlo presente.

Respecto a las consideraciones técnicas necesarias para estimar la producción aparente de Telurio en Chile es necesario distinguir las tres situaciones en las que la industria chilena de Cobre extrae de manera “involuntaria” Telurio, estas son: Telurio refinado, Barro anódico, Ánodos de Cobre, Cobre refinado a fuego (RAF) y Concentrado de Cobre. Para cada una de estas situaciones será necesario realizar una serie de supuestos que se proceden a detallar:

- a. Telurio refinado: se considerará que la producción chilena reportada por el WMS para así poder abarcar un intervalo de tiempo mayor. Esta cantidad será descontada del Telurio que no es comercializado
- b. Barro anódico: basado en la literatura anteriormente citada se supondrá una ley que Telurio en el barro que oscila entre 0.5 y 3% en peso, además se considerará una recuperación metalúrgica de un 30%.
- c. Cátodos de Cobre: se estimará que por cada tonelada de cátodo de Cobre electrolítico se obtendrán 1.5 kilogramos de barro anódico.
- d. Ánodos de Cobre: se supondrá que por cada tonelada de ánodo de Cobre que se electro-refina se obtiene 1.5 kilogramos de barro anódico de iguales características que el descrito en el punto b. Esto puesto que la pérdida de masa en el proceso de electro-refinación es despreciable.
- e. Cobre RAF: se supondrá que de ser electro-refinado, en vez de refinado a fuego, la cantidad y características del barro anódico producido es la misma.
- f. Concentrado de Cobre: se supondrá que la ley de Cobre es de 30% y que un 90% de éste sería recuperado para formar Cobre electrolítico. Este Cobre electrolítico también producirá 1.5 Kilogramos de barro anódico por tonelada de Cobre obtenida.

Finalmente las producciones de los cuatro últimos productos anteriormente especificados serán basadas en el anuario de COCHILCO emitido el año 2013. Luego la simulación se basará en estimar la real producción de barro anódico que se obtiene a partir de la industria chilena de Cobre, ya sea a partir de su concentrado, de sus ánodos o aquel barro que realmente se obtiene en Chile, luego considerando las leyes de Telurio en el barro y su recuperación metalúrgica se podrá estimar el valor que se ha perdido.

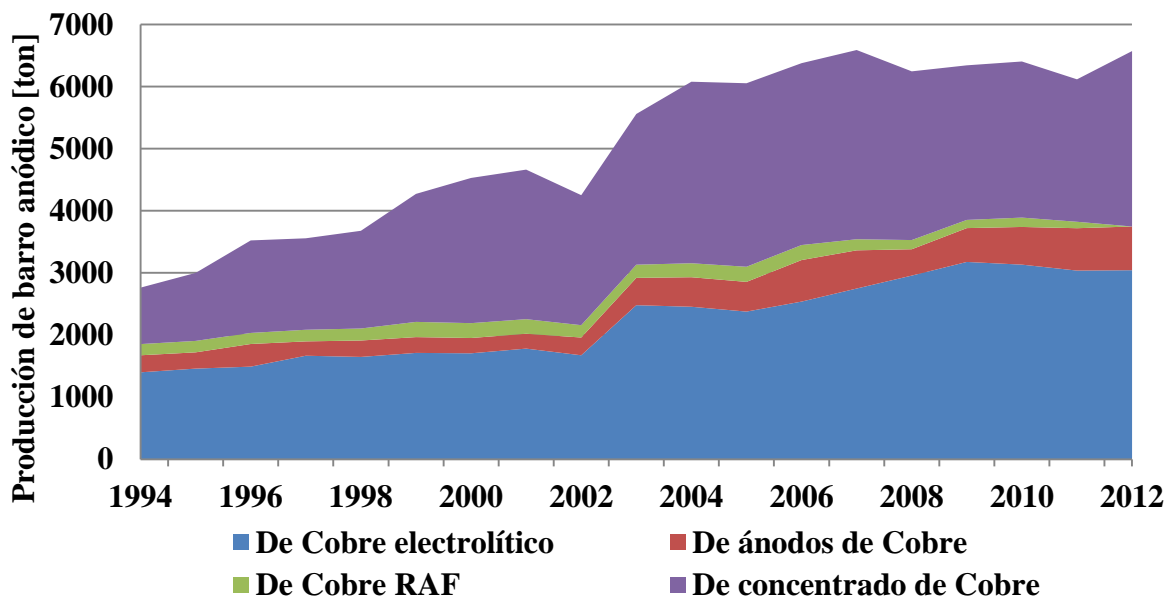
En el siguiente gráfico queda representada la producción de cátodos, ánodos, RAF y concentrado de Cobre de acuerdo a las estadísticas de COCHILCO



**Gráfico 5.2.4.2-1 Producción de Cobre por producto 1994-2012 [KTMF]**

Elaboración propia. Fuente: Cochilco

Basado en los supuestos anteriormente discutidos es posible realizar una estimación de la producción aparente de barro anódico en Chile. En el siguiente gráfico se muestra el resultado.

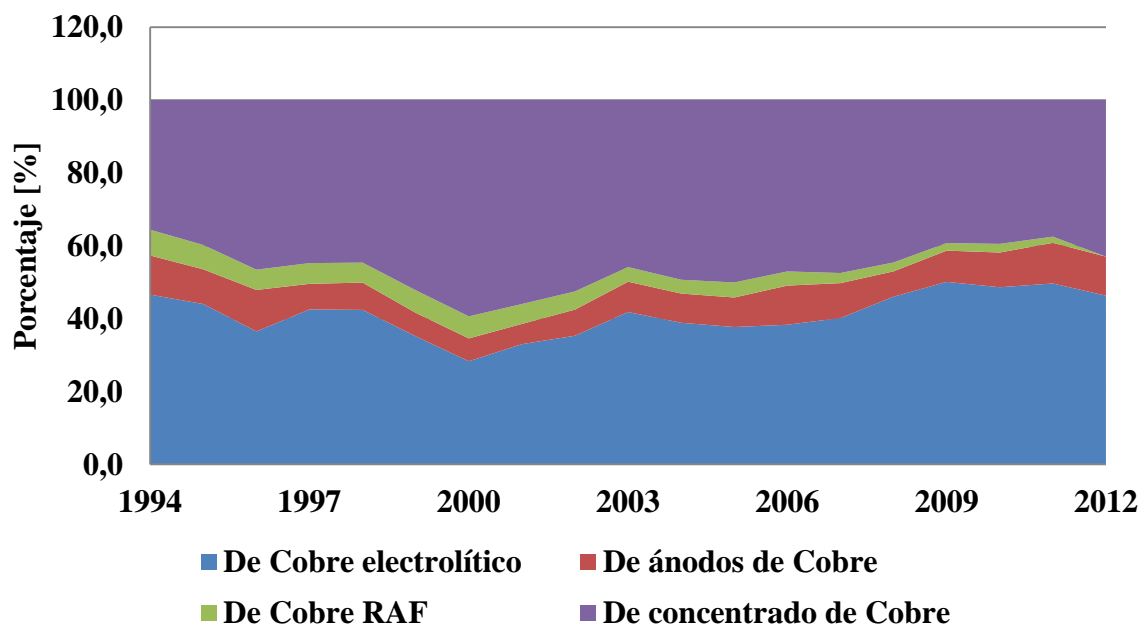


**Gráfico 5.2.4.2-2 Producción de barro anódico a partir de productos de Cobre**

Elaboración propia. Fuente: Cochilco

Del gráfico anterior queda en evidencia que el Cobre electrolítico y el concentrado de Cobre son los productos que producen la mayor cantidad de barro anódico en Chile. Esto se da únicamente por los volúmenes de producción de ambos productos en Chile. Es importante recalcar que si bien el Cobre RAF y los ánodos de Cobre representan las fuentes pequeñas de barro anódico, desde el punto de vista industrial son más interesantes puesto que dado su nivel de avance en el proceso metalúrgico ya fueron sometidos a la fundición por lo tanto sólo resta la refinación eléctrica, proceso de menor inversión y de menor impacto ambiental por lo que la viabilidad económica-ambiental de recuperar el Telurio de estos barros anódicos es mayor si se compara con la idea de recuperarlo a partir del concentrado de Cobre que no es fundido en Chile.

Luego para comprender tanto la producción de Telurio refinado que Chile ha dejado de lado y el valor que también ha perdido se debe considerar que durante el periodo 1994-2012 el país ha tenido una pequeña producción de Telurio la cuál será descontada a la producción aparente de Telurio que Chile podría tener a partir de su producción de cátodos de Cobre. Así la distribución de valor perdido y Telurio refinado por producto de Cobre queda representada en el siguiente gráfico.



**Gráfico 5.2.4.2-3 Distribución de valor y Telurio refinado perdido por Chile 1994-2012**

Como era de esperar el Telurio contenido en el barro anódico del Cobre electrolítico y en el concentrado de Cobre representan la mayor fracción del valor y del metal que se ha perdido. El Cobre electrolítico perdió cierta relevancia puesto que se le descontó la producción actualmente reportada por el WMS.

En la siguiente tabla se presenta la producción real de Telurio como porcentaje de la producción aparente de Telurio refinado a partir de la producción de cátodos de Cobre.

**Tabla 5.2.4.2-1 Producción real de Telurio 1994-2012**

Pérdida	Contenido mínimo Te	Contenido máximo Te	Contenido medio Te
Producción real	32%	5%	18%

Elaboración propia. Fuente: Cochilco

Respecto de los valores absolutos de Telurio refinado y valor monetario es necesario recordar que la ley de Telurio posee un rango en el barro anódico por lo tanto el valor y metal perdido también oscila dentro de un rango. Aclarar además que el concepto de Telurio refinado considera la recuperación metalúrgica (30%) dentro del balance.

En la siguiente tabla se resumen estos valores para el caso de menor ley de Telurio (0.5%), de mayor ley (3%) y ley media (1.75%).

**Tabla 5.2.4.2-2 Rangos de Valor y Telurio perdido entre 1994-2012**

Pérdida	Contenido mínimo Te	Contenido máximo Te	Contenido medio Te
Telurio Refinado [ton]	127.7	872.0	499.8
Valor [MUS\$]	14.9	95.7	55.3

Elaboración propia. Fuente: Cochilco

Quedan evidencia entonces dos fenómenos, el primero es netamente productivo y tiene que ver con el hecho de que Chile no ha aprovechado su verdadera producción de Telurio asociada a su industria del Cobre, el total de Telurio que ha verdaderamente comercializado representa en promedio un 18% de lo que ha producido a partir de los barros anódicos obtenidos desde 1994 hasta la actualidad. Este número se vuelve muchísimo menor cuando se considera el global de la industria del Cobre del país donde la producción de Telurio asociada al país representa menos del 4% de lo que realmente Chile le ha entregado al mercado.

El segundo fenómeno es económico y ocurre que el valor monetario directo del Telurio que se ha “regalado” al mercado no puede de ninguna forma compararse al valor de la industria del Cobre ni tampoco a la de cualquier otro mineral producido en Chile. En otras palabras no se puede decir que desde el punto estrictamente económico Chile ha perdido una cantidad importante de dinero. Sin embargo es evidente también que Chile ha perdido una oportunidad de atraer las industrias asociadas a la producción de Telurio, principalmente metalurgia y sus aplicaciones, para que sean desarrolladas en Chile.

Ocurre que desde el punto de vista minero Chile es el país con la mayor cantidad de reservas de Telurio del mundo como en su momento lo publicó Crowson (Crowson P. , 2001), y dado que es el principal productor de Cobre y el segundo productor de Cobre refinado también es de esperar que sea el principal productor de Telurio del mundo y a pesar de esto no ha sabido utilizar esta posición estratégica en pos de diversificar su industria minera, avanzar en la cadena de valor de los productos que comercializa y finalmente aportar en hacer del país uno más industrial y desarrollado.

Como se verá en los próximos capítulos, se abordará la atractividad del mercado y la competitividad que podría un eventual productor de Telurio en Chile, en esa etapa se incluirá un análisis en profundidad de como Chile puede hacer uso de esta posición estratégica considerando principalmente que es un mercado que tenderá a expandirse y que aquellos países que logren adelantarse a esta expansión lograrán hacer uso de una situación privilegiada que los permitirá ser partícipes relevantes en este mercado.

### 5.3 Demanda del Telurio

La demanda, entendida como una función que describe el consumo esperado durante un intervalo de tiempo de un elemento en función de diversas variables (como precio entre otras), es compleja de describir cuando el elemento o producto en cuestión se trata de un metal cualquiera. Esto porque al no ser consumido de forma directa (excepto el Oro y otras piedras y metales preciosos) su demanda se produce de forma transitiva por la demanda del producto final, este producto consume o requiere de metales para su manufactura por lo que la demanda del producto induce una demanda derivada en el metal en cuestión.

Puntualmente para el caso del Telurio se tiene como ejemplo los paneles solares. No existe un consumidor de Telurio en forma pura (ya sea como bien durable o consumible), sin embargo la demanda de paneles solares delgados de tecnología de CdTe induce, o deriva, una demanda sobre el mercado del Telurio y por ende el mercado de las celdas solares tendrá una gran influencia en el del Telurio, sobre todos si se considera que actualmente el 40% de la demanda mundial de este elemento se destina a la industria fotovoltaica. Es evidente que este mercado no ha sido y no será el único factor que determina la demanda de Telurio por lo que se vuelve interesante poder comprender y analizar aquellas variables que han gobernado y que gobernarán la demanda de Telurio en el mundo.

Desde una perspectiva más académica John Tilton, en su tratado de “The Metals”, define que las variables más relevantes al momento de comprender la demanda derivada de un metal son el ingreso (medido como Producto Interno Bruto generalmente), el precio del metal, los precios de los elementos sustitutos y complementarios, cambios tecnológicos que puedan venir, preferencias de los consumidores y finalmente actividades gubernamentales.

Ahora bien sería interesante poder abarcar cada uno de estos puntos e incluso agregar más variables que sean propias del Telurio o de los productos que lo consumen, sin embargo dado el nivel de información que se dispone, que para el consumo es bastante reducida, en algunas ocasiones será necesario ajustar estos análisis a aplicaciones puntuales (y no al mercado completo) y a países puntuales, en particular Estados Unidos que es del cual más información se conoce respecto de su consumo de Telurio.

### 5.3.1 Factores que influyen en la demanda

#### Ingreso

Desde un punto de vista cualitativo es de esperar que el consumo de Telurio aumente a medida que la riqueza de un país en particular vaya aumentando, esto se debe a que aplicaciones como los paneles solares o los equipos termoeléctricos son insumos más bien recientes y de un nivel relativamente alto de tecnología y precio (es más económico producir energía en una central termoeléctrica que mediante paneles solares), luego los países que pueden consumir estas tecnologías son aquellos de mayor riqueza y donde la preocupación ambiental (emisiones de CO<sub>2</sub> entre otras) sean parte de los problemas que la sociedad busca resolver.

Claramente este tipo de preocupaciones no son prioritarias en países cuyas problemáticas sean la satisfacción de necesidades básicas como la comida y el acceso a agua potable. De esta forma es de esperar que sean los países de mayor riqueza los que consuman la mayor parte del Telurio. Esto en cierta parte es comprobado con el hecho de que Estados Unidos ha representado en los últimos veinte años más del 30% del consumo mundial de Telurio, sin embargo se pone en duda si se considera que China posee un consumo similar.

Si el problema se aborda desde una perspectiva cuantitativa es posible identificar como ha ido cambiando el consumo de Telurio en Estados Unidos a medida que el país se ha ido volviendo cada vez más rico (PIB per cápita). Haciendo un balance entre producción interna de Telurio (WMS), importación y exportación (USGS) y considerando además el producto interno bruto y per cápita del país (Banco Mundial) se obtuvo el siguiente perfil

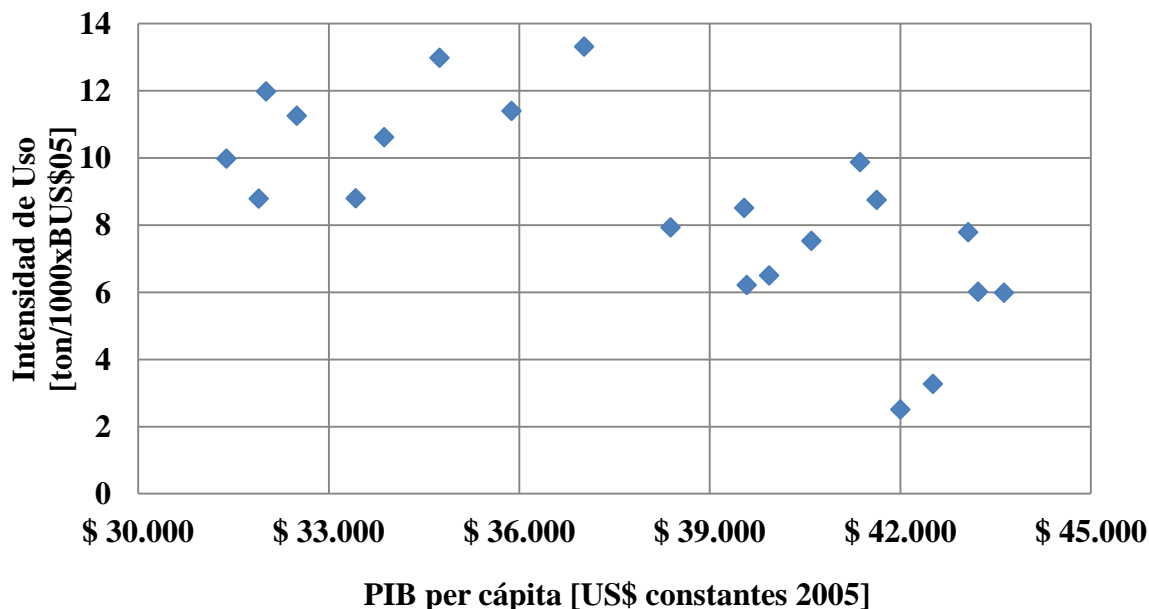


Gráfico 5.3.1-1 Intensidad de uso del Telurio en EEUU

Elaboración propia. Fuente: WB, WMS, USG

A partir de este resultado no es posible afirmar lo anteriormente descrito de forma cualitativa, incluso más los resultados aparentan ir en la dirección opuesta. A nivel general se perciben dos grupos de familia, la primera ubicada ente los 32,000 y 36,000 dólares per cápita y con una intensidad de uso entre 8 y 13 toneladas por cada trillón (americano) de producto interno bruto. La segunda familia de datos posee una riqueza mayor que oscila entre los 39,000 y 42,000 dólares, teniendo una intensidad de uso que oscila entre 8 y 2 toneladas por cada trillón de PIB. Esto podría interpretarse como que Estados Unidos ya superó la situación máxima de consumo (punto de mayor intensidad de uso) pero esto no tiene sentido puesto que la producción de energía mediante paneles solares aún está siendo validada y se encuentra en una situación emergente por lo que a medida que Estados Unidos aumente su riqueza podrá destinar mayor cantidad de recursos en la producción de energía renovable con lo que aumentaría su consumo de Telurio.

Es probable que en el gráfico anterior queden expuestos fenómenos particulares cómo la sustitución del Telurio en los equipos xerográficos, lo que redujo el consumo de Telurio en Estados Unidos, sin embargo su PIB creció por lo que localmente se genera una relación negativa entre ingreso y consumo. A esto se le agrega además que la tecnología de paneles solares se ha masificado en los últimos cinco años, periodo en el que Estados Unidos ha sufrido una crisis económica relevante por lo que nuevamente se genera una relación inversa entre consumo y riqueza.

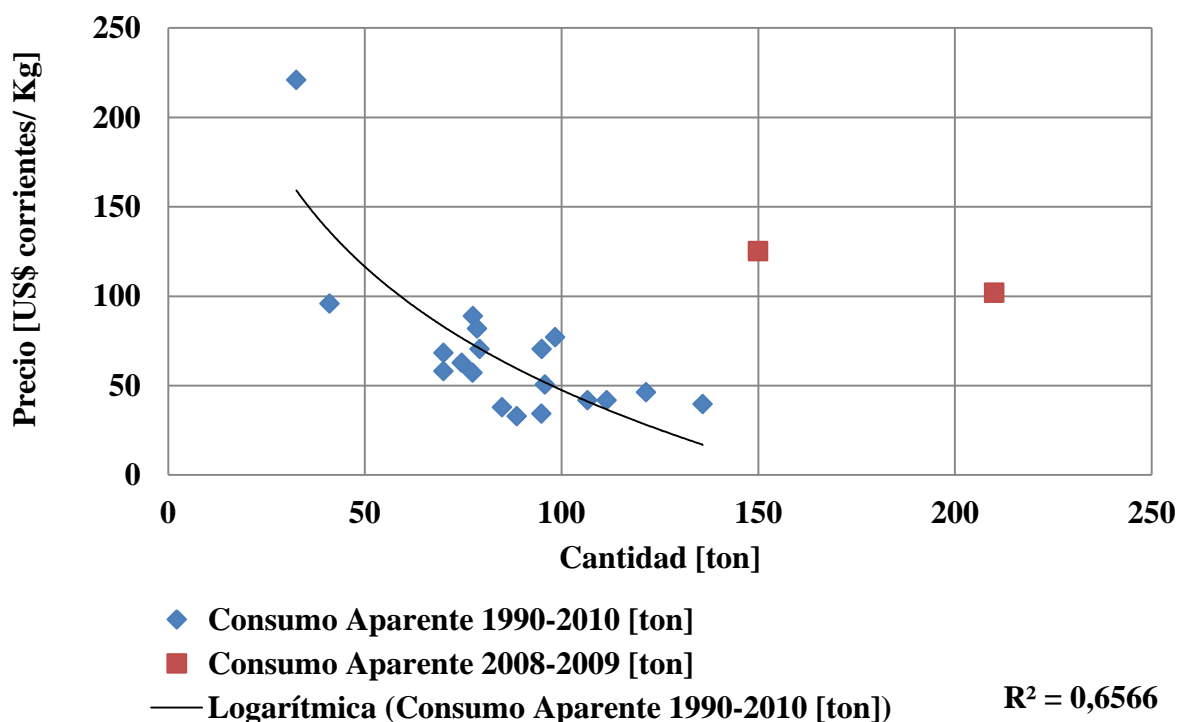
De esta forma no es posible asignarle una relación inversa o directa entre consumo de Telurio e ingresos, sin embargo la lógica económica indica que mientras los países se vayan enriqueciendo (aumentando PIB per cápita) estarán dispuestos a gastar en mayor forma en tecnologías energéticas que aporten a una mejor sostenibilidad ambiental, de lo contrario no sería posible que hoy en día los países más desarrollados se encuentren estudiando los elementos críticos energéticos como insumos necesarios para tener una generación y eficiencia eléctrica de mejor calidad ambiental.

Respecto de las otras aplicaciones menores (aleaciones, gomas industriales y otros) se tiene que el consumo ha sido estable en los últimos años, presentando ciertas variaciones pero que no están asociadas al nivel de riqueza del país.

## Precio

La demanda de Telurio guarda relación con su precio, sin embargo ésta ha cambiado en los últimos años, probablemente por la incorporación masiva de la tecnología fotovoltaica que utiliza este elemento. Nuevamente tomando el balance realizado en la sección anterior para Estados Unidos y considerando la serie de precios presentada por el USGS que ha sido utilizada a lo largo de este trabajo se tienen los siguientes resultados:





**Gráfico 5.3.1-2 Relación Precio-Demanda Telurio en EEUU**

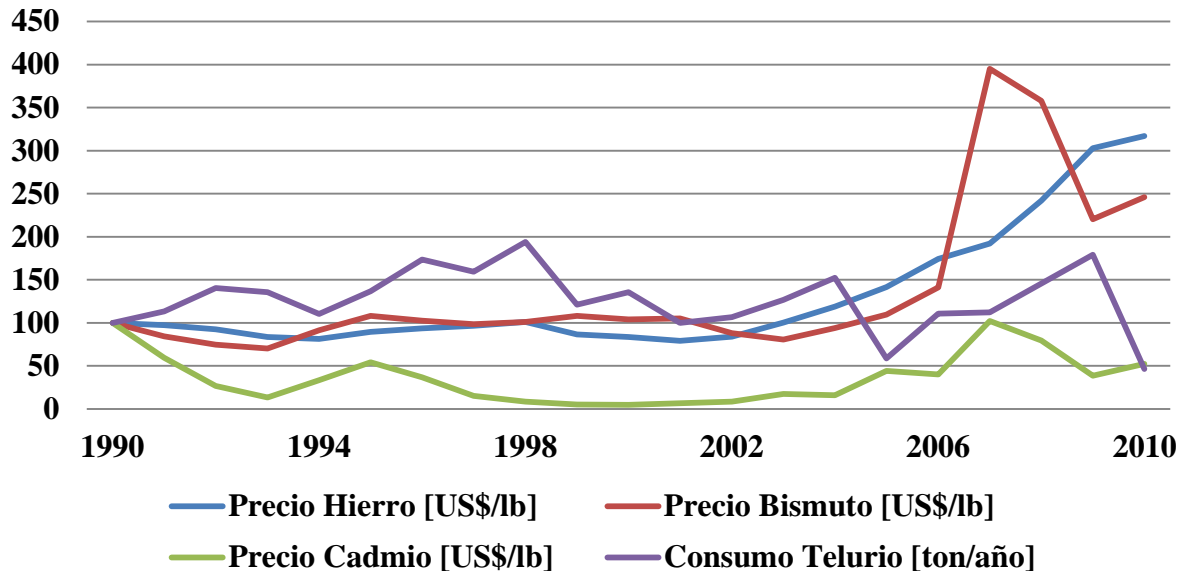
Elaboración propia. Fuente: USGS

En el gráfico anterior existen dos familias de datos. La primera, de color azul, corresponde a la relación de precio y cantidad demanda dentro de Estados Unidos durante los años 1990-2010 excluyendo los años 2008 y 2009, en esta serie es posible identificar cierta tendencia de que a menor precio la cantidad demandada aumenta, la correlación para una interpolación logarítmica es de 0.65. Luego si observamos la segunda familia, de color rojo, que corresponde a la misma relación que la familia anterior sólo que para los años 2008 y 2009 queda en evidencia que es un comportamiento totalmente distinto. Basta considerar que el máximo de consumo se obtiene al tercer mayor precio de toda la serie, de esta forma estos datos poseen cierta distorsión que de incorporarlos dentro de la serie la correlación disminuye a menos de 0.15.

Probablemente esta distorsión se deba a que especulaciones realizadas en ese periodo hayan elevado el precio de forma abrupta y por lo tanto en ese plazo los consumidores de Telurio no pudieron ajustar su proceso productivo y simplemente tuvieron que aceptar esta alza en el precio o tal vez no fue necesario si es que poseían cierto nivel de stock. Esta hipótesis se basa que a partir del año 2005 la tendencia interna de EEUU fue de aumentar su consumo progresivamente hasta que en el año 2010 vuelve a niveles similares a los del 2005. Esto claramente se debe al abrupto aumento de precios que ocurrió entre el año 2007 y 2008 en donde el precio del Telurio tuvo un aumento del 156%.

## Precios de sustitutos y complementos

La teoría económica sostiene que dos elementos son complementarios cuando la elasticidad cruzada de precio y de demanda es positiva, es decir cuando al disminuir el precio del bien complementario entonces la demanda por el bien en análisis aumenta. Para el caso del Telurio los bienes complementarios más característicos son los relacionadas a la industria de los paneles solares, equipos termoeléctricos y aleaciones ferrosas y no ferrosas. Se considerara para cada una de estas industrias los respectivos elementos complementarios: Cadmio, Bismuto y Hierro. En el siguiente gráfico queda representado el comportamiento del precio de estos tres elementos y el de la demanda de Telurio al interior de Estados Unidos. Destacar que para las cuatro variables se consideró como año base 1990 y además que la información de los precios es obtenida del USGS por lo tanto se trata de un análisis interno de la demanda del Telurio y sus complementos.



**Gráfico 5.3.1-3 Precios complementarios del Telurio y su consumo en EEUU (1990=100)**

Elaboración propia. Fuente: USGS

De lo anteriormente graficado no es posible ser concluyente de si estos elementos son teóricamente complementarios al Telurio, no por lo menos dentro de Estados Unidos. Antes del año 2004 pareciese que el precio del Hierro y Bismuto no poseían injerencia en la demanda de Telurio, mientras que el Cadmio parece poseer cierta relación. Sin embargo hasta antes de ese año las aplicaciones de celdas solares de CdTe eran principalmente un ejercicio de laboratorio por lo tanto no es posible asociar ese comportamiento similar entre ambas variables a su complementariedad en la industria fotovoltaica. A partir del año 2006 la relación del consumo de Telurio y el precio del Cadmio no se asemejan a las de dos bienes complementarios y mismo fenómeno ocurre con los otros dos elementos en cuestión: Hierro y Bismuto.

**Tabla 5.3.1-1 Elasticidades de Complementos**

Elemento	1990-2004		2005-2010	
	Elasticidad Cruzada	Desv. Estandar	Elasticidad Cruzada	Desv. Estandar
Bismuto	2.3	6.8	1.4	3.6
Cadmio	0.4	0.8	2.6	3.7
Hierro	-1.0	4.1	2.0	7.9

Elaboración propia

En la tabla anterior queda expuesto que el promedio de las elasticidades es menor que la desviación estándar de los valores, siendo caso extremo el Hierro donde la desviación estándar supera por casi cuatro veces el promedio en ambos periodos. Por su parte el bien con mejor comportamiento sería el Cadmio pues posee elasticidades cruzadas del mismo signo en ambos periodos y la desviación estándar de los valores es la menor en términos relativos a la media de la elasticidad, sin embargo para ambos periodos la variación de la elasticidad es un 100% y un 42% mayor que el promedio por lo que no es posible obtener resultados concluyentes.

Probablemente la baja relación entre los bienes complementos y el Telurio se explique con el hecho de que estas aplicaciones (termoeléctricos, aleaciones y paneles solares) no representan una parte importante del mercado del Bismuto, Hierro y Cadmio. A modo de ejemplo el 90% de las aplicaciones de Cadmio son en baterías de NiCd y en pigmentos (Moss, Tzimas, Kara, Willis, & Kooroshy, 2011) por lo que su consumo en paneles solares es sumamente bajo. Para el caso del Bismuto se tiene que la producción anual de este elemento supera las 8,000 toneladas a nivel mundial (USGS, 2013), por lo que se desprende que su aplicación en equipos termoeléctricos no representa un consumo importante, situación similar ocurre para el Hierro.

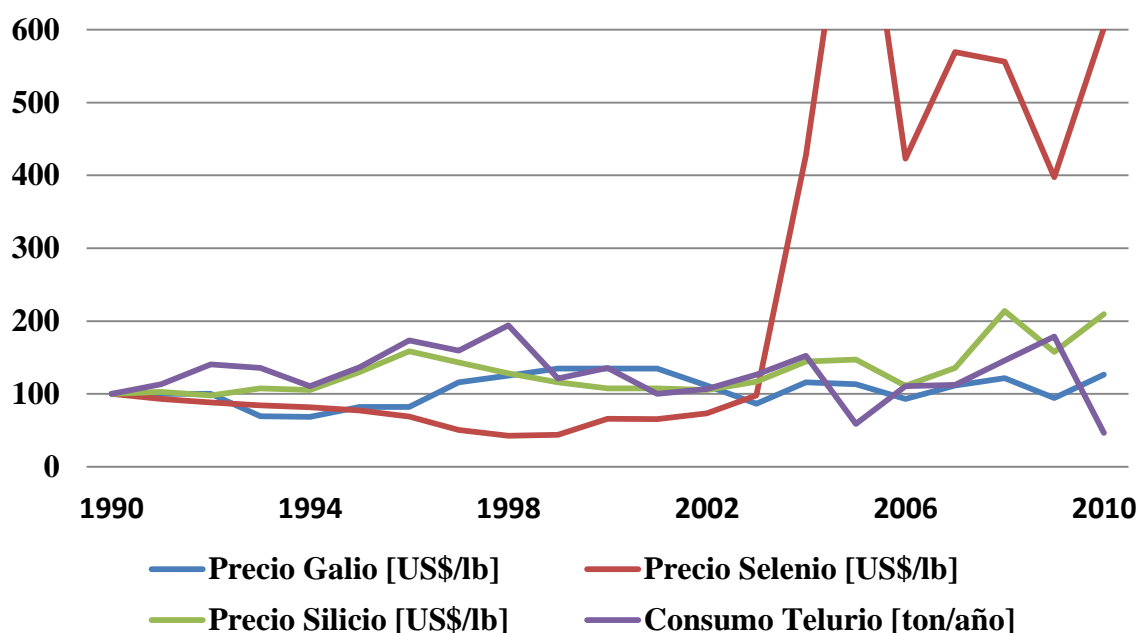
Contrario a los complementos, los bienes sustitutos poseen un comportamiento tal que al aumentar (o disminuir) el precio de un bien sustituto se tiene que el consumo del bien en cuestión aumenta (o disminuye). Para el caso del Telurio los bienes sustitutos más relevantes serían aquellos relacionados con las tres industrias principales: aleaciones, paneles solares y equipos termoeléctricos. Dado que no existe información suficiente de la industria termoeléctrica se considerarán el Silicio, Galio y el Selenio como los principales sustitutos del Telurio, siendo los dos primeros relacionados a la industria fotovoltaica y el tercero relacionada en prácticamente todas las aplicaciones que posee el Telurio fuera de la industria eléctrica, es decir aleaciones, industria química, gomas industriales y otros (USGS, 2013).

Destacar que el Galio forma parte de la segunda tecnología más importante de paneles solares delgados (después que la de CdTe) llamada CIGS (Copper Indium Gallium Diselenide por sus siglas en ingles), por lo que no es un sustituto directo del Telurio sino que está relacionado con la tecnología que sustituye a los paneles de CdTe.

Si bien se pudo optar por otros elementos como el Indio o Cobre se tiene que el mercado del Galio es de un volumen similar al del Telurio, 150 toneladas por años, y el consumo en tecnologías fotovoltaicas representa más del 2% del consumo mundial (Moss, Tzimas, Kara, Willis, & Kooroshy, 2011), por lo que estudiar la relación entre Telurio y Galio se vuelve más interesante. Por otro lado el Silicio es el insumo principal de la tecnología solar más relevante hoy en día a nivel mundial y es necesario en cualquiera de las versiones, mono-cristalino, poli-cristalino y otros, así al igual que el Galio el Silicio representa la sustitución de la tecnología de CdTe por paneles solares de Silicio.

Por último el Selenio posee un doble rol en el mercado del Telurio, si bien es un sustituto para todas las aplicaciones excluyendo las relacionadas con la industria eléctrica (aunque igual el Selenio está presente en las celdas CIGS), ocurre que el Selenio comparte su origen con el Telurio puesto que ambos se recuperan de los barros anódicos obtenidos en la electro-refinación de ánodos de Cobre por lo que en estricto rigor además de ser sustitutos también son co-productos o más concretamente ambos son subproductos del Cobre.

En el siguiente gráfico quedan representado las variaciones del precio de los tres elementos considerados: Selenio, Galio y Silicio, además del consumo interno de Telurio en Estados Unidos. Nuevamente la fuente de información de los precios es el USGS y se consideró como año base a 1990



**Gráfico 5.3.1-4 Precios sustitutos del Telurio y su consumo en EEUU (1990=100)**

Elaboración propia. Fuente: USGS

Destacar que por razones gráficas se truncó el gráfico para el precio del Selenio, puntualmente el año 2005 alcanzó 8.5 veces el valor del año 1990. En este caso se logra ver un comportamiento esperado para el Silicio, sin embargo no para el Galio y tampoco para el Selenio.

Para el caso del Silicio, quien es sustituto directo de la tecnología de paneles solares de CdTe, se ve que posee un comportamiento similar al consumo del Telurio, teniendo un alza entre 1990 y 1998 para luego decaer y volver a repuntar el año 2002. El año 2005 y el año 2010 ocurre un fenómeno de desacople entre ambas curvas (sube el precio del Silicio sin embargo el consumo de Telurio disminuye) pero probablemente se deba a situaciones puntuales puesto que la tendencia general es lo esperado desde el punto de vista teórico.

Por otra parte tanto el Galio como el Selenio no presentan un comportamiento esperado respecto de lo que ocurrió con el consumo de Telurio, el precio del Selenio tendió a aumentar cada vez que el consumo de Telurio disminuyó y viceversa, a su vez el Galio tiene un comportamiento oscilante en torno al precio del año 1990 y no se muestra una relación de esta variable con el consumo de Telurio.

**Tabla 5.3.1-2 Elasticidades de sustitutos**

Elemento	1990-2004		2005-2010	
	Elasticidad Cruzada	Desv. Estándar	Elasticidad Cruzada	Desv. Estándar
Selenio	-1.8	14.1	3.3	5.3
Galio	-3.9	9.6	1.0	3.0
Silicio	1.4	9.4	1.2	1.7

Elaboración propia

En la tabla anterior queda demostrado que no existe una elasticidad congruente entre el Selenio y el Telurio, y tampoco entre el Galio y el Telurio puesto que en ambas situaciones la elasticidad cambia de signo entre los dos periodos definidos y además la alta desviación estándar imposibilita obtener conclusiones respecto del comportamiento de ambas curvas.

Si bien este fenómeno pareciera darse también en el caso del Silicio se tiene que al tomar el periodo 1990-2004 se incluye el fenómeno local ocurrido el año 2005, fenómeno que cual posee una altísima elasticidad (más de 30), por lo que al considerar únicamente el periodo 1990-2003 el valor medio de la elasticidad cruzada del precio del Silicio con la demanda de Telurio es de -0.9 con una desviación estándar de 4.0 por lo que el comportamiento es diametralmente distinto si se compara con todo el periodo 1990-2004.

De todas formas no es posible asociar esta elasticidad negativa a un fenómeno de sustitución entre el Telurio y el Silicio puesto que en esa época las celdas de CdTe aún no eran masificadas como una tecnología disponible para la generación de electricidad a partir de energía solar. Luego, en el periodo donde si hubo competencia entre ambas tecnologías solares no logra quedar en evidencia un comportamiento sustitutivo entre ambos mercados.

Es probable, nuevamente, que esto se deba a que una fracción muy baja del mercado del Silicio está destinada a la manufactura de celdas solares (USGS, 2013)

### Cambios tecnológicos

Los cambios tecnológicos se refieren a modificaciones en una industria en particular que tendrán como efectos variaciones en la relación de esta industria con sus principales insumos. De esta forma los cambios tecnológicos pueden diferenciarse en tres tipos:

1. Una reducción en la cantidad necesaria de insumos para producir al mismo nivel
2. Creación de un nuevo producto que reemplaza a aquel que consumía el elemento en cuestión. Este nuevo producto no utiliza como insumo el elemento en análisis
3. Creación de una nueva tecnología que utiliza el elemento como insumo y por lo tanto genera escasez relativa para las antiguas aplicaciones del elemento.

Desde la perspectiva del Telurio se tiene que estos tres conceptos aplican fuertemente en su mercado y en la historia que han sufrido sus variadas aplicaciones. Las aplicaciones más tradicionales, entiéndase aleaciones ferrosas y no ferrosas, gomas industriales, pigmentos y detectores de infrarrojo, no debiesen sufrir grandes variaciones tecnológicas puesto que se tratan de industrias bastante maduras y que han estado en uso por más de 100 años. Sin embargo la aparición de nuevas aplicaciones, principalmente paneles solares y equipos termoeléctricos, han modificado el mercado del Telurio, principalmente porque han generado una escasez relativa de Telurio en sus aplicaciones más convencionales. Prueba de esto es el aumento que estas dos industrias han experimentado en la participación del consumo mundial de Telurio como fue analizado previamente.

Además de que han modificado la industria del Telurio, estas dos aplicaciones están sometidas a eventuales variaciones como las descritas anteriormente en los puntos 1 y 2, sobre todo las del primer punto puesto que al ser tecnologías nuevas es probable que a medida que las investigaciones vayan avanzando se logre optimizar la utilización de los insumos necesarios para la manufactura del producto. Como fue discutido anteriormente para los paneles de CdTe se tiene que la intensidad de uso varía entre 100 y 69 toneladas por GW de potencia instalada. Sin embargo se están llevando a cabo importantes esfuerzos en investigación para aumentar la eficiencia de conversión de los paneles solares y para reducir la intensidad de Telurio, lo que se espera converja en que sólo 13 toneladas de Telurio sean necesarias para instalar 1 GW de potencia (DoE, 2011). De lograrse este objetivo entonces la industria fotovoltaica de paneles de CdTe sufrirá un cambio importante que a su vez influirá fuertemente en el mercado del Telurio. Respecto de la posibilidad de que nueva tecnología sea creada y que reemplace a la actual se tiene que la gran competencia para la tecnología de CdTe es la tecnología CIGS puesto que también es de tipo delgada y por lo tanto la producción se puede masificar y simplificar al punto de producir rollos de celdas solares.

Para el caso de los equipos termoeléctricos se tiene que el mercado en sí es sumamente nuevo y además la utilización de Telurio en su manufactura es aún más reciente por lo que no es posible tener una idea de lo que podría ocurrir en el futuro, de todas formas dado la reciente incorporación del Telurio en esta tecnología es de esperar que en el corto y mediano plazo no se aparezcan nuevas tecnologías pero si se intentará en optimizar el consumo del Telurio en la manufactura del equipo.

#### Preferencias del consumidor y políticas de gobierno

Para el caso de la producción de energía eléctrica mediante paneles solares se tiene que las preferencias del consumidor (productores de electricidad) se han visto fuertemente influenciadas por diversas políticas de gobierno que buscan incentivar las fuentes de energía renovables no convencionales con el objetivo de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Esto claramente ha aumentado la demanda por paneles solares y por lo tanto estos dos factores de la demanda están íntimamente ligados. Otra política de gobierno que puede influir el mercado del Telurio fue lo propuesto por el Centro de Investigación Conjunta del Instituto de Energía y Transporte de la Comunidad Europea, donde se sugiere que para darle más holgura a la oferta de Telurio se debe incentivar la sustitución de este elemento en el restante de sus aplicaciones (Moss, Tzimas, Kara, Willis, & Kooroshy, 2011). Si bien hasta el momento no hay evidencia de que el consejo haya sido considerado, claramente es una señal de que probablemente haya un mayor involucramiento de los gobiernos en el mercado del Telurio.

Destacar que de todos los elementos analizados por Moss, et al, solamente para el Telurio se sugiere una intervención como al anteriormente explicada. Por su parte el Departamento de Energía de Estados Unidos, a través del Programa de Tecnologías Energéticas Solares ha entregado fondos para investigación y desarrollo con el objetivo de reducir la intensidad de uso de Telurio por unidad de potencia instalada en paneles (DoE, 2011).

Respecto de las otras aplicaciones no parecieran existir políticas de gobierno que busquen incentivar o desincentivar el consumo de Telurio, así como tampoco es de esperar que las preferencias de los consumidores de aleaciones ferrosas y no ferrosas con Telurio vayan a cambiar sus preferencias, sobre todo porque elementos como el Acero y el Cobre poseen grandes mercados cuyas variaciones en el consumo toman bastante tiempo dado que son mercados maduros.

Por último es interesante volver al tema de las celdas solares. Ocurre que el objetivo de la utilización de este tipo de tecnología busca reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmosfera y por lo tanto cualquier línea consecuente con ese objetivo debe buscar no solamente que la tecnología en sí sea “limpia” sino que también el proceso productivo del equipo generador también sea “limpio”.

En ese sentido First Solar, la principal productora de celdas de CdTe, tiene presente este dilema y por lo tanto ha rastreado y medido su huella de carbono en el proceso productivo de sus celdas. Esto obviamente la ubica, a la empresa y a la tecnología, en una situación más consecuente con el objetivo de los gobiernos por lo que no es de extrañarse que este tipo de tecnología vaya aumentando su participación en la producción de energía eléctrica mediante la conversión de la energía solar.



## 5.4 Oferta del Telurio

La oferta de un metal se entiende como la cantidad de este que los productores ofrecen al mercado, esta cantidad, al igual que la demanda, está determinada por diversas variables como precio, tecnología y otros sin embargo se le agregan además tres factores relevantes, el primero corresponde a la naturaleza del producto es decir si se trata de un producto principal, co-producto o sub-producto. En términos generales se tiene que el producto principal es el único que influye en la producción de la mina y debe ser capaz de solventar la totalidad de los gastos de la operación (excepto los gastos propios de un sub-producto si es que existe). Por su parte los co-productos corresponden a dos o más elementos que en conjunto determinan el ritmo de operación de la mina, entre ellos deben solventar los gastos en común y cada uno por su parte debe solventar sus gastos propios. Por último el sub-producto es tal que no influye en el ritmo de la mina y solo debe solventar el gasto asociado a su propia recuperación.

El segundo nuevo factor es que la oferta está compuesta por la suma agregada de dos tipos: la oferta primaria (metal o mineral extraído de la mina) y la oferta secundaria que a su vez se divide en dos tipos, la oferta secundaria nueva (metal recuperado a partir del reciclaje de los retazos obtenidos en la manufactura de productos finales) y la oferta secundaria vieja (metal recuperado a partir del reciclaje de productos que han sido desechados).

Un tercer factor relevante en la oferta de los metales y que no está presente en la estructura de la demanda, por lo menos no de forma directa, es la estructura del mercado. Cuando existen pocos (oligopolio) o sólo un (monopolio) oferente entonces la naturaleza de la oferta es completamente distinta en comparación a un mercado de competencia perfecta. Esto se debe básicamente al hecho de que como ocupa un lugar privilegiado entonces puede forzar el mercado a operar en un punto distinto al equilibrio económico obtenido en situaciones de competencia.

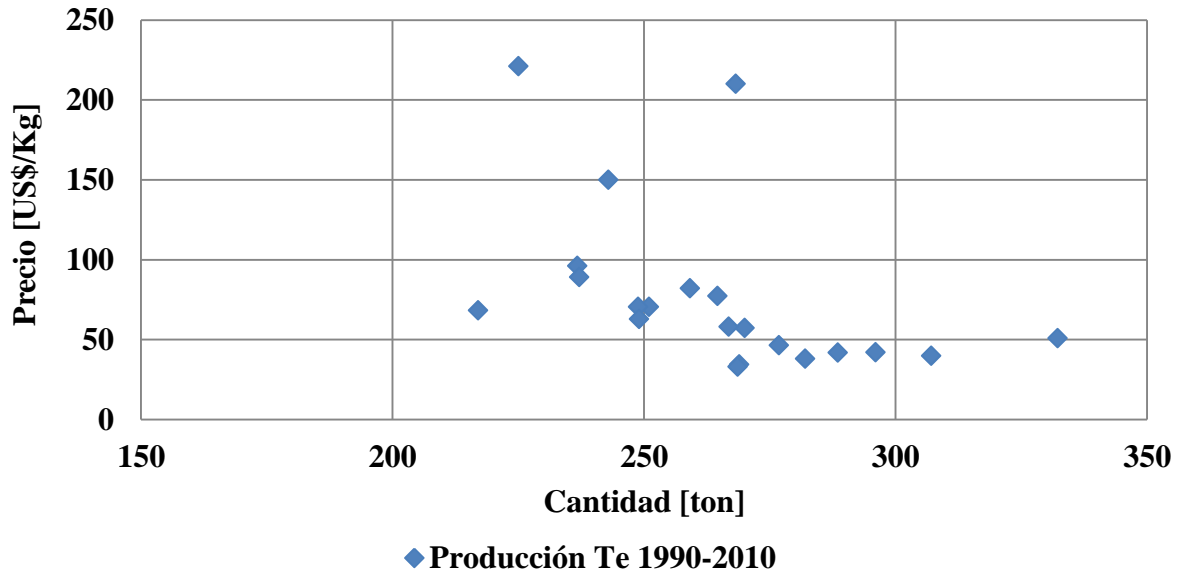
Es evidente que estos tres nuevos factores influyen en el caso particular del Telurio, puesto que como metal es un sub-producto de la industria del Cobre, en particular de la electro-refinación de los ánodos de Cobre. Este hecho induce que la oferta de Telurio no dependa únicamente de factores propios sino también de exógenos como son el la oferta o producción de Cobre y por lo tanto en la oferta de Telurio influyen de manera transitiva todos los factores influyen en la oferta de Cobre. Respecto de los tipos de oferta se tiene que hoy en día la oferta secundaria de Telurio no supera el 10% sin embargo es de esperar que este valor aumente a medida que los paneles fotovoltaicos vayan quedando sin uso y se obtendrá más del 95% del Telurio contenido en éste (First Solar, 2013). Por último la estructura del mercado influye bastante en la oferta pues como lo veremos más adelante existe cierto nivel de concentración de la oferta de Telurio en el mundo.

De esta forma y considerando nuevamente lo propuesto en “The Metals” por John Tilton se analizaran los siguientes factores que determinan la oferta mundial de Telurio: precio del Telurio, costo de producción, cambios tecnológicos, oferta de Cobre, actividades gubernamentales y estructura del mercado.

## Precio del Telurio

Para comprender la relación entre el precio del Telurio y la producción mundial se consideró la siguiente información. Entre el año 1990 y 2010 se optó por utilizar el reporte de producción de Telurio entregado por el World Metal Statistics, respecto del precio se seguirá utilizando el reportado por el USGS en su base de datos. Destacar que si bien el WMS no logra captar la totalidad de la producción mundial puesto que no considera a todos los países, es posible comprender si el comportamiento de los países considerados por el buró está influenciado de alguna manera por el precio del metal.

En el siguiente gráfico queda representado el comportamiento entre ambas variables, y su relación no parece condecirse con lo esperado desde el punto de vista histórico.



**Gráfico 5.4-1 Oferta mundial del Telurio**

Elaboración propia. Fuente: USGS, WMS

La teoría económica propone que al existir un aumento en el precio de un producto o metal la oferta de este debiese aumentar de acuerdo a la capacidad que posea la industria ya sea en el corto, mediano o largo plazo. Sin embargo este fenómeno estuvo distante de ocurrir en el mercado del Telurio, incluso al contrario, entre 1990 y 2010 la producción tendió a disminuir en función del precio o tal vez una lectura más económica diría que el precio se ha mantenido constante en ese periodo (cerca a los 50 US\$/Kg) sin embargo la producción durante ese periodo tuvo una variación muchísimo mayor que osciló entre 200 y 300 toneladas por año.

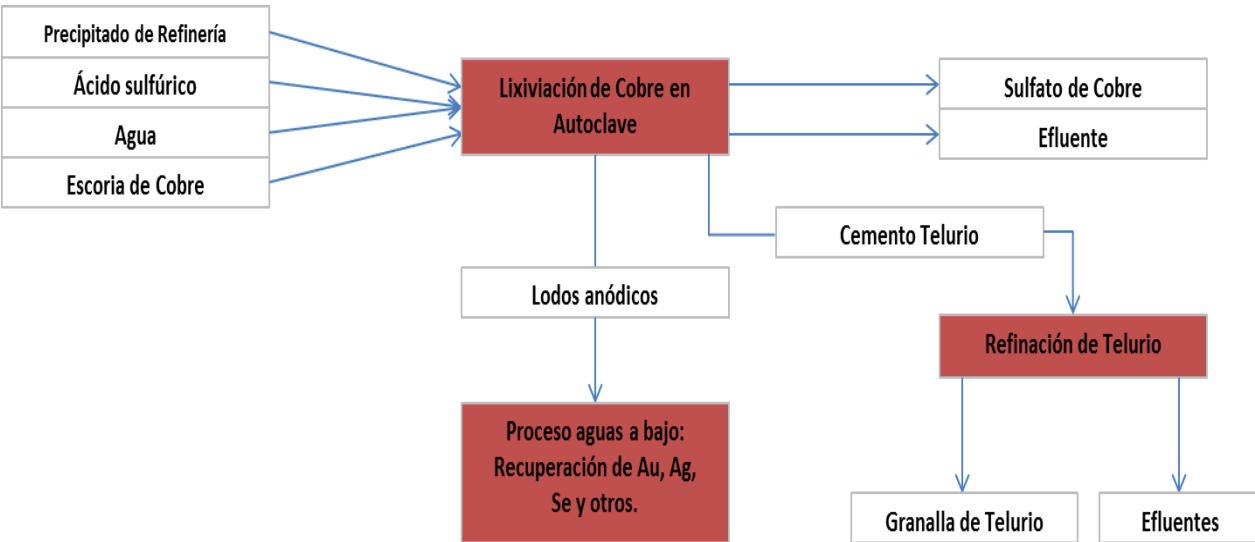
De esta forma si bien el precio se mantuvo relativamente constante, la producción varió de manera drástica pasando desde menos de 225 toneladas por año a más de 325 en un mismo periodo. Esto deja en evidencia que el precio del Telurio no fue una variable relevante al momento de que una empresa decidiera producir Telurio o no.

Este fenómeno probablemente se deba al hecho de que al ser un subproducto del barro anódico (que a su vez es un sub-producto del Cobre) las empresas metalúrgicas que maquilaron estos barros para producir los diferentes metales que lo constituyen no lograron influir ni en la cantidad de barro producido en las refinerías de Cobre ni tampoco en la ley de Telurio. Así los oferentes simplemente entregaron al mercado la cantidad de Telurio que las refinerías produjeron.

**Costo de producción**

Dado que el nivel de información disponible sobre el proceso de producción de Telurio es prácticamente nulo, se vuelve necesario realizar una mirada general del proceso para luego estimar cuál ha sido el comportamiento del costo de producción de Telurio.

A partir de la declaración ambiental entrega por Codelco para su futura planta de metales nobles en Mejillones se logró identificar las principales etapas del proceso que quedan representadas en el siguiente diagrama.



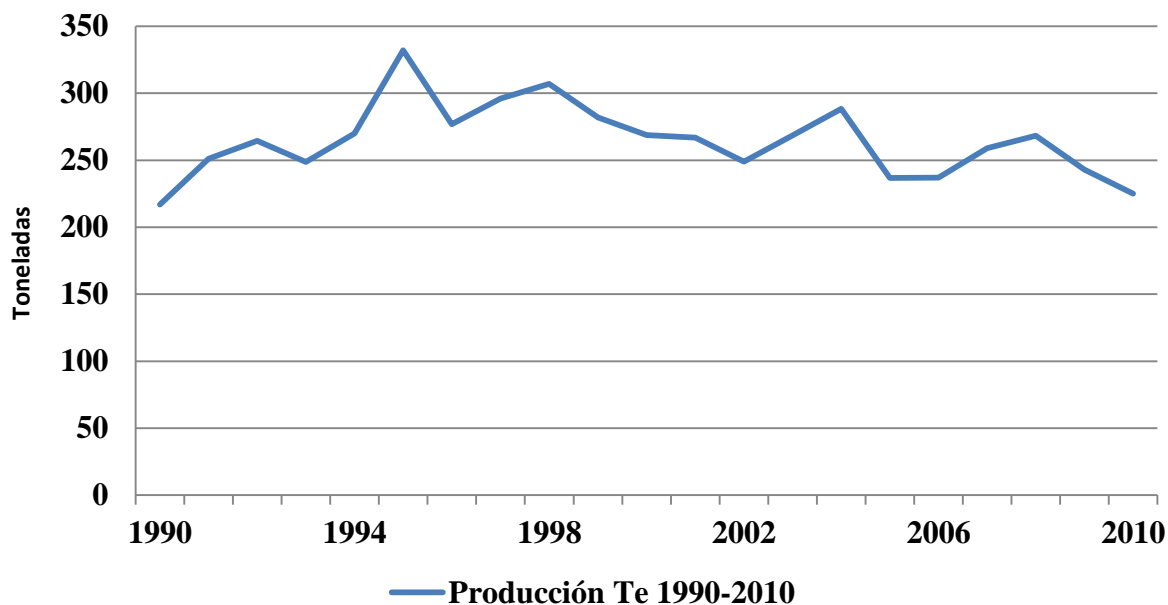
**Diagrama 5.4-1 Diagrama del Proceso de obtención de Telurio**

Elaboración propia. Fuente: DIA Codelco

El proceso consiste básicamente en lixiviar en autoclave el precipitado de refinera rico en Cobre y a partir del líquido obtenido en el proceso se recupera un cemento de Telurio, efluentes, sulfato de Cobre y un lodo anódico. El lodo es sometido a un proceso aguas abajo con el objetivo de recuperar los metales remanentes que son Oro, Plata, Platino y un poco de Cobre. Por su parte el cemento de Telurio es vuelto a lixiviar para poder refinar el producto de Telurio, a partir del nuevo líquido de lixiviación el Telurio se deposita mediante la aplicación de una corriente eléctrica (electro-depositación) con lo cual se obtiene un cátodo de Telurio de 99.99% de pureza, éste último es finalmente fundido con ácido bórico para obtener una granalla de Telurio la cual es comercializada (Codelco Chile, 2013).

Por otro lado, desde el punto de vista eléctrico se tiene que la totalidad de la planta requiere una potencia instalada de 3,200 KVA por lo que en términos generales los principales insumos del proceso para obtener Telurio son energía eléctrica, ácido sulfúrico, precipitado de refinera y ácido bórico. Se le agrega a esto además los recursos humanos necesarios para la operación de la planta.

Desde una mirada bastante general, puesto que no es objetivo de esta tesis investigar respecto de los costos de producción del Telurio, se tiene que hay tres insumos que durante el último tiempo han aumentado su valor por diversas razones. Estos tres insumos son: electricidad, ácido sulfúrico y recursos humanos, esto no quiere decir que el resto de los insumos no hayan sufrido variaciones pero dentro de la industria el aumento de precio de las tres variables antes mencionadas son hoy en día temas críticos por lo que la producción de Telurio también se ha visto sometida al alza de estas variables.



**Gráfico 5.4-2 Producción mundial de Telurio**

Elaboración propia. Fuente:WMS

De acuerdo al gráfico anterior existe una pequeña disminución en la producción mundial de Telurio en los últimos cuatro años, esto podría estar relacionado con el aumento de los costos que fue anteriormente discutido. Sin embargo es difícil, dado el nivel de información que se posee, poder definir de manera categórica si los costos de producción de Telurio son, en alguna medida, responsables de la oferta mundial. El análisis se vuelve aún más general si se considera que el Telurio es prácticamente un subproducto dentro del mercado de maquila de barro anódico puesto que elementos como el Oro y la Plata representan muchísimo más valor en el barro. Esto, y de acuerdo a la teoría económica, significa que los costos que el Telurio debe cubrir son sólo los individuales o de su propio proceso. Luego no es posible dictaminar si el costo es o ha sido un factor al momento de determinar la oferta mundial de Telurio.

### Cambios tecnológicos

Al igual que en la sección anterior sobre la influencia del costo en la oferta de Telurio, no existe información disponible y congruente respecto de cómo algún cambio tecnológico ha logrado influir de forma positiva o negativa en la oferta de Telurio. De todas formas es interesante destacar lo siguiente, más del 90% de la oferta actual de Telurio en el mundo proviene a partir de la maquila de los barros anódicos obtenidos en la electro-refinación de Cobre. Este dato se condice con diversas fuentes de información las cuales han sido citadas anteriormente en este trabajo. Se le agrega a este hecho que tanto (Green, 2008), (Weishaupt, 2009) y (UK ERC, 2012) concuerdan que la recuperación de Telurio a partir de los barros anódicos alcanza hoy en día sólo un 33%. Este valor concuerda con el balance de masa presentado por Codelco en su Declaración de Impacto Ambiental.

De acuerdo a la empresa estatal el barro anódico posee un promedio de 1.75% de Telurio y 4.2% de Cobre, si se supone que el precipitado de refinería posee una ley de 25% de Cobre entonces el Telurio en el precipitado posee una ley de 1.45%. Por otro lado la compañía establece que por cada tonelada de granalla de Telurio a producir se requieren 221.5 toneladas de precipitado de refinería (Codelco Chile, 2013). En la siguiente tabla se obtiene el resultado de recuperación de la planta.

**Tabla 5.4-1 Balance de Telurio en Planta de Metales Nobles**

<b>Flujo</b>	<b>Qs [ton]</b>	<b>Ley de Telurio [%]</b>	<b>Recuperación Telurio [%]</b>
Precipitado de refinería	216	1.45	-
Granalla de Telurio	1	99.99	32%

Elaboración propia. Fuente: DIA Codelco

Sin embargo de acuerdo estudios realizados y en función de la metalurgia conocida en la actualidad se cree que es posible alcanzar una recuperación entre un 80% y 90% si se realizan las mejoras tecnológicas e inversiones necesarias (UK ERC, 2012) y (Moss, Tzimas, Kara, Willis, & Kooroshy, 2011). Por lo que no es posible determinar si en los últimos veinte años avances tecnológicos han permitido aumentar la oferta de Telurio en el mundo pero es esperable que en un futuro y basado en que las inversiones sean realizadas entonces exista una mejora tecnológica sustancial que permita aumentar la oferta de este metaloide.

#### Oferta de producto principal

Dado que el Telurio es un subproducto del Cobre se vuelve interesante estudiar cómo ha variado la producción de Telurio en función de la producción de Cobre electrolítico. Destacar que la definición de Cobre electrolítico es la utilizada por el International Copper Study Group (ICSG) y se refiere a los cátodos de Cobre obtenido mediante la electro-refinación refinación de ánodos. Será esta misma institución la fuente para los datos de producción de Cobre electrolítico mientras que la fuente de la producción de Telurio seguirá siendo el WMS. Como queda representado en el gráfico siguiente, la producción de Cobre electrolítico no parece estar relacionada con la oferta de Telurio.

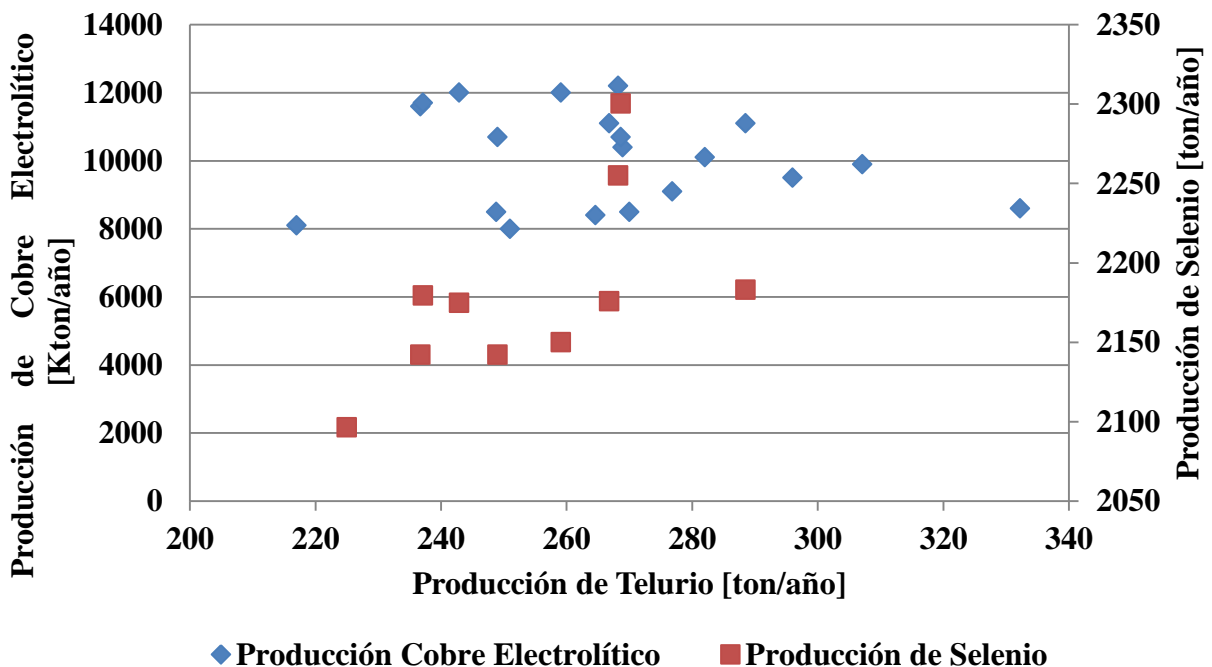


Gráfico 5.4-3 Oferta de Cobre y Selenio en función de producción de Telurio

Elaboración propia. Fuente: ICSG, WMS, USGS

Esto probablemente se deba a la generación de stocks de barros anódicos o al hecho de que los esfuerzos económicos y técnicos para la obtención de Telurio no son constantes en el tiempo. Se incluyó en el gráfico la producción de Selenio en función de la oferta de Telurio, recordar que el Selenio también es obtenido de forma importante a partir de los barros anódicos (USGS, 2013).

Contrario a lo ocurrido con el Cobre se tiene que sí existe una relación entre la oferta de Telurio y la de Selenio, esto obviamente está ligado al hecho de que comparten su origen, sin embargo una segunda lectura permite concluir que no todo el barro anódico es maquilado o que los esfuerzos por recuperar Selenio y Telurio han ocurrido de forma simultánea.

Finalmente se tiene que si bien el Cobre es el origen de más del 90% de la producción mundial de Telurio, este mercado no logra explicar la oferta de Telurio en el mundo, sin embargo pareciese que el Selenio sí logra explicar en cierta forma el comportamiento de este mercado

#### Actividades gubernamentales

Como fue nombrado anteriormente en las actividades gubernamentales en la demanda de Telurio se tiene que hasta el momento solo corresponden a medidas sugeridas por instituciones que han estudiado la problemática sin embargo no han tenido una aplicación real en la actualidad. Nuevamente la Comunidad Europea, con su instituto anteriormente citado, propone forzar o incentivar la sustitución del Telurio en las aplicaciones que no tengan relación con los paneles solares generando así un aumento en la oferta relativa de este elemento para esa industria en particular.

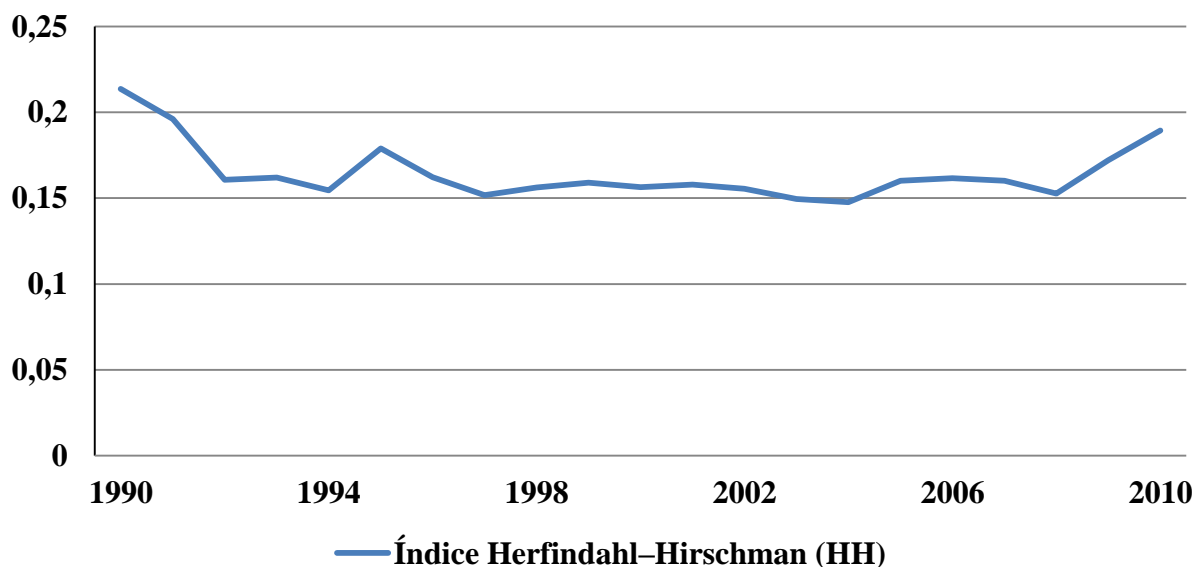
Además proponen incentivar investigación y desarrollo en post de mejorar las recuperaciones de Telurio en las plantas metalúrgicas que de acuerdo a su estudio no debiese requerir mayor inversiones en la investigación y tampoco en la implementación de estas mejoras. Por último proponen maximizar la actual capacidad instalada de refinería forzando un proceso de selección de barros anódicos de modo tal se le de preferencia a aquellos barros de mayor contenido en Telurio, esta última sugerencia va derechamente en contra de lo que comúnmente se entiende por el valor de los productos tranzados sin embargo refleja lo crítico que puede ser un correcto abastecimiento de Telurio para el desarrollo de la tecnología solar de paneles de CdTe.

## Estructura del mercado

Para comprender si existe concentración de la oferta de un mercado es necesario conocer los datos de producción desagregados por empresa o por país, de esta forma se puede determinar el nivel de concentración empresarial o geográfico del mercado en cuestión. Para el caso puntual del Telurio se tomará la producción publicada por el WMS sin embargo es importante destacar dos fenómenos, el primero guarda relación con la cobertura obtenida por esta información puesto que como fue discutido previamente las estimaciones cualitativas de la producción de Telurio son superiores a lo reportado por el WMS en su anuario, así existe una fracción importante del mercado que no está siendo considerado en este análisis.

El segundo fenómeno se trata sobre el hecho de que el buró de estadística le asigna a varios países una producción prácticamente constante en el tiempo, este punto también fue discutido previamente sin embargo es necesario recalcar que la veracidad de los datos queda en tela de juicio sobre todo si se considera que las variaciones de Telurio en los barros anódicos suelen ser variables, puesto que así se vuelve improbable que una faena produzca anualmente a una tasa constante.

Basado en la información disponible es posible, a través del índice de Herfindahl-Hirschman, determinar al menos como ha variado la concentración de la producción en los países catastrados por la fuente anteriormente nombrada. En el siguiente gráfico queda expuesta la variación de este índice durante el periodo 1990-2010.



**Gráfico 5.4-4 Concentración de la Oferta de Telurio**

Elaboración propia. Fuente: WMS



De acuerdo al gráfico anterior es posible ver que el mercado del Telurio posee un nivel relativamente bajo de concentración ya que de los diez países considerados (Bélgica, Canadá, Chile, China, Estados Unidos, Japón, Kazajistán, Perú, Rusia y Uzbekistán), el índice HH oscila entre 0.15 y 0.2 durante las últimas dos décadas, teniendo un promedio de 0.16. Cabe mencionar que cada país posee diferentes criterios para discriminar si un mercado está concentrado o no, por lo que en algunas naciones los mercados con índices como el del Telurio se considerarían concentrados.

Destacar de todas formas que a comienzos de siglo el mercado era más concentrado si se compara con lo ocurrido entre 1994 y 2007, esta tendencia parece revertirse puesto que a partir del año 2008 la concentración ha ido aumentando principalmente porque China y Japón han aumentado durante los últimos años su participación en la producción de Telurio.

## **5.5 Atractividad**

Una vez determinado que el Telurio es el Elemento Crítico Energético en el cual Chile posee el mayor potencial para participar de manera relevante, se vuelve necesario poder estudiar este mercado bajo la perspectiva de cuán atractivo es. Este análisis busca principalmente determinar el actual volumen del mercado y proyectarlo en el futuro con el objetivo de determinar el potencial beneficio de participar en él. Los pasos y herramientas claves para cumplir este propósito consisten en determinar el tipo de consumo del bien en cuestión y el actual volumen de su mercado, identificar la situación del mercado bajo la perspectiva del concepto Ciclo de Vida del Producto y luego realizar una estimación de la demanda bajo diversos supuestos que serán discutidos cuando corresponda. Esta metodología de análisis de atractividad se basa en lo propuesto por Lambin en su libro “Market-Driven Management” (Lambin, 2000). Se procede entonces a realizar el análisis de atractividad del mercado del Telurio.

### **5.5.1 Estructura de la demanda**

Considerando las principales aplicaciones del Telurio se tiene que éste elemento posee una demanda derivada del consumo de sus aplicaciones. Esto, al igual que en casi todos los mercados de minerales, ubica al Telurio en lo que se conoce como la demanda de bienes industriales, y dado que este elemento es un componente del producto a comercializar entonces pertenece a la sub-clasificación denominada demanda de componentes industriales.

De acuerdo a la teoría este tipo de mercado posee una demanda que se enmarca bajo cuatro conceptos claves:

- a. Potenciales industrias consumidoras de Telurio: paneles solares, termoeléctricos, aleaciones ferrosas y no ferrosas entre otras
- b. Proporción de uso efectivo: fracción de cada industria que utiliza el Telurio como componente
- c. Cantidad producida por industria efectiva: volumen de cada industria que utiliza el Telurio como componente
- d. Razón de uso por producto: cantidad de Telurio utilizado por unidad básica de producto.

De esta forma se tiene que la demanda de Telurio estará dictada por estos cuatro factores y que el comportamiento de cada uno de las industrias relacionadas influirá de forma directa en la demanda de Telurio. Respecto de los análisis que prosiguen será necesario hacer referencia a las aplicaciones que posee el Telurio para ver sus ciclos de vida y las oportunidades de crecimiento que existen. En ese sentido, dado que las aplicaciones en celdas solares es la de mayor relevancia en la actualidad y es la que motiva el considerar el Telurio como un Elemento Crítico Energético será esta aplicación la más considerada sin embargo cuando sea pertinente se incorporará las otras aplicaciones que posee.

## 5.5.2 Oportunidades de crecimiento

Las oportunidades de crecimiento están estrictamente relacionadas con la diferencia entre la actual demanda primaria de un elemento y la demanda absoluta que éste pueda poseer. Así mientras esta diferencia sea mayor entonces las oportunidades de crecimiento también lo serán y viceversa. Desde un punto de vista teórico las oportunidades de crecimiento fueron clasificadas en cuatro tipos de acuerdo a la diferencia (o gap) que la caracteriza (Weber, 1976): diferencias de uso, diferencias de distribución, diferencia en la línea de producto y diferencia de competitividad.

- a. Diferencia de uso: se relaciona con industrias que podrían consumir Telurio o que actualmente consumen pero podría aumentar la tasa. Dado que en sus aplicaciones no eléctricas el Telurio posee un alto nivel de sustitución se tiene que la oportunidad de aumento de uso debiera estar ligada a mercados de cierta dificultad de sustitución como son los paneles solares de CdTe y los equipos termoeléctricos de BiTe. Respecto a los paneles de CdTe hoy en día existen políticas públicas por parte de Estados Unidos para reducir el consumo unitario de Telurio en esta tecnología. El fundamento principal para este incentivo es reducir la dependencia de esta tecnología con un mercado tan inestable y pequeño como es el del Telurio. Luego, la diferencia de uso más que una oportunidad pareciera ser una amenaza al mercado del Telurio por lo que la posibilidad de entregar una oferta estable de este elemento sí representa una oportunidad de crecimiento interesante y definitivamente debe ser considerada al momento de evaluar el negocio. Respecto de los equipos termoeléctricos definitivamente existe un importante potencial en aumentar su uso puesto que se trata de una tecnología bastante reciente y que únicamente es consumida en China.
- b. Diferencia de distribución: se relaciona con el hecho de que no todos los eventuales mercados tienen acceso a estos productos. Desde un punto de vista industrial es difícil imaginar que exista una compañía que consuma Telurio pero que sin embargo no tenga acceso a este. Nuevamente se trataría de un tema generar una oferta confiable de Telurio. Por otro lado si se analizan las aplicaciones de Telurio no pareciera que el mercado de celdas solares se vea afectado por una distribución ineficiente, sobre todo si se considera que generalmente los grandes proyectos fotovoltaicos negocian directamente con la empresa que manufactura los paneles. Sin embargo nuevamente los equipos termoeléctricos son un contra ejemplo, puesto que en la actualidad su consumo está totalmente centralizado en China y eso deja en evidencia un problema u oportunidad de distribución. Respecto de las aplicaciones más convencionales (aleaciones y otros) es difícil sostener que alguna industria no tenga acceso a este tipo de aleaciones, basado en el hecho de que son aplicaciones que poseen más de treinta años dentro del mercado.

- c. Diferencia de línea de producto: se relaciona con el hecho de que un eventual productor de Telurio busque abarcar la mayor cantidad de mercados mediante la diversificación de las líneas de producto de Telurio que obtiene. Esto puede considerarse una perspectiva netamente comercial (diversos tamaños de productos) a niveles más técnicos como puede ser la pureza del Telurio obtenido. Este último concepto es el más interesante desde una perspectiva productiva de Telurio refinado, si se considera por ejemplo que para las aplicaciones en celdas solares se requiere de un Telurio de alta pureza (más de 5N) entonces se vuelve interesante lograr producir Telurio de este nivel. Incluso, ya un poco más alejado de la producción de Telurio propiamente tal, se podría considerar la producción del polvo metalúrgico de CdTe el cual es un insumo directo en la manufactura de estas celdas. Evidentemente esta opción se aleja del análisis de atractividad de Telurio sin embargo posee la virtud que logra incorporar la estratégica posición que juega Chile como el principal productor desde la mina de Telurio del mundo. Respecto de las otras aplicaciones sería interesante conocer el nivel de pureza que requieren, aunque es de esperar que para la aplicación en equipos termoeléctricos se requiera alta pureza mientras que para las aleaciones ferrosas y no ferrosas el Telurio pueda ser de menor calidad. Así, la oportunidad de diferencia de línea de producto es interesante y se debe considerar la calidad del Telurio producido como la variable clave.
- d. Diferencia de competitividad: se relaciona con el hecho de buscar competir con los actuales actores del mercado. En este sentido la oportunidad de competir es interesante puesto que Chile es el principal productor desde la mina de Telurio del mundo y por lo tanto ocupa una situación estratégica que ningún otro país o empresa posee. Es decir cualquier faena chilena donde se maquile barro anódico para la obtención, entre otras cosas, de Telurio poseerá un acceso preferencial al barro producido en Chile (segundo país con mayor capacidad de refinación electrolítica del mundo) e incluso podría negociar la devolución de los barros anódicos producidos a partir de concentrados chilenos de Cobre. Esto claramente genera una diferencia respecto de las actuales industrias competitivas en el mercado de Telurio, considerar por ejemplo el caso de Bélgica país al cual Chile exporta gran parte de su barro anódico y el cual es el mayor productor de Telurio del mundo. ¿Qué ocurriría en el caso de que este barro exportado en vez de ser maquilado en Bélgica sufra este proceso en Chile? Esto evidentemente llevará a Bélgica a perder parte del mercado y a Chile a aumentar, por lo que sí existe una diferencia competitiva asociada al origen geográfico de la fuente de Telurio.

De los cuatro tópicos analizados anteriormente se desprenden tres ideas fundamentales, la primera tiene que ver con el hecho de que Chile posee una diferencia competitiva con el resto de los países sin embargo no la ha aprovechado. Respecto de las otras diferencias se tiene que aquellos productores que logren asegurar una oferta estable y confiable en el tiempo lograrán ser apreciados por las industrias consumidoras de Telurio, principalmente por la de paneles fotovoltaicos.

Por último la tercera gran idea guarda relación con los equipos termoeléctricos donde pareciese que las diferencias son las mayores puesto que es un producto masivo (de uso doméstico y/o comercial) pero que el desconocimiento de la tecnología (diferencia de uso) y el bajo acceso a esta (diferencia de distribución) no han permitido que la tecnología sea consumida a gran escala. De desarrollarse de manera masiva el uso de estos equipos entonces se tendrá un consumo masivo de Telurio y por lo tanto existirían oportunidades de crecimiento interesantes para el Telurio.

### **5.5.3 Ciclo de vida del producto**

El ciclo de vida de un producto (CVP) representa o retrata la historia de venta de un producto o tecnología en particular, que constituye una solución específica (entre varias otras) a una necesidad de mercado dentro de un grupo de consumidores específicos (Lambin, 2000). Se tiene entonces que si bien el análisis de CVP puede realizarse en cualquier nivel (demanda directa o derivada) es conveniente realizarlo siempre desde una perspectiva del producto de mercado, ya sea que porque representa la demanda en sí o porque es responsable de la demanda de un insumo o componente en su proceso (derivada). De esta forma para el caso del Telurio al realizar el análisis es conveniente hacerlo desde la perspectiva de sus aplicaciones, las que se resumirán en tres principales: paneles fotovoltaicos de CdTe, equipos termoeléctricos de BiTe y otros (aplicaciones convencionales como aleaciones ferrosas y no ferrosas).

Por otro lado la teoría del CVP ha identificado que existen cinco etapas características que se presentan en todos los productos y que si bien no siempre se obtiene la forma teóricamente esperada de la demanda histórica de un producto, sí es posible identificar estas cuatro etapas (o al menos hasta la etapa a la cual ha llegado el mercado) en cualquier historia comercial. Las etapas propuestas son las siguientes:

- a. Etapa introductoria: se caracteriza por un lento crecimiento de las ventas controlado por factores como la incerteza tecnológica del producto, bajo nivel de distribución, y cierto rechazo por parte de los consumidores en probar nuevas tecnologías. Cómo verá más adelante pertenecen a esta categoría los paneles fotovoltaicos y equipos termoeléctricos.
- b. Etapa de crecimiento: se caracteriza por un crecimiento de las ventas que va acelerándose, empezando a un nivel más bajo que el crecimiento económico para luego superarlo con creces. Se discutirá más adelante sin embargo los paneles fotovoltaicos se encuentran en una situación intermedia entre esta etapa y la anterior.

- c. Etapa de reestructuración: es una situación transitoria donde las ventas empiezan a reducir su nivel de crecimiento hasta que alcanza una tasa similar al crecimiento económico o demográfico. El mercado se empieza a concentrar y logran sobrevivir los competidores más fuertes únicamente. Empieza a ocurrir una segmentación del mercado.
- d. Etapa de madurez: el mercado o las ventas del producto se comportan de similar forma a lo que ocurre con el global de la economía. La segmentación es una realidad para todas las compañías que participan del sector y la tecnología se estandariza a nivel global. El producto busca reinventarse constantemente con el objetivo de extender su vida. Probablemente las otras aplicaciones del Telurio, que son las más convencionales, de mayor historia y por ende más maduras, se encuentren en esta fase de su vida.
- e. Fase declinación: la aparición de nuevas tecnologías, cambios en los gustos por parte de los consumidores y cambios sociales o de políticas públicas hacen que la demanda se ubique bajo el crecimiento económico hasta el punto de que solo queda un mercado residual donde participan sólo los oferentes especializados en ese sub-mercado. En este segmento se encuentra principalmente el uso de Telurio en la industria xerográfica, puesto que la utilización de compuestos orgánicos desplazo completamente el consumo de Telurio para la manufactura de estos equipos. Es posible que también las aleaciones ferrosas y no ferrosas de Telurio comiencen a pertenecer a esta categoría, sobre todo si considera que el aumento de precio del Telurio indudablemente forzará a que sus sustitutos en estas aplicaciones (Selenio entre otros) jueguen un rol más importante en este mercado.

Dado que como fue anteriormente expuesto las aplicaciones eléctricas del Telurio han sido las responsables de la motivación de este mercado se realizará un análisis en profundidad del ciclo de vida del producto para los paneles fotovoltaicos de CdTe, sería interesante poder incorporar los equipos termoeléctricos sin embargo se carece de información suficiente para realizar un análisis más en detalle respecto a lo anteriormente comentado.

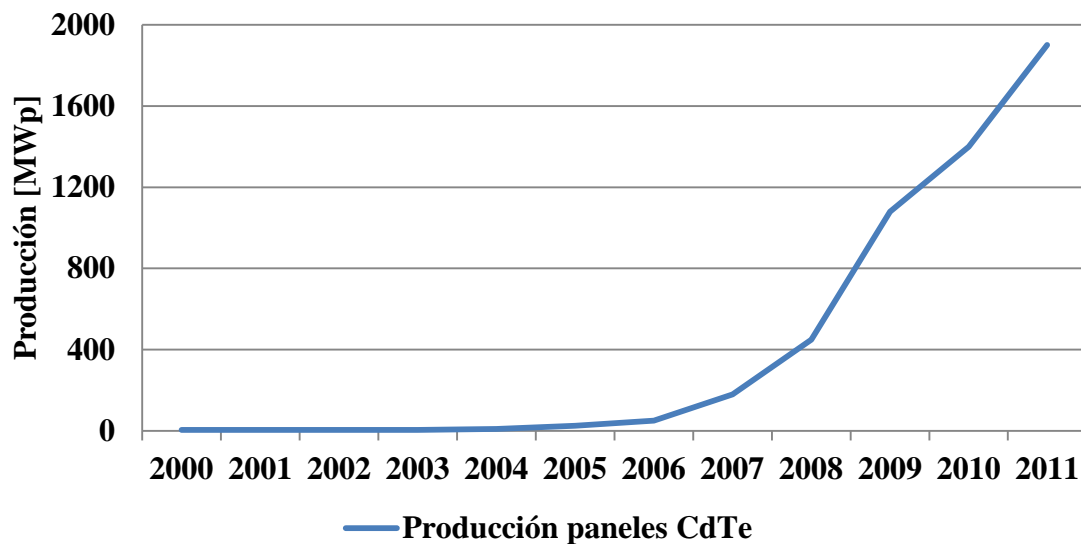
#### Paneles fotovoltaicos de CdTe

Este mercado se encuentra en una situación intermedia entre la fase de introducción y la fase de crecimiento. Ocurre por un lado que existe cierta incerteza tecnológica generalizada a la industria fotovoltaica puesto que no está claro como una fuente variable de energía va a abastecer un consumo que varía también pero que sin embargo se encuentran desfasados. Esto incluye a todas las tecnologías fotovoltaicas dentro de las que se encuentra las de CdTe.

Se le agrega esto además que esta tecnología sufre otros factores propios de la fase introductoria como un bajo nivel de distribución de la tecnología, bajo nivel de conocimiento de que existe y finalmente que el nivel de competencia es bastante bajo (sólo existe First Solar y Apollo Solar) como oferentes de esta tecnología.

Sin embargo si se concentra el análisis en el nivel de crecimiento de este mercado se tiene que el año 2006 la potencia de paneles solares de CdTe producidos ese año no superaba los 100 MWp. Cinco años más tarde (2011) la producción de esta misma tecnología fue cercana a los 1.9 GWp (Fraunhofer, 2012) por lo que el crecimiento del mercado fue de un promedio de 63.3% lo cual es altamente superior al crecimiento económico mundial durante ese periodo.

En el siguiente gráfico se tiene el comportamiento de la producción de paneles fotovoltaicos durante los últimos doce años.



**Gráfico 5.5-1 Producción mundial de paneles fotovoltaicos de CdTe**

Elaboración propia. Fuente: Fraunhofer Institutien

Luego es posible afirmar que cierta parte de comportamiento del mercado de las celdas solares de CdTe es explicado por una etapa introductoria caracterizada principalmente por la necesidad de validar la tecnología desde un punto de vista técnico y económico, mientras que por otra parte el fuerte crecimiento de la producción de paneles solares de CdTe hace pensar que el mercado se encuentra más bien en una etapa de crecimiento, la cual se ve representada en el gráfico anterior. Así se desprende que esta tecnología se encuentra en una situación intermedia entre ambas etapas y es de esperar que el futuro a mediano plazo se caracterice por un aumento acelerado de las ventas de este tipo de paneles a un ritmo mayor al crecimiento económico hasta el punto en que el mercado se introduzca en la fase transitoria de reestructuración.

Destacar que en términos generales el crecimiento económico a nivel mundial y país siempre ha coincidido con el crecimiento de la demanda energética por lo que este tipo de producto sólo podría alcanzar su etapa de declinación por la aparición de nuevas tecnologías mas nunca ocurrirá que su declinación se explique por una reducción en el consumo energético.

#### **5.5.4 Estimación de la demanda**

Para llevar a cabo la estimación de la demanda se tomara como ejercicio base lo realizado por el Departamento de Energía de Estados Unidos (DoE) en su reporte sobre minerales estratégicos para tecnologías energéticas (DoE, 2011). Basado en esto se considerará una demanda fotovoltaica (asociada al consumo de Telurio en paneles de CdTe) y una demanda no fotovoltaica (asociada a todos los consumos exceptuando en paneles de CdTe) para luego estimar una demanda agregada consistente en la suma de la dos demandas anteriores. Destacar que si bien la metodología será la misma que utilizó el DoE, esta trabajo al ser más actual posee datos nuevos y estimaciones recientes por lo que representa una versión actualizada de la simulación anterior.

Demanda fotovoltaica: como fue visto al momento de identificar que la demanda de Telurio corresponde a un consumo de componentes industriales, la demanda fotovoltaica estará regida por cuatro variables claves: número de potenciales usuarios, fracción de uso efectivo, cantidad producida por usuarios efectivos y finalmente la tasa de uso o intensidad de uso como también se le ha llamado.

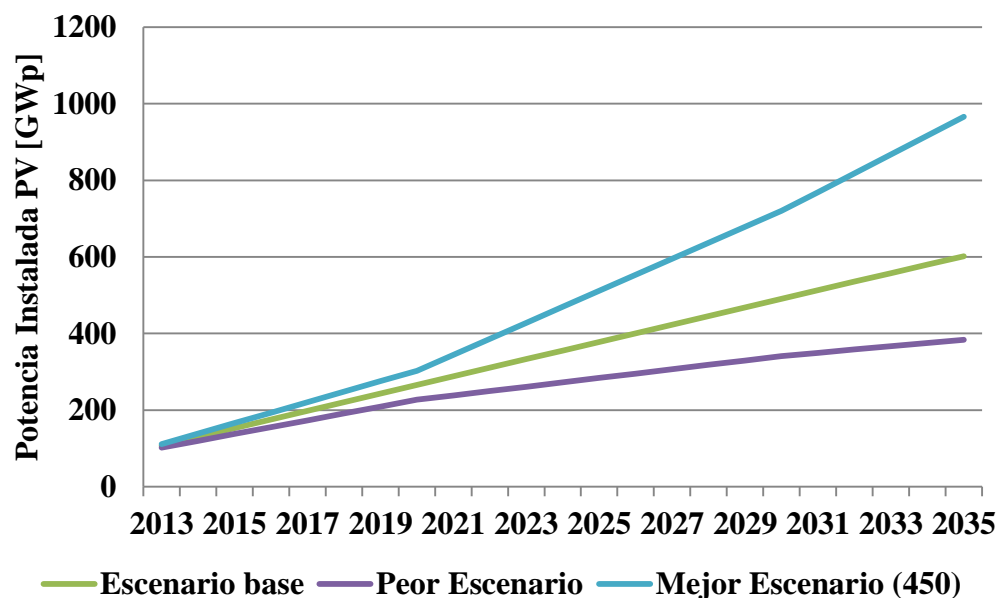
Se procede a determinar la fuente de información y los supuestos considerados para cada una de estas cuatro variables.

- a. Potenciales usuarios: corresponde a toda la potencia instalada en tecnologías de paneles solares que se estima ocurrirá en un futuro. Para esta variable se usaran tres escenarios definidos por la Agencia Internacional de Energía (AIE) en su reporte World Energy Outlook 2012 (IEA, 2012). El primero de los escenarios lo denominaron “New Policies Scenario” y consiste en una estimación de la potencia futura bajo algunos supuestos sobre nuevas políticas energéticas a nivel mundial, este caso se considerará como el escenario esperado. El segundo de los escenarios, denominado por la AIE como el “Current Policies Scenario” consiste en suponer que las actuales políticas se mantendrán de igual forma por lo que se espera un crecimiento constante de esta forma de obtener energía, este caso se considerará como el peor escenario. Por último, el mejor escenario será lo que la AIE denomino “450 Scenario” y que consiste en un camino energético en el cuál el mundo posee un 50% de probabilidad de volver a la tasa de aumento de la temperatura promedio de la Tierra en la época previa a la revolución industrial.

En el siguiente gráfico quedan representados estos tres escenarios en función de la potencia fotovoltaica instalada que se supone en cada caso. Destacar que la AIE entrega datos



parciales para cada 5 y 10 años por lo que dentro de cada uno de estos periodos se asumió una tasa constante de crecimiento de la potencia instalada. Esto se diferencia al trabajo realizado por el DoE pues la institución estimó crecimientos constantes para cada uno de los diversos escenarios de potencia instalada fotovoltaica y sólo considero la potencia actual y la potencia en el último año de estimación.



**Gráfico 5.5-2 Escenarios potencia fotovoltaica instalada**

Elaboración propia. Fuente: AIE

- b. Fracción de uso efectivo: corresponde a la fracción de la industria fotovoltaica que utilizará la tecnología de CdTe como la solución a su negocio. Para esta variable se usaran dos escenarios definidos por el DoE en su reporte ya mencionado. En la siguiente tabla se resumen ambas posibilidades

**Tabla 5.5-1 Escenarios de penetración tecnología CdTe**

Alta Penetración [A.P]	Baja Penetración [B.P]
50%	10%

Elaboración propia. Fuente: DoE

- c. Cantidad producida por usuarios efectivos: dado que se realizará una estimación en base a la potencia instalada (y no a la energía eléctrica generada) no será necesario definir esta variable.

- d. Intensidad de uso: corresponde a la cantidad de Telurio necesario por unidad de potencia instalada en paneles de tecnología de CdTe. Para esta variable se considerarán dos escenarios de acuerdo a lo discutido previamente en los factores que determinan la demanda.

**Tabla 5.5-2 Escenarios de Intensidad de Uso [ton de Te/GWp]**

Alta Intensidad de Uso	Baja Intensidad de Uso
85	13

Elaboración propia. Fuente: USGS

Considerando que para dos de las tres variables existen dos escenarios posibles y que para la tercera variable existen tres escenarios posibles esto entrega un total de 12 combinaciones posibles de comportamiento de la demanda fotovoltaica. Como se verá más adelante sólo se consideraran las situaciones más extremas (el mejor y peor caso global) y dos situaciones intermedias, esto con el objetivo de no repetir tendencias similares.

Demanda no fotovoltaica: basado en la metodología realizada por el DoE se estimará que la demanda no fotovoltaica del Telurio se comportará (tasa de crecimiento) de igual forma que la economía mundial. Esto si bien es un supuesto bastante fuerte, pero ocurre que no es posible realizar estimaciones de crecimiento para cada una de las diversas aplicaciones del Telurio. Se le agrega a esto además que indudablemente será la demanda fotovoltaica la que influirá de mayor forma en la demanda global de Telurio esto pues en la actualidad representa más de un 40% y dado que sus otras aplicaciones son mercados más maduros no es de esperar que exista un crecimiento superior a lo que ocurra con el global de la economía.

La única excepción de esta generalización serían los equipos termoeléctricos sin embargo la información disponible de este mercado es prácticamente nula. De todas formas es importante destacar que el supuesto de que el mercado de equipos termoeléctricos se comportará de igual forma que el global de la economía sólo genera un sesgo que subestima la demanda global de Telurio por lo que podría plantearse que los escenarios aquí descritos son, respecto a esta aplicación, conservadores. Desde luego que para una nueva investigación será interesante poder dimensionar el comportamiento del mercado de equipos termoeléctricos. Por último destacar que la estimación del crecimiento económico mundial será en base a lo estimado también por la AIE que corresponde a un crecimiento promedio de 3.5% hasta el año 2035.

Determinado ya cuáles serán las formas de estimar cada una de las demandas anteriormente descritas se vuelve necesario determinar el comportamiento del mercado del Telurio en un año base, el cual consideraremos el 2012. De acuerdo a lo expuesto en su momento respecto de la actualidad del mercado del Telurio se supondrá que la demanda total para ese año fue de 525 toneladas, destacando la demanda fotovoltaica con un 40% del total.

En la presente tabla se presenta esta información.

**Tabla 5.5-3 Demanda Telurio año 2012**

Demanda	Te [ton]
Total	525
Fotovoltaica	210
No Fotovoltaica	315

Elaboración propia. Fuente: USGS

Tomando en cuenta estos valores y considerando además que la demanda no fotovoltaica posee un solo escenario, existen un total de doce escenarios posibles para la demanda fotovoltaica, esto a su vez permite que existan doce escenarios posibles para la demanda agregada. De los diversos escenarios posibles para la demanda agregada se decide por considerar sólo cuatro, que son los siguientes

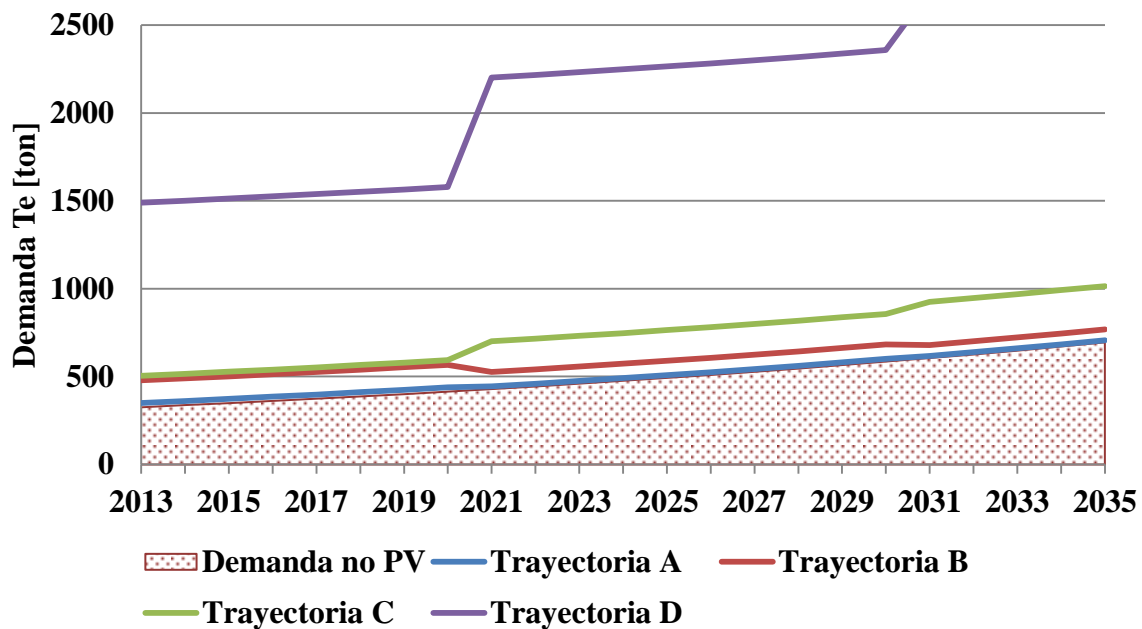
Trayectoria A: es el peor caso globalmente. Se considera una baja intensidad de uso, baja tasa de penetración y que las políticas públicas asociadas al problema medioambiental se mantienen igual que en la actualidad.

Trayectoria B: es una situación intermedia, sigue siendo el peor escenario desde el punto de vista de las políticas públicas y la tasa de penetración de la tecnología de CdTe es baja, sin embargo considera que la intensidad de uso es de 85 toneladas por GWp instalado (intensidad alta).

Trayectoria C: es una situación intermedia, relativamente más atractiva que la trayectoria B pues supone el mejor escenario de políticas públicas “450 Scenario” y una alta tasa de penetración, sin embargo la intensidad de uso es baja.

Trayectoria D: es el mejor caso globalmente. Considera una alta intensidad de uso, alta tasa de penetración y que las políticas públicas asociadas al problema medioambiental buscan volver a una temperatura previa a la revolución industrial.

En el siguiente gráfico se presentan las diversas trayectorias consideradas. Destacar que todas las trayectorias incorporan la demanda no fotovoltaica la cual además es graficada de forma independiente con el objetivo de dimensionar el aporte de la demanda fotovoltaica a la demanda global.



**Gráfico 5.5-3 Proyección demanda mundial de Telurio**

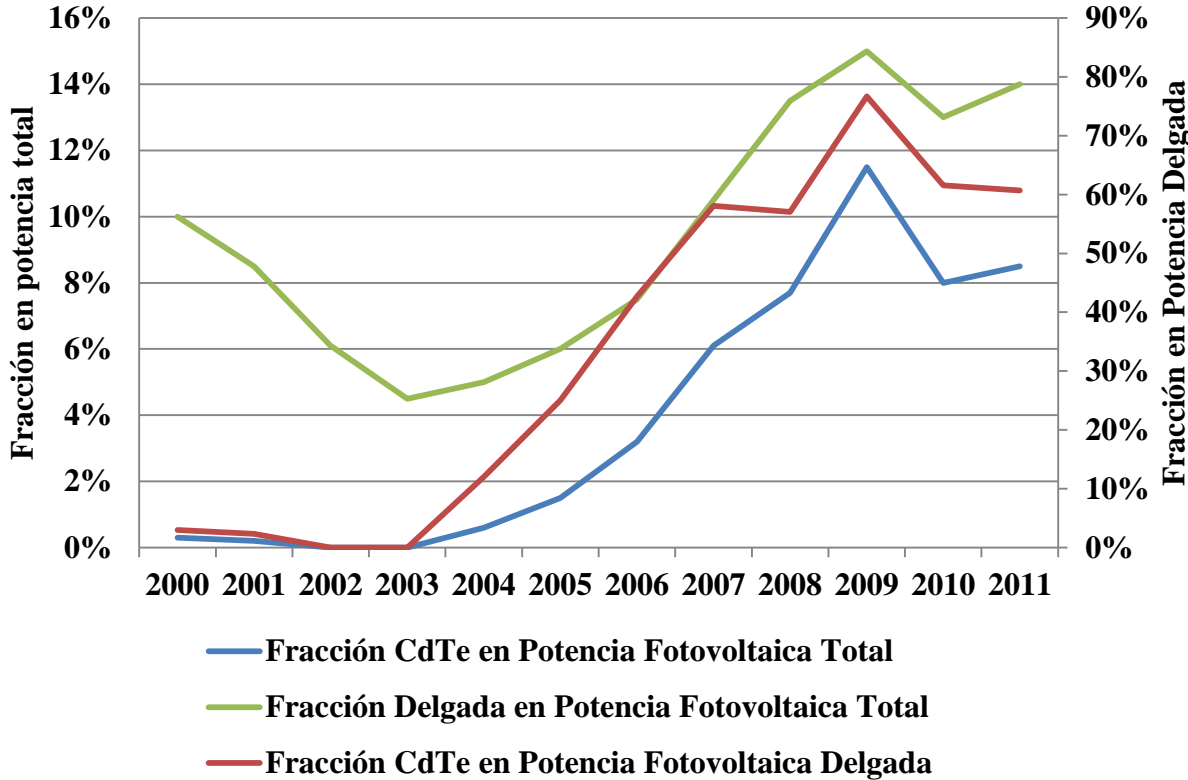
Elaboración propia. Fuente: en base a fuentes anteriores

Lo primero que debe destacarse es que estas estimaciones no buscan determinar de forma cuantitativa el futuro de la demanda mundial de Telurio, sin embargo logran entregar un rango de lo esperable que ocurra y este rango puede ir acotándose a medida de que ciertos supuestos sean considerados o rechazados. Respecto del gráfico en sí lo primero que queda en evidencia es el relevante rol que juega la intensidad de uso. Ocurre que desde un punto de vista netamente algebraico los factores multiplicativos son 5:1 en la tasa de penetración y 6.5:1 en la intensidad de uso, por ultimo entre el mejor y peor escenario de potencia instalada la razón media es de 1.7:1, mientras que entre el mejor escenario y el esperado la razón es de 1.3:1.

Esto explica porque tanto las trayectorias B y C son “similares” entre sí cuando se comparan con la trayectoria D, ya que en ésta última los factores multiplicativos superan la razón 30:1, mientras que en B y en C se mantienen similares ya que C posee una alta penetración pero baja intensidad de uso mientras que B justo al contrario. Finalmente la trayectoria D es básicamente la demanda no fotovoltaica puesto que la demanda fotovoltaica no supera las 25 toneladas anuales.

Lo más relevante de lo simulado anteriormente es que contrario a lo dicta el sentido común, la demanda fotovoltaica de Telurio no es fuertemente dependiente de las políticas ambientales respecto de incentivar fuentes renovables de energía. Influye de manera muchísimo más importante la tasa de penetración y la intensidad de uso.

Respecto de la tasa de penetración no exige mucho comentario pues básicamente consiste en un supuesto tomado del informe del DoE sin embargo es interesante estudiar cómo ha variado esta tasa en los últimos años. En el siguiente gráfico se observa el comportamiento de tres variables relevantes, la primera es la fracción de la tecnología de CdTe respecto total de la potencia fotovoltaica (línea azul, eje izquierdo), la segunda es la fracción de la tecnología de paneles delgados, que incluye CdTe, CIGS y otros, respecto del total de la potencia fotovoltaica (línea verde, eje izquierdo), y la tercera variable es la fracción de la tecnología CdTe respecto del total de la potencia fotovoltaica delgada (línea roja, eje derecho).



**Gráfico 5.5-4 Participación de CdTe en industria fotovoltaica**

Elaboración propia. Fuente: Fraunhofer Institute

Destaca en el gráfico la tendencia de que la tecnología CdTe ha ido aumentando su participación en la industria fotovoltaica delgada al punto máximo de representar más de un 70% de este sector, a su vez la tecnología delgada ha ido aumentando su participación en la industria fotovoltaica total por lo que de mantenerse ambas tendencias es de esperar que la penetración de la tecnología de CdTe en la industria de paneles solares vaya aumentando en el tiempo y supere con creces el 10% considerado en el escenario de baja penetración.

Finalmente respecto de la intensidad de uso los datos de diversas fuentes suelen condecirse unos con otros, la intensidad de uso actual es cercana a 85 toneladas por GWp de potencia instalada.

Sin embargo el límite de los escenarios consideraba una intensidad de uso de 13 toneladas, valor que se obtuvo de una sola fuente (USGS) y que por lo tanto podría estar sesgada o sujeta a errores. Es difícil comprender que una industria pueda alcanzar una intensidad de uso más de seis veces menor a la actual sobre todo si se considera lo crítico que ha sido el suministro de Telurio para esta industria en los últimos años. Es probable que el límite sea más bien de carácter teórico y se aleje de la realidad técnico-industrial.

A modo de englobar la simulación de la demanda esperada se puede decir que es altamente dependiente de la intensidad de uso y la tasa de penetración de esta tecnología por lo que desde una perspectiva del ciclo de vida del producto, esta demanda es aún inmadura y su comportamiento futuro es considerablemente variable. Respecto del atractivo de este mercado (fotovoltaico) se tiene que para futuros oferentes de Telurio a nivel mundial existe un desafío en lograr generar una oferta estable, confiable y que además sea capaz de suministrar un producto en la cantidad y con la calidad (pureza) que requiere la tecnología de CdTe para ser llevada a su máximo potencial como participante de la industria de paneles fotovoltaicos.

## 5.6 Competitividad

Una vez determinado los atractivos que posee el mercado del Telurio se debe intentar comprender el actual comportamiento de los distintos actores que participan de este mercado, y cómo estos interactúan entre sí. Estos actores corresponden a los actuales y potenciales oferentes y demandantes, las empresas que proveen insumos para este mercado y el último de los actores es el mercado de los sustitutos del Telurio. Estos cinco roles son estudiados en lo que Porter denominó las fuerzas que determinan la competencia de una industria (Porter, 1980).

Una vez comprendido la forma en que interactúan estas fuerzas se debe responder la interrogante ¿Cómo puede una nueva empresa o compañía competir en este mercado? De poco sirve identificar un mercado atractivo si es que la nueva empresa no logra participar de manera competitiva del mercado. Esta compañía puede buscar competir en un plano operacional (diferenciación del producto o reducción de costos) o puede hacerlo mediante la incorporación de una estrategia competitiva la que busca ser partícipe del mercado pero desde una perspectiva diferente ya sea realizando actividades completamente diferente de sus competidores o realizando las mismas actividades pero de una forma completamente diferente. Generalmente se tiene que la estrategia competitiva suele extenderse más en el tiempo si se compara con la competencia operacional puesto que esta última es fácil de imitar y en algún momento dado la competencia podrá acceder a esa misma capacidad operacional.

Todo el análisis anterior es lo que se conoce como un análisis de competitividad sin embargo, al contrario de lo que ocurre con el análisis de atractividad, en este caso es necesario realizarlo desde la perspectiva de una empresa o compañía que busca competir en este mercado.

Luego, basado en la idea de esta “nueva” empresa que busca competir no es posible realizar el análisis como una nueva oferta de Telurio solamente puesto que desde el punto de vista industrial esto no tiene sentido ya que el Telurio se obtiene en conjunto con otros metales al momento de maquilar los barras anódicos provenientes de la electro-refinación de cátodos de Cobre.

Considerando esto se propone realizar un análisis de competitividad de una empresa que maquila barras anódicos y que busca producir todos los elementos que se obtienen de esta operación. Evidentemente en el análisis se intentará dar un enfoque especial al mercado del Telurio sin embargo el negocio global de la compañía será la maquila de barras anódicos.

Por último dado que la investigación se basa en cómo Chile puede hacer un mejor uso de sus recursos naturales asociados a la industria energética se tendrá como parte del supuesto que la compañía realizará sus operaciones en el país. Con esto se le otorga un contexto de mercado y geográfico a la nueva empresa y se podrá realizar un análisis competitivo en el mercado de barras anódicos.

Antes de iniciar el análisis cabe recordar que Codelco junto con la compañía coreana LS-Nikko Copper Inc, poseen un proyecto de una planta de metales nobles en Mejillones donde pretenden maquilar más de 3,500 toneladas de barro anódico y recuperar Telurio entre otros metales (Oro, Cobre, Plata y algunos platinoides). Entonces se tiene que este emprendimiento entre ambas empresas le da un respaldo industrial al análisis que se realizará en esta investigación.

Se procede entonces a realizar un análisis de las fuerzas existentes en este mercado para luego definir una estrategia competitiva que logre potenciar la eventual rentabilidad de esta compañía.

### **5.6.1 Fuerzas de Porter**

De acuerdo a lo planteado por Porter existen cinco fuerzas principales que rigen y determinan la competitividad de un mercado en cuestión. La primera fuerza se refiere a la rivalidad actual entre los competidores y está estrechamente relacionada a la estructura del mercado en cuestión (competencia perfecta, monopolio u oligopolio). La segunda y tercera fuerza, que corresponden a potenciales o nuevos actores y productos sustitutos, son amenazas directas al mercado mientras que las últimas dos fuerzas, el poder de negociación de la oferta y de los clientes, son amenazas indirectas puesto que no tienen que ver con el mercado en sí.

#### Rivalidad entre competidores

De acuerdo a un catastro hecho por el USGS el año 2006, en el mundo existían un total de 56 refinerías de Cobre electrolítico, de las cuales 45 reportaron presencia de Telurio en sus barros anódicos con una ley que no superaba el 2% (Audion & Labbé, 2010). Por otro lado si se considera el catastro industrial realizado por De acuerdo a un catastro hecho por el USGS el año 2006 en el mundo existen un total de 56 refinerías de Cobre electrolítico, de las cuales 45 reportaron presencia de Telurio en sus barros anódicos con una ley que no superaba el 2% (Audion & Labbé, 2010). Además si se considera el catastro de industrias relacionadas con la minería y refinería de Telurio realizado por (Audion & Labbé, 2010) se tiene que hay un total de 18 compañías mineras y metalúrgicas que de diversas formas se relacionan con la industria del Telurio.

La mayor cantidad de empresas (7 de un total de 18) son compañías que poseen una mina de Cobre (pórfido) con una capacidad de fundición y refinería para procesar su mineral y finalmente maquilar su propio barro anódico para obtener Telurio de alta pureza como producto final entre otros. Las compañías son: Xstratta, Asarco, SouthernCopper Corp, Ural Mining, Jiangxi Copper, Vale Inco y finalmente Hindustan Copper.



Un segundo grupo de empresas (cuatro en total) adquieren concentrado de Cobre o barro anódico por lo tanto estos recursos son un insumo para ellas y su producto a comercializar es nuevamente Telurio de cierto nivel de pureza (4N o 5N). Estas empresas son UMICORE (Bélgica), Pan Pacific Copper (Japón), Pacific Rare Specialist (Filipinas) e Hydromet (Australia). Evidentemente para que existan estas compañías deben existir empresas mineras que produzcan concentrado de Cobre o barro anódico, siendo las cuatro principales Codelco, Freeport McMoran, Hindustan y Palabora.

Un tercer grupo de empresas, solamente dos, se encuentran en una situación singular dentro de lo que usualmente ocurre en la industria minera. La primera empresa, japonesa, se llama JX Nippon Mining & Metals, ellos a través de su filial Pan Pacific Copper recuperan Telurio de barros anódicos ajenos y producen el compuesto de CdTe necesario para la fabricación de celdas solares de esta tecnología. Destaca además que otra de las filiales de JX es LS-Nikko Inc, empresa con la cual Codelco está realizando su proyecto de planta de metales nobles en Mejillones, por lo que se desprende la empresa nipona está buscando asegurar su suministro de barro anódico. La segunda de las empresas es indonesia y se llama PT Smelting que posee una capacidad de 300.000 kton al año de refinería electrolítica de Cobre y además comercializa un compuesto de  $Cu_2Te$  para el cual poseen una capacidad anual productiva de 50 toneladas. Destaca en este caso que la faena no comercializa Oro o Plata refinado sino vende un barro anódico que posee únicamente Oro y Plata. Si a este fenómeno comercial se le agrega el proceso productivo que se Codelco presentó en la declaración de impacto ambiental para su planta en Mejillones, queda la sensación de que PT Smelting sólo realiza la primera parte del proceso de maquila de barro anódico (donde se extrae el compuesto de Telurio y Cobre) y luego comercializa el barro rico en Oro y Plata pero pobre en Telurio.

Finalmente existen dos empresas KGHM (Polonia) y Kazakhmya (Kazajistán) que poseen sus propios yacimientos mineros y maquilan sus propios barros anódicos sin embargo no reportan producción de Telurio, similar fue la situación de Codelco cuando tuvo sus plantas de metales nobles pero al parecer nunca se le asocio producción de Telurio a éstas. Esto puede deberse a que comercializaban un compuesto intermedio de Telurio (tal vez con Selenio) y por lo tanto no son productores de Telurio con cierto nivel de pureza, la segunda posibilidad es que el contenido de Telurio no haya sido lo suficiente para justificar su recuperación. De todas formas es importante recordar que al menos Kazajistán aparece en las estadísticas de producción de Telurio del WMS por lo que es probable que la empresa asiática si produzca Telurio sin embargo no lo reporta oficialmente.

Analizando las actuales firmas que participan del mercado de maquila de barro anódico y producción de Telurio se vuelven interesantes analizar los siguientes hechos desde la perspectiva de esta nueva empresa. En el actual mercado de los barros anódicos existen cuatro variables claves que determinan el comportamiento y nivel de competencia entre los oferentes, éstas son la calidad del recurso (barro anódico), la seguridad o estabilidad con que se accede al recurso (riesgo de no suministro) y si existe diferenciación del producto o se comercializa en un nivel avanzado dentro de la cadena de valor.

Evidentemente existen otras variables pero éstas son claves puesto que con ellas se puede medir la competencia operativa (calidad del recurso y diferenciación) y se puede desprender una estrategia competitiva (nivel de riesgo del suministro y avance en la cadena de valor). En la próxima sección, donde se definirá una estrategia competitiva, se utilizarán estas cuatro variables dentro del análisis para definir la estrategia.

#### Potenciales nuevos actores

Respecto de la amenaza de que nuevos actores busquen participar de este mercado se tiene que en términos generales las empresas o países que son dueños del recurso (barro anódico) son siempre un miembro importante en las empresas que maquilan el barro. Esto se discutirá más adelante en la definición de la estrategia y corresponde a un fenómeno que ocurre hace bastantes años como publica CRU el 2003 (CRU Group, 2003). De esta forma es difícil de que nuevos actores posean un mayor potencial del que Chile posee puesto que el país es el mayor productor de Cobre y el segundo con mayor capacidad de refinería por lo que su acceso al barro anódico posiblemente corresponda al mejor a nivel mundial. Sin embargo, desde la perspectiva del Telurio, es posible que dos tipos de nuevos actores entren al mercado. El primero corresponde a aquellas faenas que hoy en día no recuperan el Telurio de sus barros (por razones técnico-económicas probablemente) pero que eventualmente podrían hacerlo. De todas formas la principal razón para que hoy en día estas faenas no produzcan se debe a que su recurso no es competitivo con los otros por lo que es de esperar que su participación se ubique en los sectores de mayor costo dentro de la curva de oferta agregada de Telurio y por lo tanto no sería una amenaza relevante.

El segundo posible nuevo actor es la explotación de yacimientos de Oro-Telurio. Estos, si bien aún no parecen ser competitivos, son un tipo de recurso que se está explorando con un nivel de intensidad creciente y por lo tanto es de esperar que nuevos recursos aparezcan y tal vez logren competir en el mercado del Telurio. De todas formas se vuelve interesante identificar si el Telurio en estos recursos será un co-producto con el Oro o simplemente un subproducto. Si fuese el primer caso se tendría nuevamente que el costo de recuperación de Telurio a partir de estos recursos superará el costo de recuperación a partir del barro anódico (pues debe ser capaz de cubrir una parte del costo común con el Oro), por otro lado si se obtiene como sub-producto entonces es posible que ambos costos sean competitivos.

Un último hecho relevante a considerar es que el precio del Oro será una variable sumamente relevante en los yacimientos de Au-Te, sin embargo también será relevante en el mercado de los barros anódicos puesto que éstos representan un recurso de excelente calidad para la obtención de Oro dada su ley cercana al 1% de Au. De esta forma un aumento en el precio del Oro aportará a la competitividad de los yacimientos de Au-Te pero también aportará a la competitividad del recurso de los barros anódicos, por lo que el efecto conjunto de la variable Oro es un tema interesante a estudiar en una nueva investigación.

## Productos sustitutos

Como fue discutido anteriormente los sustitutos del Telurio en sus aplicaciones no electrónica son bastante directos y por lo tanto es de esperar que ante un aumento del precio del Telurio, estas aplicaciones busquen reemplazarlo de forma rápida. Sin embargo para las aplicaciones electrónicas, en particular celdas solares, es de esperar que exista un mercado que no posea sustituto para el Telurio y su dinámica dependerá fuertemente de la tasa de penetración de la tecnología en el sistema de generación eléctrica. Otro factor relevante a considerar es que de acuerdo a un estudio realizado por (Green, 2008), el Telurio puede sufrir un aumento de precio hasta los 550 US\$/Kg por lo que aún queda un amplio margen de precio para que se busque un sustituto del Telurio por razones económicas. En este sentido los sustitutos se vuelven interesantes por una razón de suministro y no económica o de precio per se, por lo que nuevamente aparece la idea de que un correcto y estable suministro de Telurio será bien recibido por el mercado e incluso ante la opción de un aumento de precio.

Finalmente se tiene que los sustitutos del Telurio en materia no electrónica son relevantes; sin embargo este efecto se vería opacado ante una alta penetración de la tecnología de CdTe en la industria fotovoltaica.

## Poder de negociación de la oferta

Dentro de los insumos que afectan a la industria de la maquila de los barros anódicos los más relevantes son el barro en sí mismo, ácido sulfúrico y los recursos humanos (mano de obra calificada). La energía podría considerarse relevante, sobre todo en el caso de Chile, sin embargo como fue discutido previamente se tiene que basado en la declaración de impacto ambiental de Codelco para su futura planta en Mejillones la potencia requerida en el proceso es bastante baja y por lo tanto no aparece como un insumo estratégico. Respecto de los insumos relevantes el poder de negociación más relevante es el barro anódico puesto que su suministro es indispensable para el proceso y la oferta de barro anódico pareciese estar concentrada en pocos países y/o compañías, así la negociación del suministro de este vuelve a aparecer como un factor clave en el negocio.

Por su parte el ácido sulfúrico es un mercado bastante globalizado e incluso en Chile existe una importante producción de ácido por parte las plantas de gases de las fundiciones, por lo que no debiese existir mayor complicación en su suministro, de todas formas es probable esperar un precio relativamente alto del ácido puesto que el aumento sostenido de la lixiviación de Cobre (aumenta demanda) posee un efecto multiplicador dado que su crecimiento es mayor al de la industria del Cobre sulfurado y por lo tanto existe una menor disponibilidad relativa de ácido en las plantas de gases (reducción de la oferta) lo que se traducirá en un aumento del precio.

Por último la mano de obra calificada es un suministro importante para tener una operación optimizada, de esta forma se debe buscar tener una buena relación con el eventual cuerpo sindical de la compañía para evitar situaciones de paralización de la faena lo que se traduciría en un suministro inestable de Telurio y como fue discutido previamente este es un tema relevante en el mercado del Telurio.

#### Poder de negociación de los clientes

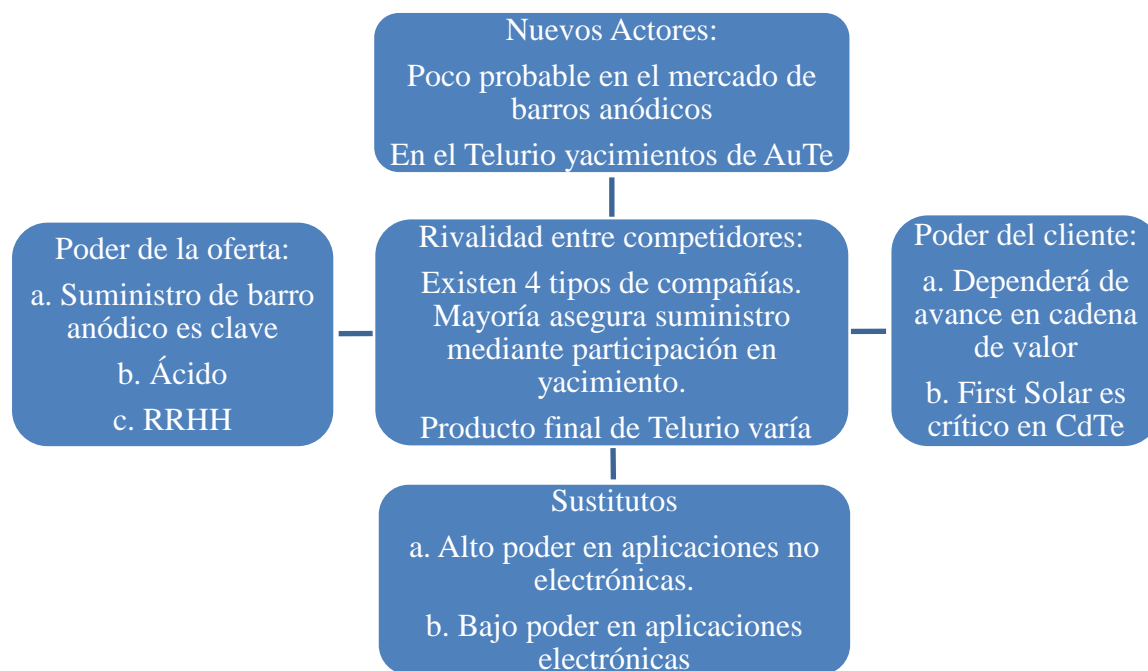
En términos generales no se identifica una demanda concentrada para los diversos elementos que se obtienen a partir del barro anódico, tanto el Oro, Plata, Selenio y Platino poseen mercados diversificados desde el punto de vista de los clientes. Sin embargo si el análisis se enfoca en el Telurio la realidad es levemente distinta. Las aplicaciones no eléctricas del Telurio pareciesen ser mercados bastante amplios por lo que no es de esperar clientes con algún nivel de negociación, incluso el argumento es el contrario ya que el suministro de Telurio se ha transformado en un tema complejo dado la volatilidad de la producción.

Para las aplicaciones eléctricas el problema es más complejo ya que dependerá del nivel en que se avance en la cadena de valor. De producir únicamente Telurio de alta pureza el cliente serian empresas como la canadiense 5N Plus que poseen como insumo el Telurio y producen diversos compuestos, CdTe entre otros. Este tipo de empresas son bastante escasas por lo que su poder de negociación es alto. Por otro lado si se produce directamente los compuestos de Te (CdTe, óxido de Telurio, Cu<sub>2</sub>Te y otros) entonces los clientes son más por lo tanto disminuye su poder de negociación, esto no ocurre en el caso del CdTe puesto que actualmente existen sólo dos empresas que fabrican celdas de CdTe, First Solar y Apollo Solar Energy, sin embargo la segunda es una operación verticalmente integrada desde la mina (yacimiento Dashuigou and Majiagou) hasta la producción de paneles solares por lo que no corresponde a un eventual cliente.

Así el poder de negociación de First Solar es bastante elevado, sin embargo este poder se ve opacado por la volatilidad de la producción de Telurio y el nulo nivel de sustituto que posee este elemento en la industria de paneles de CdTe. Es decir First Solar posee un cierto poder sin embargo no puede ejercerlo del todo ya que el suministro de Telurio es clave en su proceso. Cabe destacar que First Solar, siendo una empresa estadounidense, adquirió la empresa Solar Chile (iniciativa fotovoltaica de Fundación Chile) a principios del 2013 (First Solar, 2013).

Esta adquisición puede deberse al potencial fotovoltaico que Chile posee en el norte del país sin embargo es difícil aislar este fenómeno con el inicio del proyecto de la planta recuperadora de Telurio de Codelco y LS-Nikko en Mejillones. Esto reflejaría un nuevo intento de First Solar por asegurar su suministro de Telurio ya que el 2008 adquirió una mina en México sin embargo al parecer no ha sido posible la recuperación de Telurio desde el yacimiento (Green, 2008).

Se han identificado entonces las cinco fuerzas del mercado de la maquila de barro anódico con especial enfoque en el del Telurio. En el siguiente diagrama queda representado el análisis.



**Diagrama 5.6-1 Análisis de Porter**

Elaboración propia

### 5.6.2 Estrategia competitiva

La teoría académica postula que una estrategia competitiva puede darse de tres formas principales: por la estructura del mercado (monopolio u oligopolio), por dominación de costos (ser el proveedor de menor costo en la industria) y por último por una ventaja competitiva a nivel internacional. Dado los puntos revisados en el análisis de las fuerzas de Porter es evidente que una eventual estrategia competitiva de una faena maquiladora de barros anódicos en Chile vendrá dada por una ventaja a nivel internacional.

Se procede entonces a elaborar una posición estratégica competitiva de una empresa maquiladora de barro anódico en Chile donde se obtenga además Telurio, esta estrategia se basará en la ventaja competitiva a nivel mundial que posee Chile la cuál será analizada a partir de las cuatro variables definidas en el análisis de la actual rivalidad entre competidores. Estas tres variables eran calidad del recurso, riesgo de suministro, diferenciación y avance en la cadena de valor.

Si se toma como referencia la composición del barro anódico publicado por Codelco se tiene que su composición de Telurio es competitiva en términos generales si se compara con lo reportado por el catastro del USGS. De acuerdo a la institución norteamericana el contenido de Telurio no superaba el 2%, mientras que de acuerdo a Codelco sus leyes de Telurio varían entre 0.5 y 3%. Así la calidad del recurso existente en Chile resulta ser competitiva respecto de lo que ocurre a nivel mundial. Es importante destacar que al nivel de estos procesos la ley o composición es sumamente determinante en el costo del proceso por lo que la calidad del barro anódico chileno supone un costo competitivo en la extracción del Telurio.

La segunda variable importante en la competitividad es la seguridad o el riesgo con que se obtiene acceso a los insumos, en particular al barro anódico. Una eventual empresa chilena que maquile barros anódicos y produzca Telurio debiera tener un acceso relativamente estable a este producto y definitivamente a un menor costo ya que las distancias de transporte son considerablemente menores si se compara con llevar el insumo a Bélgica o Japón. La estabilidad es aún más evidente si es la misma empresa la que produce el barro anódico (Codelco en Chile) y la que lo procesa (Codelco y LS-Nikko).

Destacar que esta alianza o relación entre productores de barro anódico y maquiladores es bastante común sobre todo en Japón donde las divisiones de metales de Mitsui y Mitsubishi son finalmente dueños de gran parte de las empresas anteriormente comentadas. De acuerdo a un informe de CRU esto pareciera ocurrir a nivel mundial hace ya más de diez años (CRU Group, 2003)

Respecto de la tercera y cuarta variable que guardan relación con la diferenciación del producto y con el avanzar en la cadena de valor existen sólo dos compañías que poseen este comportamiento. Sin embargo la empresa japonesa posee una desventaja respecto de la segunda variable puesto que si bien entre sus filiales la misma compañía es partícipe de la producción de barro anódico, la producción desde la mina de Cobre, y por ende Telurio, no es comparable a las tasas de producción en Chile. En otras palabras, el eventual productor nacional posee un suministro más estable que la empresa japonesa, por lo que esta nueva empresa debiese buscar avanzar en la cadena de valor (ya sea con compuestos de CdTe o BiTe, óxido de Telurio u otros) y logrará ser globalmente más competitiva que JX Nippon pues tendrá un similar avance en la cadena de valor pero un suministro muchísimo más seguro.

Respecto de la competencia con PT Smelting (que avanza en la cadena de valor y posee su propio yacimiento) vendrá dado por el hecho de que PT Smelting posee una capacidad de refinería de 300 kton de cátodos de Cobre al año, sin embargo sólo la refinería de Chuquicamata es más de dos veces superior en capacidad (750 kton al año) por lo que la empresa nacional podrá tener una mayor economía de escala al momento de procesar el barro anódico. Esta economía de escala se manifestara en un menor costo de producción y por ende ser más competitivos respecto a la primera variable.

Finalmente se tiene que una eventual empresa chilena que maquile barros anódicos con el objetivo, entre otros, de producir Telurio debe buscar hacer uso de tres factores claves: asegurar el suministro de barro anódico a través de negociaciones estables con las refinerías locales (Codelco), lograr avanzar en la cadena de valor para competir en el mercado de los compuestos del Telurio y finalmente procurar obtener el máximo potencial del recurso existente en el país para lograr tener una matriz de costos competitiva con la industria mundial lo cual, basado en la composición del barro y en las economías de escala, debiese ser factible. Con estas tres variables la industria local debiese competir de buena forma con el actual rendimiento del mercado del Telurio y los barros anódicos.

Respecto de la segunda variable se tiene que los productos de Telurio a manufacturar deben ser lo más diversos posible con el fin de evitar entregar poder de negociación a los clientes. Para el caso particular del compuesto de CdTe se vuelve estrictamente necesario generar relaciones comerciales con First Solar (que posee oficinas y sede en Chile) puesto que es el único potencial comprador. Así los requerimientos de calidad que solicite First Solar deben ser alcanzados y a un precio tal que logre competir con los productos ofrecidos por 5N Plus. Respecto de la primera y tercera variable existe una alternativa distinta que consiste en buscar otras fuentes de barro anódico (refinerías fuera del país) con el fin de poder aumentar aún más la economía de escala, de ser este el caso se debe procurar adquirir insumos de igual o mejor calidad de lo que actualmente se produce en Chile, esto con el objetivo de no perder competitividad operacional. Además deben generarse herramientas para independizar el proceso productivo de la variabilidad o riesgo que posee el suministro de barro anódico.

Por último cabe realizar una discusión respecto del actual proyecto conjunto de Codelco y LS-Nikko sobre una planta de metales nobles en Mejillones. Como ha sido descrito previamente el acceso al recurso, barro anódico, es un factor clave para el correcto desempeño de cualquier compañía que busca maquilar barro anódico. Cabe entonces hacer la pregunta ¿Cuál es el valor que entrega LS-Nikko al proyecto en conjunto? Es decir, si el recurso clave es el barro, ¿Por qué Codelco buscó alearse para desarrollar el proyecto?

Estas preguntas son válidas puesto que de acuerdo a la declaración de impacto ambiental presentada por el proyecto, la planta se diseñó para un ritmo anual de procesamiento de 3,880 toneladas de precipitado de refinería (barro anódico rico en Cobre), a su vez de acuerdo a las estimaciones realizadas previamente, en un año las refinerías de Codelco producen más de 2,000 toneladas de precipitado de refinería. Así la cuprífera estatal aporta con más del 50% del recurso clave para el desarrollo del proyecto.

Queda la idea entonces de que probablemente el mejor candidato para llevar a cabo esta empresa de maquila de barro anódico, recuperación de Telurio y de generar posteriores compuestos con este elemento, es Codelco pues tiene el recurso y si bien no es especialista en lixiviación de metales nobles la empresa tuvo por más de 20 años plantas de metales nobles donde se recuperó Oro, Plata y Selenio entre otros elementos.

Sin embargo en una conversación privada con personal de Codelco relacionado al proyecto en cuestión se comentó que existían dos argumentos para buscar alearse a la empresa LS-Nikko, el primero era porque el negocio era pequeño (VAN del orden de cientos de millones de dólares) comparado con el valor de Codelco y que además la empresa asiática aportaba el conocimiento metalúrgico necesario para desarrollar el proyecto. Además de estos argumentos, que se puede discutir su validez, se le agrega el hecho de que JX Nippon Mining & Metals (productora de CdTe) es dueña de LS-Nikko por lo que el conglomerado japonés está asegurando su suministro interno de Telurio con el proyecto en común con Codelco.

De esta forma toda la propuesta estratégica realizada en este trabajo está siendo llevada a cabo por los nipones sin embargo Codelco (Chile) no, puesto que desde el punto de vista de la cuprífera no se avanza en la cadena de valor y simplemente se está produciendo Telurio refinado. Es decir JX aseguró, a partir del barro anódico de Codelco, su suministro de diversos elementos, entre ellos el Telurio, con el objetivo de producir compuestos de CdTe y evidentemente buscará comercializarlo con la única empresa que hoy en día aparenta ser la que busca proveedores de CdTe: First Solar. Un análisis más propositivo de esta problemática sería considerar la alternativa de que esta alianza entre Codelco y LS Nikko busque alearse con eventuales clientes (como First Solar que ya está en Chile) e intentar ser partícipe del negocio siguiente a la producción de Telurio: producción de aleaciones o directamente producción de celdas solares. Es plausible considerar esta opción puesto que dado el carácter estratégico de este recurso First Solar debe buscar un abastecimiento estable de Telurio, el cuál puede ser provisto por Codelco-LS Nikko en la medida que puedan involucrarse en el negocio. Una visión aún más elaborada sería intentar fomentar la producción de celdas solares de CdTe en Chile mediante la alianza entre las tres empresas involucradas. Por un lado Codelco dispone del recurso crítico, LS Nikko de la tecnología para separarlo y finalmente First Solar con el conocimiento para utilizar el recurso de manera tal que se genera un producto de consumo final. El argumento para considerar la producción en Chile se basa en que es el país el proveedor del Telurio (recurso cada vez más escaso) y que al parecer la producción de celdas fotovoltaicas delgadas de alta eficiencia no representa un proceso de extrema complejidad y por lo tanto sería un desafío industrial con el que Chile podría avanzar en su desarrollo y realizar cambios estructurales en su economía.

Finalmente no es posible endosarle la responsabilidad a Codelco de que Chile no sea un productor de compuestos de CdTe o de celdas solares, sin embargo queda en evidencia que mientras los conglomerados japoneses, que se apoyan fuertemente en su gobierno, han buscado asegurar suministros para el desarrollo de industrias tecnológicas en su país, en Chile no se ha valorizado el recurso del Telurio como un insumo crítico para el desarrollo de la tecnología de paneles solares de CdTe. Este recurso no solo representa un valor en sí, también es una oportunidad de desarrollar a nivel país industrias tecnológicas que diversifiquen la economía nacional, que generen una mano de obra calificada, que se genere conocimiento exportable a nivel mundial y que finalmente se avance desde una economía productora de insumos básicos a una de tecnología y servicios.



## Capítulo 6 Conclusiones

El trabajo realizado en esta investigación consistió en tres grandes etapas: determinación de lo que a nivel mundial se ha definido como Elementos Críticos Energéticos, identificar el potencial geológico y metalúrgico en Chile como oferente de alguno de estos recursos a nivel mundial con el objetivo de definir los ECE de Chile como aquellos en los cuales el país puede participar del mercado y por último realizar un estudio acabado sobre el mercado de un metal en particular, el Telurio, pues es el ECE mundial donde Chile posee el mayor potencial de participar del mercado.

De la primera etapa de la investigación se concluye que diversos países desarrollados (Estados Unidos y los de la Comunidad Europea) han determinaron sus respectivos Elementos Críticos Energéticos como aquellos elementos que su suministro mundial se vea en riesgo (político o geográfico). Los elementos más importantes de ambas definiciones fueron Neodimio, Disprosio, Europio, Galio, Indio, Itrio, Telurio, Terbio.

Por su parte, en la segunda etapa se buscó determinar los Elementos Críticos Energéticos para Chile, entiendo como tal aquellos ECE definidos por los países desarrollados y en los que Chile posea un cierto potencial (geológico o metalúrgico) para participar como oferente en el mercado. Así se determinó la presencia de cada uno de estos elementos en los principales tipos de yacimientos del país (geología) y en sus principales “desechos” de sus faenas de beneficio (metalurgia). De la intersección de ambos trabajos se obtuvo que si bien Chile posee algún potencial en diversos elementos, sólo el Telurio es aquel donde el país realmente puede participar de manera estratégica y competitiva. Esto se basa en dos fenómenos, Chile es el principal productor de Cobre del mundo, y por ende de barro anódico y además los barros anódicos representan la mayor fuente de Telurio a nivel mundial. Así el potencial de Chile como oferente de Telurio es interesante. De todas formas, una de las importantes conclusiones de esta etapa fue el bajo conocimiento disponible sobre los diferentes recursos geológicos y metalúrgicos de Chile, y por lo tanto para una nueva versión de esta investigación sería interesante darle un enfoque más profundo a la geología del país y a sus recursos metalúrgicos.

Estudiando en profundidad el mercado del Telurio lo primero que queda en evidencia es la baja existencia de información y como algunas de éstas se contradicen entre sí. Tomando ciertos supuestos de la información, se concluye que la oferta y demanda del Telurio posee un comportamiento bastante volátil y que no es posible determinar que los factores que afectan a ambos comportamientos sean los propuestos por John Tilton. Los factores que sí lograron demostrar afectar estos comportamientos fueron el precio del Telurio para explicar la cantidad demandada y la oferta de Selenio para explicar la oferta de Telurio, esto último puesto que ambos elementos se obtienen a partir de la maquila de los barros anódicos producidos en la electrorefinación del Cobre por lo que poseen una relación de co-producto. Es un mercado de aproximadamente 125 MUS, y cuyo precio ha oscilado fuertemente durante los últimos cinco años.

Desde el punto de vista de sus aplicaciones el Telurio ha participado de diversas industrias durante los últimos 100 años, sin embargo es su utilización en paneles solares de CdTe la que lo ha convertido en objeto de análisis por diversos países y también en esta investigación. Esto ya que el suministro no posee un comportamiento estable y podría transformarse en un factor crítico para impedir el desarrollo de esta tecnología solar.

Respecto de la relación que Chile posee con este mercado se concluye que si bien las estadísticas productivas le asocian al país menos de 1% del mercado, el hecho real es que Chile ha estado donando Telurio al mundo en los últimos 8 años, particularmente a México y Bélgica. Esto pues ambos países han sido los principales destinos de exportación del barro anódico chileno sin embargo los elementos pagables de esta transacción no incluyen al Telurio. Esto queda aún más en evidencia cuando se observa que Bélgica es el principal productor de Telurio del mundo sin prácticamente participar de la producción de Cobre desde la mina. México a su vez, no parece ser productor de Telurio sin embargo se caracteriza por exportar grandes cantidades de aleaciones de Cobre con Telurio siendo el origen de este último el barro anódico de las refinerías de Chile.

Dado esto se estimó la cantidad de Telurio que Chile ha regalado de forma gratuita al mundo desde 1994 hasta la actualidad. Las cifras corresponden a 500 toneladas de Telurio con un valor equivalente a 55 MUS\$, estos valores corresponden a suponer la composición media de Telurio en los barros y consideran una recuperación metalúrgica del 30% y el precio reportado para cada periodo.

Si bien estos no son grandes volúmenes de dinero, se determinó que la pérdida no ha sido sólo económica sino también se ha perdido una oportunidad de ubicar a Chile en una posición estratégica como productor mundial de Telurio. La cuál, de conseguirse con antelación aportará a que Chile avance a una economía de productos con valor agregado y deje de ser un exportador de materia prima.

Luego, con el objetivo de realizar una propuesta empresarial se evaluó la atractividad del mercado del Telurio y la competitividad del mercado de maquila de barro anódico con un enfoque especial en el Telurio. A partir de esto se obtuvieron resultados bastante interesantes, donde la atractividad se destacó por poseer un ciclo de vida del producto bastante reciente para las aplicaciones electrónicas y donde existen además diferentes oportunidades de crecimiento siendo las principales la oportunidad de competitividad (por poseer un recurso escaso), oportunidades de distribución y uso para el caso de equipos termoeléctricos y finalmente una oportunidad de ofrecer una oferta estable de Telurio para su uso en celdas fotovoltaicas. Esta última aplicación posee un ciclo de vida bastante joven y sus proyecciones de la demanda son altamente dependientes de la tasa de penetración de la tecnología (en comparación a los otros tipos de celdas solares) y también de la real intensidad de uso que tenga el Telurio que si bien hoy en día es de 85 toneladas por GWp, existen fuentes que hablan de investigaciones cuyos objetivos es reducirlo a 13 toneladas por GWp.

Por su parte el análisis de competitividad permitió concluir las diversas fuerzas que determinan la competencia del mercado, y destaca principalmente como el suministro de barro anódico es la variable clave dentro del mercado y como las diversas empresas que participan de la maquila de barros anódicos buscan de manera directa o indirecta de poder acceder al recurso desde un nivel corporativo con sociedades y proyectos en conjunto con las empresas que explotan los yacimientos de Cobre.

En el análisis también se determinó que la eventual empresa que maquilará y producirá Telurio refinado debía avanzar en la cadena de valor comercializando compuestos en base a Telurio como pueden ser los compuestos CdTe, BiTe, Cu<sub>2</sub>Te u otros. Esta conclusión ha sido percibida por la compañía japonesa JX Nippon Mining & Metals que son productores de CdTe entre otros compuestos y que han asegurado el suministro del elemento mediante el proyecto en conjunto que su filiar LS-Nikko tiene con Codelco en Chile. Este proyecto considera la maquila de 3,880 toneladas de precipitado de refinería y la recuperación de Telurio entre otros de los elementos.

Si se considera que del total de alimentación del precipitado de refinería más del 50% es provisto por Codelco, cabe preguntarse ¿Por qué Codelco no decidió ser partícipe de la integración vertical que ostenta el conglomerado japonés? ¿Por qué dejar de lado la oportunidad de ser un país exportador de productos con valor agregado? Evidentemente esta responsabilidad no es imputable a Codelco en su totalidad sin embargo nace la interrogante ¿Existe alguna entidad gubernamental o estatal que esté en búsqueda de estos nichos de mercado? ¿Existe alguna entidad estatal que comprenda la oportunidad que existe en adelantarse al desarrollo de mercados incipientes como el del Telurio?

Finalmente hasta el momento se han identificado conclusiones para cada una de estas tres grandes etapas, sin embargo la metodología de investigación en sí también es parte crucial del trabajo sobre todo una vez realizadas las interrogantes del párrafo anterior. Esto ya que en la actualidad los problemas son energéticos, sin embargo en 100 o 200 años evidentemente las preocupaciones cambiarán y ya no será la energía el tema en cuestión y problemas como la salud u otros serán aquellos en los que se realizarán esfuerzos por encontrar soluciones que aporten al desarrollo global. Y en ese momento volverán a ser válidas las preguntas ¿Podrá Chile, con sus recursos mineros, aportar y ser parte del mercado de estos nuevos elementos críticos? ¿Podrá Chile prever el desarrollo de estas aplicaciones y mercados, para luego ubicarse en una situación estratégica que aporte al desarrollo de la economía del país para que se avance a un Chile más desarrollado, proveedor de insumos o productos con valor agregado y poseedor de un conocimiento tecnológico e industrial exportable?

En este sentido, la conclusión más fuerte de esta investigación es que estas interrogantes no pueden dejar de hacerse y constantemente se deben estar observando nuevos mercados incipientes donde Chile, con su riqueza mineral, pueda ser un actor relevante del mercado.

## Bibliografía

- MARSCHIK, R., & FONTBOTÉ, L. (2011). *The Candelaria-Punta del Cobre Iron Oxide Cu-Au(-Zn-Ag) Deposits, Chile*. Fretberg: Economic Geology.
- Anglo American Chile. (15 de Abril de 2012). *Anglo American Chile*. Recuperado el 24 de Mayo de 2013, de <http://www.angloamerican-chile.cl/>
- ARC Centre of Excellence in Ore Deposits . (2012). *Annual Report*. Tasmania: Australian Research Council.
- Audion, A. S., & Labbé, J. F. (2010). *Panorama 2010 du marché du Tellure*. Orléans: BRGM.
- Ayres, R. U., Ayres, L. W., & Rade, I. (2002). *The Life Cycle of Copper, its Co-Products and By-Products*. Londres: Mining, Minerals and Sustainable Development.
- Basov, V. (28 de Abril de 2013). *Mining*. Recuperado el 03 de 09 de 2013, de Russia wakes sleeping rare earth giant: [http://www.mining.com/russia-wakes-sleeping-rare-earth-giant-17116/?utm\\_source=digest-en-rare-earth-130506&utm\\_medium=email&utm\\_campaign=digest](http://www.mining.com/russia-wakes-sleeping-rare-earth-giant-17116/?utm_source=digest-en-rare-earth-130506&utm_medium=email&utm_campaign=digest)
- Berger, B. R., Ayuso, R. A., Wynn, J. C., & Seal, R. R. (2008). *Preliminary Model of Porphyry Copper Deposits*. Reston: USGS.
- BGS. (2010). *World Mineral Production 2004-2008*. London: British Geological Survey.
- BGS. (2012). *World Mineral Production 2007-2011*. Londres: Brithis Geological Survey.
- BMW FJ. (2011-2013). *WORLD-MINING-DATA WELT-BERGBAU-DATEN*. Viena: Bundesministerium fur Wirtschaft, Familie and Jugend.
- Brithis Geological Survey. (2011). *Rare Earth Element*. Londres: BGS.
- CAP. (2011). *CAP Minería Memorias 2011*. Santiago: CAP.
- CAP. (2012). *DIA Romeral FaseV*. Santiago: CAP.
- CAP. (2013). Annual Andean Conference. *CAP Presentación Larrain Vial* (págs. 1-38). Santiago: CAP.
- CCMC. (1997). *Recepción de Almacenamientos de Relaves Minosal en Tranque Relaves Mina Candelaria*. Santiago: Compañía Contractual Minera Candelaria.
- CCMC. (2010). *Programa de Monitoreo marino costero en Bahía Caldera*. Santiago: CCMC.
- Cembrano, J., Garrido, I., & Marquardt, M. (2009). *Tectonic Setting of IOCG deposits in the Central Andes*:. Paper, Santiago.

- CHÁVEZ, W. X. (1990). *Supergene Oxidation of Copper Deposits: Zoning and Distribution of Copper Oxide Minerals*. Socorro: HSOCIETY OF ECONOMIC GEOLOGISTS.
- China Ministry of Industry and Information Technology. (2012). *Situation and Policies of China's Rare Earth Industry*. Beijing: Information Office of the State Council.
- Cochilco. (2005). *La Legislación REACH de la Unión Europea y las Exportaciones Mineras Chilenas: Un análisis de Impacto*. Santiago: Cochilco.
- COCHILCO. (2012). *Anuario de Estadísticas del Cobre y Otros Minerales 1992 2011*. Santiago: COCHILCO.
- Codelco Chile. (2012). *DIA-TRANSPORTE DE BARROS ANÓDICOS*. Santiago: Codelco.
- Codelco Chile. (2013). *DIA- Proyecto Planta Recuperadora de Metales*. Santiago: Codelco.
- Crowson, P. (1991). *Minerals Handbook 1991-92: Statistics and analyses of the World's minerals industry*. Edenbridge: Mining Journal Books.
- Crowson, P. (1998). *Minerals Handbook 1998-99: Statistics and Analyses of the World's Minerals Industry*. Edenbridge: Mining Journal Books.
- Crowson, P. (2001). *Mineral Handbook 2000-01, Statistics and analyses of the world's mineral industry*. Mineral Journal.
- CRU Group. (2003). *Copper anode slimes: An evaluation of commercial terms*. CRU International Limited.
- División El Teniente, Codelco. (2000). *DIA- Depósito para las Escorias de Descarte de la Fundición*. Santiago: Codelco.
- División Salvador, Codelco. (2011). *DIA- Flotación de Escorias Convertidos Teniente Fundición Potrerillos*. Santiago: Codelco.
- División Ventanas, Codelco. (2007). *Optimización de las Celdas Electrolíticas Refinería Ventanas*. Santiago: Codelco.
- División Ventanas, Codelco. (19 de Octubre de 2012). *Codelco*. Recuperado el 18 de Mayo de 2013, de [http://www.codelco.com/codelco-ventanas-deja-de-producir-oro-y-plata-para-disminuir-sus-emisiones-al-ambiente/prontus\\_codelco/2012-10-19/223259.html](http://www.codelco.com/codelco-ventanas-deja-de-producir-oro-y-plata-para-disminuir-sus-emisiones-al-ambiente/prontus_codelco/2012-10-19/223259.html)
- División Ventanas, Codelco. (2012). *DIA TRANSPORTE DE BARROS ANÓDICOS*. Santiago: Codelco.
- DoE. (Noviembre de 2011). *2010 solar technologies market report*. U.S Department of Energy.
- DoE. (2011). *CRITICAL MATERIALS STRATEGY*. Washington, DC: U.S. DEPARTMENT OF ENERGY.

- Dold, B., & Fontbote, L. (2002). *A mineralogical and geochemical study of element mobility in sulfide mine tailings of Fe oxide Cu–Au deposits from the Punta del Cobre belt, northern Chile*. Ginebra: Chemical Geology.
- ENAMI. (2010). *AMPLIACIÓN PLANTA SX-EW A 1000 TMF/MES PLANTA SALADO ENAMI*. Santiago: ENAMI.
- Enterprise and Industry European Commission. (2010). *Annex V to the Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials*. Enterprise and Industry European Commission.
- FCX. (29 de Abril de 2013). *Freeport McMoran Copper and Gold*. Recuperado el 28 de Mayo de 2013, de [www.fcx.com](http://www.fcx.com)
- First Solar. (09 de 01 de 2013). *Investor: First Solar*. Recuperado el 27 de 08 de 2013, de First Solar: <http://investor.firstsolar.com/releasedetail.cfm?releaseid=732494>
- First Solar. (2013). *The Recycling Advantage Cost Effective and Sustainable*. First Solar.
- Fraunhofer. (2012). *Photovoltaics Report*. Freiburg: Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISI.
- Gelcich, S., Davis, D. W., & Spooner, E. T. (2004). *Testing the apatite-magnetite geochronometer: U-Pb and 40Ar/39Ar geochronology of plutonic rocks, massive magnetite-apatite tabular bodies, and IOCG mineralization in northern Chile*. Toronto: Geochimica et Cosmochimica Acta.
- Geological Survey of Finland. (2006). *Te-Tellurium*. Helsinki: GTK.
- Green, M. A. (2008). *Estimates of Te and In Prices from Direct Mining of Known Ores*. Sydney: Wiley InterScience.
- Gupta, C. k., & Krishnamurthy, N. (2004). *Extractive Metallurgy of Rare Earth*. Washington: CRC Press.
- Hatch, G., & Lifton, J. (20 de Mayo de 2013). *Technological Metals Research*. Recuperado el 14 de Junio de 2013, de [www.techmetalsresearch.com](http://www.techmetalsresearch.com)
- Hitzman, M., Oreskes, N., & Einaudi, M. (1992). *Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits*. Precam Res.
- IAVCI. (2004). General Assembly. (pág. 11). Pucón: IAVCI.
- IEA. (2012). *World Energy Outlook 2012*. Paris: International Energy Agency.
- International Copper Study Group. (2013). *The World Copper Factbook 2012*. Lisboa: ICSG.

- Jaffe, R., Price, J., Ceder, G., Eggert, R., Graedel, T., Gschneidner, K., y otros. (2011). *Energy Critical Elements*. APS PANEL ON PUBLIC AFFAIRS & THE MATERIALS RESEARCH SOCIETY.
- Karthik, N. (27 de Febrero de 2012). *Tellurium: Buzzle*. Recuperado el 05 de Julio de 2013, de [www.buzzle.com](http://www.buzzle.com)
- Keller, T. (5 de Junio de 2012). *Codelco*. Recuperado el 11 de Enero de 2013, de [http://www.codelco.com/prontus\\_codelco/site/artic/20120306/asocfile/20120306130444/presentaci\\_\\_n\\_pe\\_comisi\\_\\_n\\_especial\\_diputados\\_04jun2012\\_1815\\_pe.pdf](http://www.codelco.com/prontus_codelco/site/artic/20120306/asocfile/20120306130444/presentaci__n_pe_comisi__n_especial_diputados_04jun2012_1815_pe.pdf)
- Kul'chitskii, N. A., & Naumov, A. V. (2010). *State of Markets of Cadmium, Tellurium, and Related Compounds*. Moscú: Russian Journal of Non-Ferrous Metals.
- Lambin, J.-J. (2000). *Market-Driven Management*. Sydney: MacMillan Business.
- Lindsay, N. M. (1994). *Process mineralogy of Manto Verde, Chile*. Santiago: Anglo American Chile.
- Maeda, R. (5 de Enero de 2011). Japan budgets \$650 mln for rare earths resources. Tokio.
- Maksaev, V. (2003). *YACIMIENTOS DE ÓXIDOS DE Fe-Cu-Au CHILENOS*. Santiago: Universidad de Chile.
- Metallica Minerals Ltd. (16 de Octubre de 2012). *SCONI PROJECT REVISED SCOPING STUDY*. Brisbane.
- Minería Chilena. (15 de Julio de 2008). *Minería Chilena*. Recuperado el 14 de Junio de 2013, de [www.mch.cl](http://www.mch.cl)
- Ministry of Economy, Trade and Industry. (2009). *Announcement of "Strategy for Ensuring Stable Supplies of Rare Metals"*. Tokyo: Ministry of Economy, Trade and Industry.
- Moreno, T., & Gibbons, W. (2007). *The Geology of Chile*. Londres: The Geological Society.
- Morrison, W. M., & Tang, R. (19 de Noviembre de 2012). *China's Rare Earth Industry and Export Regime: Economic and Trade Implications for the United States*. Washintong: Congressional Research Center.
- Moss, R. L., Tzimas, E., Kara, H., Willis, P., & Kooroshy, J. (2011). *Critical Metals in Strategic Energy Technologies*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- ORREGO ALFARO, P. A. (2010). IDENTIFICACIÓN DE PROSPECTOS Y PROPUESTAS DE RECUPERACIÓN DE URANIO Y TIERRAS RARAS EN CHILE. *Reciclaje y recuperación de Metales y Materiales*, (pág. 41). Santiago.
- Polinares. (2012). *Fact Sheet: Rare Earths Oxides (REO)*. Dundee: European Research Area.

- Porter, M. (1980). *Competitive Strategy*. Nueva York: The Free Press.
- Riveros, G. (2009). *Apuntes Pirometalurgica Mi 51A*. Santiago: Universidad de Chile.
- Roskill. (2012). *Global drivers for rare earth demand*. Reporte.
- Sanchez, M., Reyes, P., & Valenzuela, A. (Abril de 2010). Opciones para el manejo y comercialización de escorias de cobre. Santiago.
- Seaman, J. (2012). *Rare Earths and the East China Sea: Why hasn't China embargoed shipments to Japan?* Paris: Ifri-CIGS Op.
- Selenium Tellurium Development Association. (2012). *Se & Te*. Cavite, Filipinas: Selenium Tellurium Development Association.
- SGM. (2004-2011). *Anuario Estadístico 2004-2011*. Ciudad de México: Servicio Geológico Mexicano.
- Sillitoe, R. H. (2003). *Iron Oxide Copper Gold deposits: an Andean view*. London: Mineralium Deposita.
- Sillitoe, R. H. (2003). *Iron Oxide-Copper-Gold: an Andean View*. Londres: Mineralium deposita.
- Subramaniam, A. (9 de Agosto de 2011). Office Memorandum. *Constitution of a Steering Committee to Develop a Strategy Paper on Status and Availability of Rare Earth Element (REE) and Energy Critical Element (ECE)*. Nueva Delhi: Ministry of Mines.
- Sukumaran, P. V. (25 de Marzo de 2012). The need to explore for rare earth minerals. *CURRENT SCIENCE*, 102(6), 839-841.
- Tse, P.-K. (2011). *China's Rare-Earth Industry*. Virginia: U.S. Geological Survey Open-File Report 2011-1042.
- UK ERC. (2012). *Tellurium Fact Sheet*. London: United Kingdom Energy Research Center.
- USGS. (2005). *Minerals Yearbook Selenium and Tellurium 2004*. United State Geological Survey.
- USGS. (2007-2010). *Tellurium*. United State Geological Survey.
- USGS. (2011). *Minerals Yearbook 2011 Selenium and Tellurium*. United State Geological Survey.
- USGS. (2012). *2011 Minerals Yearbook Selenium and Tellurium*. USGS.
- USGS. (2012). *Copper*. United State Geological Survey.
- USGS. (2012). *Metal Prices in the United States Through 2010*. United State Geological Survey.



- USGS. (2012). *Molybdenum*. United State Geological Survey.
- USGS. (2012). *Rare Earths Statistics and Information*. USGS.
- USGS. (2012). *Tellurium*. United State Geological Survey.
- USGS. (2013). *Bismuth 2013*. United State Geological Survey.
- USGS. (2013). *Selenium 2013*. United State Geological Survey.
- USGS. (2013). *Silicon 2013*. United State Geological Survey.
- USGS. (2013). *Tellurium*. United State Geological Survey.
- USGS. (2013). *Zinc*. United State Geological Survey.
- Vargas, T. (2003). *Biolixiviación de Sulfuros*. Santiago: Centro de Hidrometalurgia/Electrometalurgia.
- Vila, T., Lindsay, N., & Zamora, R. (1999). *Geology of the Mantoverde copper deposit, northern Chile: A specularite-rich, hydrothermal-tectonic breccia related to the Atacama Fault Zone*. In: Camus F, Sillitoe RH, Petersen R (eds) *Andean copper deposits: New discoveries, mineralization styles and meta*. Santiago: Society of Economic Geology.
- Weber, J. (1976). *Growth Opportunity Analysis*. Reston: Reston.
- Weeks, M. E. (1932). *The DISCOVERY of TELLURIUM*. Lawrence: University of Kansas.
- Weishaupt, R. (2009). *New portfolio of commercial products in CODELCO*. Santiago: Western Australian School of Mines.
- Westlake, A. (13 de Noviembre de 2012). Japan preparing to import 50% of rare earths from. *The Japan Daily Press*.
- Williams, P., Barton, M., Fonbote, L., Fontbote, L., de Haller, A., Mark, G., y otros. (2005). *Iron oxide copper gold deposits; geology, space-time distribution, and possible modes of origin*. Econ geology.
- Woodhouse, M., Goodrich, A., Margolis, R., James, T. L., Lokanc, M., & Eggert, R. (2012). *Supply-Chain Dynamics of Tellurium, Indium, and Gallium Within the Context of PV Module Manufacturing Costs*. IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS.
- World Metal Statistics. (1999-2011). *World Metal Statistics Yearbook*. Hertfordshire: World Bureau of Metal Statistics.

## **Anexos**

### **A. Elementos Críticos Energéticos por país**

#### **1. Estados Unidos**

En este caso hay dos grandes miradas, la estatal representada por el Departamento de Energía del país y otra más académica representada por la alianza entre la “American Physical Society” y la “Material Research Society”, siendo esta última la que creó y acuñó el concepto “Elementos críticos energéticos” mientras que el DoE ha trabajado, desde el año 2010, el concepto de “Estrategia de materiales críticos”. Si bien ambos documentos abarcan elementos químicos relevantes para el desarrollo de tecnologías energéticas, las definiciones difieren en ciertos puntos de vista.

##### **1.1 APS y MRS (Jaffe, y otros, 2011)**

Acuñando el concepto ECE, esta alianza los define como “aquellos elementos que actualmente aparentan ser críticos para una o más tecnologías relacionadas con la energía. Una escasez de estos elementos inhibiría significativamente el desarrollo a gran escala de esta tecnología la cual podría ser capaz de transformar la manera en que se produce, transmite y/o se almacena energía”. El ejemplo clásico de esta definición es lo que actualmente ocurre con las Tierras Raras para la manufactura de imanes utilizados en autos eléctricos y generadores eólicos, donde China -como principal productor- hace uso de su ubicación monopólica en el mercado teniendo severas consecuencias a nivel internacional como por ejemplo un precio diferenciado para el mercado interno y el de exportación. Sin embargo, ambas sociedades deciden incorporar además otros elementos donde eventualmente podría ocurrir algo similar o donde la oferta se puede ver amenazada no por la estructura del mercado sino que simplemente por su naturaleza de subproducto. Ejemplo de esto es el Telurio cuya disponibilidad se ve afectada puesto que su producción se basa únicamente en lo obtenido en las refinerías de Cobre a nivel mundial.

El análisis realizado en este proyecto incorpora una mirada más completa de los diferentes elementos, dejando de lado un análisis más en detalle de los mercados. En este sentido se tiene una visión desde la geología de estos elementos hasta sus aplicaciones. Por ende, y como es sabido, aquello que busca la completitud perderá consistencia y este caso no es la excepción, por lo que la mirada general del trabajo hace que se incorpore el grupo de los platinoides siendo esta definición la única que los considera.

La razón de incorporar los platinoides se debe básicamente porque cumple un requisito básico: las actuales fuentes de oferta de estos elementos son países de baja estabilidad política y además se agrega una eventual aplicación masiva de estos elementos en tecnologías de catalíticos para transporte. Este último punto de las aplicaciones de este grupo de elementos no parece ser considerada por el resto de las definiciones.

Por último, respecto a las otras definiciones que se trabajarán, este proyecto no propone una metodología para cuantificar riesgo ni tampoco para evaluar el posible desequilibrio entre oferta y demanda sino que simplemente es un análisis cualitativo basado en la información disponible y en la opinión de expertos.

En la siguiente ilustración se presentan los ECE determinados por las sociedades

hydrogen 1 <b>H</b> 1.0079																	helium 2 <b>He</b> 4.0026						
lithium 3 <b>Li</b> 6.941	beryllium 4 <b>Be</b> 9.0122																	boron 5 <b>B</b> 10.811	carbon 6 <b>C</b> 12.011	nitrogen 7 <b>N</b> 14.007	oxygen 8 <b>O</b> 15.999	fluorine 9 <b>F</b> 18.998	neon 10 <b>Ne</b> 20.180
sodium 11 <b>Na</b> 22.990	magnesium 12 <b>Mg</b> 24.305																	aluminum 13 <b>Al</b> 26.982	silicon 14 <b>Si</b> 28.086	phosphorus 15 <b>P</b> 30.974	sulfur 16 <b>S</b> 32.065	chlorine 17 <b>Cl</b> 35.453	argon 18 <b>Ar</b> 39.948
potassium 19 <b>K</b> 39.098	calcium 20 <b>Ca</b> 40.078	scandium 21 <b>Sc</b> 44.956	titanium 22 <b>Ti</b> 47.867	vanadium 23 <b>V</b> 50.942	chromium 24 <b>Cr</b> 51.996	manganese 25 <b>Mn</b> 54.938	iron 26 <b>Fe</b> 55.845	cobalt 27 <b>Co</b> 58.933	nickel 28 <b>Ni</b> 58.693	copper 29 <b>Cu</b> 63.546	zinc 30 <b>Zn</b> 65.39	gallium 31 <b>Ga</b> 69.723	germanium 32 <b>Ge</b> 72.61	arsenic 33 <b>As</b> 74.922	selenium 34 <b>Se</b> 78.96	bromine 35 <b>Br</b> 79.904	krypton 36 <b>Kr</b> 83.80						
rubidium 37 <b>Rb</b> 85.468	strontium 38 <b>Sr</b> 87.62	yttrium 39 <b>Y</b> 88.906	zirconium 40 <b>Zr</b> 91.224	niobium 41 <b>Nb</b> 92.906	molybdenum 42 <b>Mo</b> 95.94	technetium 43 <b>Tc</b> [98]	ruthenium 44 <b>Ru</b> 101.07	rhodium 45 <b>Rh</b> 102.91	palladium 46 <b>Pd</b> 106.42	silver 47 <b>Ag</b> 107.87	cadmium 48 <b>Cd</b> 112.41	indium 49 <b>In</b> 114.82	tin 50 <b>Sn</b> 118.71	antimony 51 <b>Sb</b> 121.76	tellurium 52 <b>Te</b> 127.60	iodine 53 <b>I</b> 126.90	xenon 54 <b>Xe</b> 131.29						
cesium 55 <b>Cs</b> 132.91	barium 56 <b>Ba</b> 137.33	* 57-70 lanthanum 57 <b>Lu</b> 174.97	hafnium 72 <b>Hf</b> 178.49	tantalum 73 <b>Ta</b> 180.95	tungsten 74 <b>W</b> 183.84	rhenium 75 <b>Re</b> 186.21	osmium 76 <b>Os</b> 190.23	iridium 77 <b>Ir</b> 192.22	platinum 78 <b>Pt</b> 195.08	gold 79 <b>Au</b> 196.97	mercury 80 <b>Hg</b> 200.59	thallium 81 <b>Tl</b> 204.38	lead 82 <b>Pb</b> 207.2	bismuth 83 <b>Bi</b> 208.98	polonium 84 <b>Po</b> [209]	astatine 85 <b>At</b> [210]	radon 86 <b>Rn</b> [222]						
francium 87 <b>Fr</b> [223]	radium 88 <b>Ra</b> [226]	* 89-102 actinium 89 <b>Ac</b> [227]	rutherfordium 103 <b>Lr</b> [261]	dubnium 104 <b>Rf</b> [262]	seaborgium 105 <b>Db</b> [262]	bohrium 106 <b>Sg</b> [264]	hassium 107 <b>Bh</b> [264]	meitnerium 108 <b>Hs</b> [265]	darmstadtium 109 <b>Mt</b> [268]	roentgenium 110 <b>Uun</b> [271]	copernicium 111 <b>Uuu</b> [272]	nihonium 112 <b>Uub</b> [277]	unbinilium 113 <b>Uuq</b> [289]										

* Lanthanide series	lanthanum 57 <b>La</b> 138.91	cerium 58 <b>Ce</b> 140.12	praseodymium 59 <b>Pr</b> 140.91	neodymium 60 <b>Nd</b> 144.24	promethium 61 <b>Pm</b> [145]	samarium 62 <b>Sm</b> 150.36	europium 63 <b>Eu</b> 151.96	gadolinium 64 <b>Gd</b> 157.25	terbium 65 <b>Tb</b> 158.93	dysprosium 66 <b>Dy</b> 162.50	holmium 67 <b>Ho</b> 164.93	erbium 68 <b>Er</b> 167.26	thulium 69 <b>Tm</b> 168.93	ytterbium 70 <b>Yb</b> 173.05
** Actinide series	actinium 89 <b>Ac</b> [227]	thorium 90 <b>Th</b> 232.04	protactinium 91 <b>Pa</b> 231.04	uranium 92 <b>U</b> 238.03	neptunium 93 <b>Np</b> [237]	plutonium 94 <b>Pu</b> [244]	americium 95 <b>Am</b> [243]	curium 96 <b>Cm</b> [247]	berkelium 97 <b>Bk</b> [247]	californium 98 <b>Cf</b> [251]	einsteinium 99 <b>Es</b> [252]	fermium 100 <b>Fm</b> [257]	mendelevium 101 <b>Md</b> [269]	nobelium 102 <b>No</b> [269]

Ilustración 1.1-1 ECE según APS y MRS

Elaboración propia. Fuente: APS & MRS

Se procede a enumerar los ECE definidos por la APS y la MRS, destacando los puntos clave de porque fueron considerados.

a. Tierras Raras: incluye el grupo de los lantánidos (excepto Prometio (Pm), Holmio (Ho), Erblio (Er) y Tulio (Tm)), el Ytrio (Y) y el Escandio (Sc). Este caso es uno de los más críticos y el más reconocido a nivel global. China representa el 95% de la oferta actual, incorporando un mercado de cuotas de exportación que ha generado una diferenciación entre los precios del mercado interno y el internacional. Las aplicaciones de estos elementos son de gran diversidad y van desde aleaciones metalúrgicas hasta como insumos en la manufactura de ampolletas de alta eficiencia, sin embargo es en el área de energía donde se encuentra la situación más crítica.

Elementos como Neodimio (Nd), Disprobio (Dy), Praseodimio (Pr) y Samario (Sm) son necesarios para la confección de imanes utilizados en la generación eólica y en los motores de autos eléctricos. Ambas tecnologías con altas expectativas de desarrollo masivo.

b. Fotovoltaicos: corresponden a elementos necesarios para la confección de celdas solares. Incluyen a Galio (Ga), Germanio (Ge), Selenio (Se), Indio (In), Telurio (Te). El problema ocurre, o mejor dicho su carácter de ECE es dado por el hecho de que todos estos elementos son subproductos de otros procesos. Mientras que Selenio y Telurio son obtenidos en los procesos de electro-refinación de Cobre, Germanio e Indio son obtenidos como subproductos de los procesos metalúrgicos de Zinc y Plomo, siendo el de Zinc el más relevante. Por último la producción de Galio se basa únicamente en lo obtenido como subproducto en el proceso metalúrgico de Aluminio y dado que el proceso de obtención de Aluminio es intensivo en energía, el reciclaje de Aluminio alcanzó valores del 35% durante el 2009, incidiendo en una menor producción de Aluminio “nuevo” y por ende una menor producción de Galio. Estos elementos están sometidos a lo que los autores de la APS y RMS llamaron “riesgo de producción conjunta” puesto que finalmente la producción de estos no se rige por un constante equilibrio de oferta demanda, sino como respuesta a lo que ocurre con los mercados de los productos principales.

c. Platinoides: en esta categoría se encuentra Platino (Pt), Paladio (Pd), Rodio (Rh), Rutenio (Ru), Iridio (Ir) y Osmio (Os). Todos ellos conforman lo que se conoce como PGE (elementos del grupo Platino por sus siglas en inglés). Con respecto al caso de los fotovoltaicos el problema es de naturaleza distinta. Estos seis elementos no son subproductos de otros, como ocurre con los fotovoltaicos, sino que entre ellos son co-productos en la mayoría de los yacimientos.

Para el caso de Platino Sudáfrica produce cerca del 79% mientras que Rusia un 11%, a su vez la producción de Paladio de estos mismos dos países representa más del 40% de la producción mundial. Esto de por sí no los hace críticos, pero en base a los parámetros norteamericanos de estabilidad política Rusia y Sudáfrica son países inestables y por ende existe un riesgo de abastecimiento al respecto.

Las actuales aplicaciones de estos elementos están relacionadas con los catalíticos utilizados para los autos, existiendo una alta tasa de reciclaje, sin embargo se especula que una nueva aplicación de éstos puede ser en las llamadas Pilas de Combustibles (Solid Oxide Fuel Cells) cuyo potencial comercial es aún desconocido. A pesar de la inestabilidad política de los principales países proveedores y de un posible aumento en la demanda producto de las pila de combustible, ningún otro estudio de elementos críticos energéticos incorpora a estos elementos.

Esto se debe principalmente a que los otros trabajos no incorporan la tecnología de pilas de combustible ni tampoco la de derivados del petróleo.

d. Otros: en esta categoría se encuentran Helio (He), Litio (Li), Cobalto (Co), Plata (Ag) y por último Renio (Re). Cada uno de estos elementos posee su propio mercado y al contrario de los casos anteriores, no existe relación de ningún tipo entre estos. De acuerdo a la APS y MRS, en el caso de Cobalto, Renio y Litio el problema es similar puesto que ninguno de los tres casos corresponde a mercados cuya producción se encuentre bien diversificada geográficamente.

El mercado de Litio está fuertemente representado por Argentina, Chile y Bolivia (aunque esta situación se encuentra sometida a varios cambios por la relevancia de este elemento en la fabricación de baterías para autos eléctricos y otros dispositivos móviles).

Por su parte Cobalto ha sido producido básicamente por países africanos (más de un 40% por República Democrática del Congo) con la inestabilidad política social que esto conlleva. Por último el caso de Renio (utilizado básicamente en la fabricación de turbinas de alto rendimiento) es aún más agudo ya que Chile posee una parte importante de la producción de este elemento además de encontrarse supeditado a la producción de Molibdeno, por lo que en estricto rigor es un subproducto de un subproducto de la producción de Cobre.

Respecto del Helio el análisis es más complejo pues el documento sugiere que sólo en este caso el Estado adquiera un stock de Helio con el objetivo de cubrir eventuales problemas en el futuro abastecimiento. La razón se debe a que la principal fuente económicamente rentable de Helio son los pozos de gas natural. Estos pozos, cuya explotación crece más que las nuevas reservas encontradas, no siempre son operados en su óptimo, liberando Helio a la atmósfera (en vez de rentabilizarlo) volviéndose económicamente inviable recuperarlo. Basado en el importante rol que este gas noble cumple en procesos criogénicos (a temperaturas cerca del cero absoluto) y en la industria nuclear se hace prácticamente insustituible y por eso se sugiere el stock estratégico.

Finalizado el análisis realizado por la APS y MRS, estas sociedades consideran que los ECE corresponden a los siguientes 29 elementos, en orden del número atómico: He, Li, Sc, Co, Ga, Ge, Se, Y, Ru, Rh, Pd, Ag, In, Te, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Yb, Lu, Re, Os, Ir, Pt. Las razones son variadas, siendo las principales: eventuales riesgos de monopolio por la concentración geográfica, el carácter de subproducto de los elementos y un relevante potencial de las tecnologías donde son utilizados.

Respecto a las medidas que sugieren tomar, concluyen que el estado debe buscar y promover la explotación de estos elementos dentro del territorio soberano del país, además se debe financiar investigación y desarrollo de estas tecnologías incorporando desde la disponibilidad de los elementos (tecnologías de exploración) hasta la mejora de la eficiencia de éstos para reducir sus cantidades en los productos finales, incluso hace hincapié en la relevancia que puede tomar el reciclaje.

Respecto a la intervención de los mercados mediante la creación de stock de estos elementos, sugieren que se realice únicamente en el caso de Helio por sus relevantes aplicaciones (procesos criogénicos y energía nuclear) y puesto que su fuente principal corresponde a las reservas de gas natural, las cuales se están agotando y no siempre Helio es recuperado en estas operaciones.

## **1.2 Departamento de Energía (DoE, 2011)**

El Departamento de Energía de Estados Unidos generó el año 2011 una “Estrategia de Minerales críticos” donde, similar a lo realizado por la APS y MRS, define ciertos criterios para considerar que elementos pertenecen a esta categoría. Si bien los criterios en ambos trabajos son prácticamente los mismos (potencial uso en el sector energético y el riesgo de disponibilidad de los elementos), el análisis realizado por el departamento de energía posee una mirada muchísimo más de mercado e industrial. Por esta razón el DoE toma como referencia cuatro mercados energéticos bien definidos y a partir de éstos determina aquellos elementos que son estratégicos para su correcto desarrollo. Los sectores elegidos son: turbinas eólicas, vehículos eléctricos (EVs), generación fotovoltaica y finalmente la industria de iluminación de alta eficiencia. Los criterios para elegir estos sectores corresponden al hecho de que en un plazo de 15 años estos cuatro mercados deberían estar completamente desarrollados y además su desarrollo depende de minerales atípicos por lo que la disponibilidad de éstos es estratégica. Demás está decir que los cuatro sectores considerados son un sustancial aporte a mejorar la sustentabilidad de la generación y consumo energético.

Identificado los elementos críticos para estas tecnologías (evaluación técnica), el DoE propone una metodología cuantitativa, y no cualitativa como en el caso de la APS & MRS, del riesgo y de la importancia de cada elemento en el desarrollo de una tecnología energética limpia.

### **1.2.1 Evaluación Técnica**

Para llevar a cabo la evaluación técnica de cada elemento se intentó cuantificar la importancia de cada ECE dentro del desarrollo de las distintas tecnologías energéticas. En concreto se consideró la importancia de cada elemento en los diversos productos que son necesarios para estas tecnologías (imanes, paneles fotovoltaicos, etcétera) y también se evaluó el potencial de sustitución de cada elemento en la industria. Para estas estimaciones el DoE se basó en las proyecciones de la Agencia Internacional de Energía (IEA), con cuyo trabajo se logra cuantificar proyecciones de penetración de diversas tecnologías, y si a esa información se le agrega el conocimiento experto aportado por personas de la industria se logra cuantificar el consumo esperado de cada elemento por tecnología y si este posee o no un sustituto.

De esta forma los resultados obtenidos por la investigación son los siguientes

hydrogen 1 <b>H</b> 1.0079																	helium 2 <b>He</b> 4.0026					
lithium 3 <b>Li</b> 6.941	beryllium 4 <b>Be</b> 9.0122																boron 5 <b>B</b> 10.811	carbon 6 <b>C</b> 12.011	nitrogen 7 <b>N</b> 14.007	oxygen 8 <b>O</b> 15.999	fluorine 9 <b>F</b> 18.998	neon 10 <b>Ne</b> 20.180
sodium 11 <b>Na</b> 22.990	magnesium 12 <b>Mg</b> 24.305																aluminum 13 <b>Al</b> 26.982	silicon 14 <b>Si</b> 28.086	phosphorus 15 <b>P</b> 30.974	sulfur 16 <b>S</b> 32.065	chlorine 17 <b>Cl</b> 35.453	argon 18 <b>Ar</b> 39.948
potassium 19 <b>K</b> 39.098	calcium 20 <b>Ca</b> 40.078	scandium 21 <b>Sc</b> 44.956	titanium 22 <b>Ti</b> 47.867	vanadium 23 <b>V</b> 50.942	chromium 24 <b>Cr</b> 51.996	manganese 25 <b>Mn</b> 54.938	iron 26 <b>Fe</b> 55.845	cobalt 27 <b>Co</b> 58.933	nickel 28 <b>Ni</b> 58.693	copper 29 <b>Cu</b> 63.546	zinc 30 <b>Zn</b> 65.39	gallium 31 <b>Ga</b> 69.723	germanium 32 <b>Ge</b> 72.61	arsenic 33 <b>As</b> 74.922	selenium 34 <b>Se</b> 78.96	bromine 35 <b>Br</b> 79.904	krypton 36 <b>Kr</b> 83.80					
rubidium 37 <b>Rb</b> 85.468	strontium 38 <b>Sr</b> 87.62	yttrium 39 <b>Y</b> 88.906	zirconium 40 <b>Zr</b> 91.224	niobium 41 <b>Nb</b> 92.906	molybdenum 42 <b>Mo</b> 95.94	technetium 43 <b>Tc</b> [98]	ruthenium 44 <b>Ru</b> 101.07	rhodium 45 <b>Rh</b> 102.91	palladium 46 <b>Pd</b> 106.42	silver 47 <b>Ag</b> 107.87	cadmium 48 <b>Cd</b> 112.41	indium 49 <b>In</b> 114.82	tin 50 <b>Sn</b> 118.71	antimony 51 <b>Sb</b> 121.76	tellurium 52 <b>Te</b> 127.60	iodine 53 <b>I</b> 126.90	xenon 54 <b>Xe</b> 131.29					
caesium 55 <b>Cs</b> 132.91	barium 56 <b>Ba</b> 137.33	57-70 *	lutetium 71 <b>Lu</b> 174.97	hafnium 72 <b>Hf</b> 178.49	tantalum 73 <b>Ta</b> 180.95	tungsten 74 <b>W</b> 183.84	rhenium 75 <b>Re</b> 186.21	osmium 76 <b>Os</b> 190.23	iridium 77 <b>Ir</b> 192.22	platinum 78 <b>Pt</b> 195.08	gold 79 <b>Au</b> 196.97	mercury 80 <b>Hg</b> 200.59	thallium 81 <b>Tl</b> 204.38	lead 82 <b>Pb</b> 207.2	bismuth 83 <b>Bi</b> 208.98	polonium 84 <b>Po</b> [209]	astatine 85 <b>At</b> [210]	radon 86 <b>Rn</b> [222]				
francium 87 <b>Fr</b> [223]	radium 88 <b>Ra</b> [226]	89-102 **	lawrencium 103 <b>Lr</b> [262]	rutherfordium 104 <b>Rf</b> [261]	dubnium 105 <b>Db</b> [262]	seaborgium 106 <b>Sg</b> [266]	bohrium 107 <b>Bh</b> [264]	hassium 108 <b>Hs</b> [269]	meitnerium 109 <b>Mt</b> [268]	ununnilium 110 <b>Uun</b> [271]	unununium 111 <b>Uuu</b> [272]	ununbium 112 <b>Uub</b> [277]	ununquadium 114 <b>Uuq</b> [289]									

\* Lanthanide series

lanthanum 57 <b>La</b> 138.91	cerium 58 <b>Ce</b> 140.12	praseodymium 59 <b>Pr</b> 140.91	neodymium 60 <b>Nd</b> 144.24	promethium 61 <b>Pm</b> [145]	samarium 62 <b>Sm</b> 150.36	europium 63 <b>Eu</b> 151.96	gadolinium 64 <b>Gd</b> 157.25	terbium 65 <b>Tb</b> 158.93	dysprosium 66 <b>Dy</b> 162.50	holmium 67 <b>Ho</b> 164.93	erbium 68 <b>Er</b> 167.26	thulium 69 <b>Tm</b> 168.93	ytterbium 70 <b>Yb</b> 173.04
actinium 89 <b>Ac</b> [227]	thorium 90 <b>Th</b> 232.04	protactinium 91 <b>Pa</b> 231.04	uranium 92 <b>U</b> 238.03	neptunium 93 <b>Np</b> [237]	plutonium 94 <b>Pu</b> [244]	americium 95 <b>Am</b> [243]	curium 96 <b>Cm</b> [247]	berkelium 97 <b>Bk</b> [247]	californium 98 <b>Cf</b> [251]	einsteinium 99 <b>Es</b> [252]	fermium 100 <b>Fm</b> [257]	mendelevium 101 <b>Md</b> [258]	nobelium 102 <b>No</b> [259]

\*\* Actinide series

### Ilustración 1.2.1-1 Elementos críticos según DoE

Elaboración propia. Fuente: DoE.

### 1.2.2 Evaluación de Riesgo

Para esta evaluación el DoE consideró las siguientes variables: disponibilidad básica (oferta en corto y mediano plazo basada en la puesta en marcha de nuevos proyectos), la demanda de sectores no energéticos de estos elementos (si se espera un aumento constante o rápido de estas tecnologías no energéticas que compiten con las consideradas por el DoE en el abastecimiento de los elementos en cuestión), riesgos sociales y políticos de los principales países productores, tipo de producción del elemento (principal, co-producto o subproducto) y finalmente el nivel de concentración geográfica de cada mercado.

A partir de esto el organismo creo una escala para valorizar cada variable en cada uno de los elementos, evaluando como variaban su valor en la escala en un corto y mediano plazo. No se justifica explicar en detalle en que consistió esta escala de valores sin embargo los resultados relativos entre los elementos y la variación en el corto y mediano plazo sí son interesantes de exponer puesto que se podrá determinar que elemento es más “riesgoso” que otro y como variará su riesgo en un futuro.

Se procede entonces a exponer los resultados obtenidos por el DoE

↑ Importancia en energía limpia	4 Alta			Ytrio	Disproσιο Europio Terbio
	3		Cerio Lantano Telurio	Neodimio	
	2	Níquel Litio	Cobalto Galio Manganeso Praseodimio	Indio	
	1 Baja		Samario		
		1 Bajo	2	3	4 Alto
		→ Riesgo →			

Crítico  
Cuasi crítico  
No crítico

**Ilustración 1.2.2-1 Riesgo e importancia ECE según DoE a corto plazo (5 años)**

Elaboración propia. Fuente: DoE.

↑ Importancia en energía limpia	4 Alta			Neodimio	Disproσιο
	3		Litio Telurio	Europio Ytrio	Terbio
	2	Níquel	Cobalto Indio Galio Lantano Cerio Manganeso Praseodimio		
	1 Baja		Samario		
		1 Bajo	2	3	4 Alto
		→ Riesgo →			

Crítico  
Cuasi crítico  
No crítico

**Ilustración 1.2.2-2 Riesgo e Importancia ECE según DoE a mediano plazo (15 años)**

Elaboración propia. Fuente: DoE.



En comparación a lo propuesto por APS & MRS se identifica que del grupo de lantánidos se excluyeron Escandio (Sc), Gadolinio (Gd), Erblio (Yb), Lutecio (Lu). También quedo afuera el grupo de los platinoides junto con el Selenio (Se) y Germanio (Ge) del grupo de los fotovoltaicos. Del grupo denominado “otros” se tiene que el DoE excluyó Helio (He), Renio (Re) y Plata (Ag) e incorporó a Níquel (Ni) y Manganeso (Mn).

Dado que existen varias similitudes entre ambos análisis (de los 29 elementos definidos por la APS y MRS, 14 están incluidos en el análisis del DoE), se procede a analizar las diferencias entre ambos. Es claro que aquellos elementos que excluyó el DoE se deben a que éstos no inciden en las tecnologías o sectores energéticos propuestos en el estudio por lo que se explica su ausencia, por su parte se debe explicar la incorporación de Níquel y Manganeso.

a. Níquel y Manganeso: ambos elementos se utilizan en la confección de baterías de almacenamiento para los autos eléctricos. Actualmente existen variadas tecnologías de baterías pero son las de NiMH (metal híbrido de Níquel) y las de Litio (ión Litio o Litio polímero) las de mayor potencial y ambos elementos están presente en estos dos tipos de tecnología por lo que el eventual desarrollo del mercado de vehículos eléctricos traerá consigo una expansión en el mercado de estos materiales.

Para el caso de Níquel el DoE supone un aumento en la oferta menor al aumento en la demanda (por lo menos en el mediano plazo), sin embargo el reciclaje de este elemento representa una buena solución, puesto que si bien Níquel reciclado no sirve para el uso en baterías, este podría reducir la demanda de mineral fresco para la industria del acero, dejando una mayor disponibilidad para el sector automotriz. A su vez el Manganeso se puede obtener a partir de procesos artificiales (Manganeso sintético) y por lo tanto su nivel de riesgo es bajo.

Haciendo un balance del análisis realizado por el DoE, el departamento Federal de Estados Unidos considera que los ECE corresponden a los siguientes 16 elementos, en orden del número atómico: Li, Mn, Co, Ni, Ga, Y, In, Te, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Tb, Dy. Esta elección responde a las aplicaciones de estos elementos en los tipos de tecnología consideradas por el trabajo y donde además se agrega cierta incerteza en la estabilidad de la oferta de estos mercados.

Como estrategia futura el DoE propone cuatro vías de trabajo: cooperación inter-agencias dentro del país, un plan de investigación y desarrollo, aumento en la generación de datos e información relacionada con el tema y finalmente una cooperación internacional entre los países que se vean afectados por la inestabilidad de los mercados de estos elementos. De estas vías de trabajo, la más concreta corresponde al plan de investigación y desarrollo, donde el departamento ha estado trabajando y financiando investigaciones relacionadas al mejoramiento de los procesos extractivos que existen actualmente y en la creación de nuevos procesos.

Además incorpora un fuerte desarrollo en generar sustitutos de estos materiales en sus aplicaciones energéticas, sobre todo en la industria fotovoltaica y de imanes para las turbinas de generación eólica y motores de vehículos eléctricos. Prueba de aquello son las investigaciones que se están realizando para reemplazar las Tierras Raras en la producción de imanes, ya sea con nuevos materiales o simplemente usar otro tipo de motores que no incorporen imanes permanentes (motores de inducción y otros), mientras que en el área de paneles solares se está investigando sobre producir paneles de materiales más abundantes en términos de mercado como son por ejemplo el Cobre, Zinc y Estaño.

No comenta sobre la necesidad de generar un stock estratégico de algún elemento.

## **2. Comunidad europea (Moss, Tzimas, Kara, Willis, & Kooroshy, 2011)**

En el año 2010 la comunidad europea define el plan de energía tecnológica estratégica (SET-Plan por sus siglas en inglés). Este plan busca, en términos generales, impulsar investigación, desarrollo y aplicaciones de tecnologías energéticas de baja emisión de carbono. El objetivo del programa definido como 2020 se basa en tres ideas: reducir un 20% las emisiones de CO<sub>2</sub> respecto de lo emitido en el año 1990, la producción de energía en base a tecnologías renovable no convencionales deben representar por lo menos un 20% de la energía producida en la matriz energética y por último se debe reducir el consumo primario de energía en un 20%. Todo esto debe alcanzarse antes del año 2020. Este documento, emitido por el Centro de Investigación Conjunta (JRC) del Instituto de Energía y Transporte (IET) de la comunidad europea, contenía un “mapa” tecnológico donde se estudia en términos técnicos diecisiete tipos de tecnologías de energía de baja emisión de carbono. De este grupo el JRC define que son sólo seis las más relevantes a estudiar en profundidad: energía solar fotovoltaica y de calor, energía eólica, energía nuclear de fisión, bioenergía, captura y almacenaje de carbono (CCS) y la transmisión eléctrica.

Destacar que el concepto “tecnología energética” alberga conceptos de generación, transmisión y de contención del CO<sub>2</sub>, mientras que de consumo energético solo considera eficiencias de consumo en el sector transporte. Esto último se diferencia de lo ocurrido con el trabajo del DoE puesto que en ese caso se hace un análisis en profundidad del sector iluminación. Esta diferencia conlleva que, si bien ambos listados de elementos sean similares, la perspectiva de análisis sea distinta y por ende también será diferente las estimaciones de consumo y el nivel de discordancia entre oferta y demanda de estos elementos.

Determinado cuales son las seis tecnologías más relevantes o prioritarias para la comunidad europea, el JRC decide estudiar si estas tecnologías están expuestas a experimentar dificultades en su desarrollo y penetración producto de inestabilidades en el suministro u oferta de los elementos químicos que la componen.

De esta forma decide realizar un estudio donde se identifican los elementos que son necesarios para la confección de equipos de las seis diferentes tecnologías energéticas, determinando que cerca de 60 elementos están involucrados en estos procesos, sin embargo excluye del análisis al Hierro, Aluminio y elementos nucleares puesto que representan mercados maduros, diversificados y de gran volumen y no se espera que existan problemas en su correcto suministro.

Luego, el trabajo realizado por los investigadores se puede dividir en dos etapas, la primera es de carácter económico donde a partir de estos 60 elementos se definen aquellos que poseen un perfil más crítico en relación a su oferta actual y su demanda futura (nivel de significancia). La segunda sección toma los resultados de la primera e incorpora un matiz de riesgo en las variables. Recordar que para la etapa anterior se supuso una tasa de penetración óptima de acuerdo a lo entregado por la Agencia Internacional de Energía y se mantuvo constante la mezcla tecnológica. Se procede entonces a explicar cada una de estas secciones y los resultados obtenidos.

## **2.1 Evaluación Económica**

A partir de este extenso listado se determinó aquellos elementos que son de “significancia” para el estudio en cuestión. Si bien la palabra “significancia” es de carácter relativo se definió que aquellos elementos en donde la demanda futura (entre los años 2020-2030) directamente ligada al desarrollo de estas tecnologías energéticas en Europa represente más de 1% de la oferta actual (2010) del respectivo elemento, entonces éste será parte del grupo de los elementos “significantes”. Para poder llevar a cabo este análisis se necesita de tres informaciones claves: la cantidad de cada elemento utilizado en cada tecnología, la penetración de cada tecnología en las próximas dos décadas y por último la cantidad ofertada de estos elementos en el año 2010. De cada uno de estos tres puntos es importante destacar que:

a. La cantidad de cada elemento utilizado se mide como la masa (Kg) utilizada por cada unidad de potencia instalada (MW) en el caso de la energía nuclear, solar y eólica. Para la bioenergía se considera la masa (Kg) por millones de toneladas (Mton) de petróleo equivalente que se generó a partir de bioenergía, mientras que para la CCS se considera la masa (Kg) de CO<sub>2</sub> emitido por cada unidad de potencia que será almacenada. Finalmente para la transmisión se considera la masa (Kg) por cada unidad de distancia (Km) de tendido eléctrico.

b. La penetración de cada tecnología se obtuvo a partir de las proyecciones realizadas por la Agencia Internacional de Energía y supone el caso más optimista de éstas. Destacar que la mezcla dentro de la misma tecnología se mantuvo constante respecto de la actualidad, es decir si hoy en día la potencia instalada de energía fotovoltaica está representada en un 5% por celdas delgadas de CdTe y el resto 95% por celdas de Silicio mono-cristalino (valores son sólo referenciales), entonces en el futuro se mantendrá la misma relación.

c. La información sobre la cantidad ofertada de cada elemento se obtuvo principalmente de los datos entregados por el United State Geological Survey (USGS) a excepción de casos particulares donde estas estimaciones pueden ser de baja precisión.

Realizado las mediciones del índice de “significancia” se obtuvo que los mercados de los siguientes 14 elementos se encuentran propensos a experimentar dificultades en sus ofertas o abastecimientos:

Vanadio (V), Níquel (Ni), Galio (Ga), Selenio (Se), Niobio (Nb), Molibdeno (Mo), Plata (Ag), Cadmio (Cd), Indio (In), Estaño (Sn), Telurio (Te), Hafnio (Hf), Neodimio (Nd), Disproso (Dy).

En la siguiente tabla quedan gráficamente expuestos.

hydrogen 1 <b>H</b> 1.0079																	helium 2 <b>He</b> 4.0026						
lithium 3 <b>Li</b> 6.941	beryllium 4 <b>Be</b> 9.0122																	boron 5 <b>B</b> 10.811	carbon 6 <b>C</b> 12.011	nitrogen 7 <b>N</b> 14.007	oxygen 8 <b>O</b> 15.999	fluorine 9 <b>F</b> 18.998	neon 10 <b>Ne</b> 20.180
sodium 11 <b>Na</b> 22.990	magnesium 12 <b>Mg</b> 24.305																	aluminum 13 <b>Al</b> 26.982	silicon 14 <b>Si</b> 28.086	phosphorus 15 <b>P</b> 30.974	sulfur 16 <b>S</b> 32.065	chlorine 17 <b>Cl</b> 35.453	argon 18 <b>Ar</b> 39.948
potassium 19 <b>K</b> 39.098	calcium 20 <b>Ca</b> 40.078	scandium 21 <b>Sc</b> 44.956	titanium 22 <b>Ti</b> 47.867	vanadium 23 <b>V</b> 50.942	chromium 24 <b>Cr</b> 51.996	manganese 25 <b>Mn</b> 54.938	iron 26 <b>Fe</b> 55.845	cobalt 27 <b>Co</b> 58.933	nickel 28 <b>Ni</b> 58.693	copper 29 <b>Cu</b> 63.546	zinc 30 <b>Zn</b> 65.39	gallium 31 <b>Ga</b> 69.723	germanium 32 <b>Ge</b> 72.61	arsenic 33 <b>As</b> 74.922	selenium 34 <b>Se</b> 78.96	bromine 35 <b>Br</b> 79.904	krypton 36 <b>Kr</b> 83.80						
rubidium 37 <b>Rb</b> 85.468	strontium 38 <b>Sr</b> 87.62	yttrium 39 <b>Y</b> 88.906	zirconium 40 <b>Zr</b> 91.224	niobium 41 <b>Nb</b> 92.906	niobium 42 <b>Mo</b> 95.94	technetium 43 <b>Tc</b> [98]	ruthenium 44 <b>Ru</b> 101.07	rhodium 45 <b>Rh</b> 102.91	palladium 46 <b>Pd</b> 106.42	silver 47 <b>Ag</b> 107.87	cadmium 48 <b>Cd</b> 112.41	indium 49 <b>In</b> 114.82	tin 50 <b>Sn</b> 118.71	antimony 51 <b>Sb</b> 121.76	tellurium 52 <b>Te</b> 127.60	iodine 53 <b>I</b> 126.90	xenon 54 <b>Xe</b> 131.29						
cesium 55 <b>Cs</b> 132.91	barium 56 <b>Ba</b> 137.33	* 57-70	lutetium 71 <b>Lu</b> 174.97	hafnium 72 <b>Hf</b> 178.49	tantalum 73 <b>Ta</b> 180.95	tungsten 74 <b>W</b> 183.84	rhenium 75 <b>Re</b> 186.21	osmium 76 <b>Os</b> 190.23	iridium 77 <b>Ir</b> 192.22	platinum 78 <b>Pt</b> 195.08	gold 79 <b>Au</b> 196.97	mercury 80 <b>Hg</b> 200.59	thallium 81 <b>Tl</b> 204.38	lead 82 <b>Pb</b> 207.2	bismuth 83 <b>Bi</b> 208.98	polonium 84 <b>Po</b> [209]	astatine 85 <b>At</b> [210]	radon 86 <b>Rn</b> [222]					
francium 87 <b>Fr</b> [223]	radium 88 <b>Ra</b> [226]	* 89-102	lawrencium 103 <b>Lr</b> [262]	rutherfordium 104 <b>Rf</b> [261]	dubnium 105 <b>Db</b> [262]	seaborgium 106 <b>Sg</b> [269]	bohrium 107 <b>Bh</b> [264]	hassium 108 <b>Hs</b> [269]	meitnerium 109 <b>Mt</b> [268]	unnilium 110 <b>Uun</b> [271]	ununium 111 <b>Uuu</b> [272]	ununium 112 <b>Uub</b> [277]	ununium 114 <b>Uuq</b> [289]										
* Lanthanide series			lanthanum 57 <b>La</b> 138.91	cerium 58 <b>Ce</b> 140.12	praseodymium 59 <b>Pr</b> 140.91	neodymium 60 <b>Nd</b> 144.24	promethium 61 <b>Pm</b> [145]	samarium 62 <b>Sm</b> 150.36	europium 63 <b>Eu</b> 151.96	gadolinium 64 <b>Gd</b> 157.25	terbium 65 <b>Tb</b> 158.93	disprosium 66 <b>Dy</b> 162.50	holmium 67 <b>Ho</b> 164.93	erbium 68 <b>Er</b> 167.26	thulium 69 <b>Tm</b> 168.93	ytterbium 70 <b>Yb</b> 173.04							
** Actinide series			actinium 89 <b>Ac</b> [227]	thorium 90 <b>Th</b> 232.04	protactinium 91 <b>Pa</b> 231.04	uranium 92 <b>U</b> 238.03	neptunium 93 <b>Np</b> [237]	plutonium 94 <b>Pu</b> [244]	americium 95 <b>Am</b> [243]	curium 96 <b>Cm</b> [247]	berkelium 97 <b>Bk</b> [247]	californium 98 <b>Cf</b> [251]	einsteinium 99 <b>Es</b> [252]	fermium 100 <b>Fm</b> [257]	mendelevium 101 <b>Md</b> [258]	nobelium 102 <b>No</b> [259]							

Ilustración 2.1-1 Elementos críticos según JRC-IET

Elaboración propia. Fuente: JRC-IET.

## 2.2 Evaluación de Riesgo

A partir de los 14 elementos identificados con la evaluación económica, de acuerdo a su nivel de significancia, corresponde entonces incorporar variables propias de la industria y también aquellas de carácter geopolíticas.

Para esto, los investigadores incorporan cuatro conceptos a medir en cada una de las industrias productivas de estos elementos: tendencia a un aumento acelerado de la demanda, limitantes para expansión de capacidad productiva en el corto y mediano plazo, concentración de la oferta y riesgo político de los países más oferentes. En la siguiente tabla quedan resumidas estas variables para cada uno de los elementos.

**Tabla 2.2-1 Factores de riesgo por elemento según JRC**

Metal	Factores técnicos		Factores geopolíticos		Riesgo global
	Tendencia aumento acelerado demanda	Limitante para expansión de capacidad C/L plazo	Concentración de la Demanda	Riesgo político	
<b>Disproσιο</b>	<b>Alto</b>	<b>Alto</b>	<b>Alto</b>	<b>Alto</b>	<b>Alto</b>
<b>Neodimio</b>	<b>Alto</b>	<b>Medio</b>	<b>Alto</b>	<b>Alto</b>	
<b>Telurio</b>	<b>Alto</b>	<b>Alto</b>	<b>Bajo</b>	<b>Medio</b>	
<b>Galio</b>	<b>Alto</b>	<b>Medio</b>	<b>Medio</b>	<b>Medio</b>	
<b>Indio</b>	<b>Medio</b>	<b>Alto</b>	<b>Medio</b>	<b>Medio</b>	
<b>Niobio</b>	<b>Alto</b>	<b>Bajo</b>	<b>Alto</b>	<b>Medio</b>	<b>Medio</b>
<b>Vanadio</b>	<b>Alto</b>	<b>Bajo</b>	<b>Medio</b>	<b>Alto</b>	
<b>Estaño</b>	<b>Bajo</b>	<b>Medio</b>	<b>Medio</b>	<b>Alto</b>	
<b>Selenio</b>	<b>Medio</b>	<b>Medio</b>	<b>Medio</b>	<b>Bajo</b>	<b>Bajo</b>
<b>Plata</b>	<b>Bajo</b>	<b>Medio</b>	<b>Bajo</b>	<b>Alto</b>	
<b>Molibdeno</b>	<b>Medio</b>	<b>Bajo</b>	<b>Medio</b>	<b>Medio</b>	
<b>Hafnio</b>	<b>Bajo</b>	<b>Medio</b>	<b>Medio</b>	<b>Bajo</b>	
<b>Níquel</b>	<b>Medio</b>	<b>Bajo</b>	<b>Bajo</b>	<b>Medio</b>	
<b>Cadmio</b>	<b>Bajo</b>	<b>Bajo</b>	<b>Bajo</b>	<b>Medio</b>	

Elaboración propia. Fuente: JRC-IET.

Al comparar los resultados obtenidos por la comunidad Europea y las dos fuentes estadounidenses se tiene que Plata (Ag) y Selenio (Se) fueron incorporados por el análisis realizado por la APS y MRS y también fue incluido por la JRC-IET, mientras que el DoE los excluyó.

Caso contrario ocurre con el Níquel (Ni) que fue incluido por la JRC-IET y por el DoE mientras que el trabajo conjunto de APS y MRS no lo consideraron crítico.

Las tres fuentes concuerdan en que los siguientes elementos sí poseen un carácter crítico: Galio (Ga), Indio (In) Telurio (Te), Neodimio (Nd) y Disprosio (Dy). Por su parte la JRC-IET incluyó elementos que no fueron incorporados por ninguno de los trabajos norteamericanos, estos fueron: Vanadio (V), Niobio (Nb), Molibdeno (Mo), Cadmio (Cd), Estaño (Sn), Hafnio (Hf).

De los seis elementos que fueron incorporados sólo por la JRC-IET se tiene que cuatro de ellos pertenecen a la categoría de bajo riesgo (Mo, Hf, Ni, Cd) mientras que V y Nb son de carácter medio. Se procede entonces a exponer las características más relevantes de estos seis elementos de acuerdo a sus aplicaciones:

a. Captura y almacenamiento de Carbono (CCS): de acuerdo a lo planteado por la JRC-IET hubo dos elementos que cumplieron con el nivel de significancia en la industria de los CCS, Vanadio (V) y Niobio (Nb). Destacar que no solo se utilizan para esta tecnología, sin embargo fue en el análisis de ésta donde sus respectivas ofertas actuales no superan el 1% de la demanda esperada para el año 2030 (para el año 2020 el valor no supera el 0.5%).

Ambos se utilizan como aleaciones de acero para las tuberías necesarias en estas tecnologías, sin embargo hubo dos grandes suposiciones dentro del análisis de la JRC: la tecnología utilizada en las tuberías será similar a lo utilizado actualmente en la industria del petróleo y también considero un consumo de estos elementos por unidad de potencia disponible por tecnología que operan en base a emisiones de carbono, sin embargo la distancias necesarias de las tuberías son aproximaciones que pueden varias muchísimo entre lo simulado y lo que realmente ocurre. En ese sentido el riesgo económico de V y Nb si bien supera el nivel de significancia está sujeto a muchísimos supuestos de carácter técnico y no de penetración de la tecnología como es en los otros casos.

Para el caso de Niobio, su producción se encuentra concentrada en Brasil (más de un 90%) sin embargo esto se equipara con la bajas limitaciones para aumentar la producción. La razón de esta capacidad es que actualmente existen grandes reservas de minerales de Niobio (Pirocloro y Columbita) y estos son las principales fuente de producción por lo que un aumento acelerado en la demanda podría ser cubierto con aumentar la explotación de estas reservas ya identificadas. Por otro lado sus aplicaciones a nivel general están estrictamente relacionadas con las aleaciones de acero, ya sea para uso estructural (puentes, edificios, etcétera) o en aplicaciones industriales (automóviles y otros).

El caso de Vanadio es similar en términos de que se espera un aumento en la demanda producto de su utilización en aleaciones de acero necesarias para las tuberías de los CCS y existe un potencial uso en baterías redox. Al evaluar el riesgo de suministro ocurre que su producción es concentrada ya que los tres principales países productores China, Rusia y Sudáfrica, representan más del 90% de la producción global.

Se le agrega además que cerca del 56% proviene de la escoria de los procesos del Hierro y Uranio, mientras que el resto de la producción se obtiene a partir de minerales de Vanadio donde su producción es un sub o co-producto en arenas de Titanio o de Uranio.

Sin embargo analizando la capacidad de aumentar la producción en el mediano plazo se tiene que existe una gran capacidad de que cada fuente de Vanadio pueda expandirse y mejorar los procesos productivos por lo que en el mediano plazo no debiera haber una oferta sobrepasada por la demanda.

b. Otras tecnologías: los restantes cuatro elementos Hf, Mo, Ni, Cd poseen significancia en energía nuclear, aleaciones de acero para energía eólica, aleaciones varias y energía solar respectivamente. Para el caso de Hafnio se tiene que su producción como elemento puro es reciente puesto que siempre se utilizó una mezcla de Zirconio con Hafnio, sin embargo cuando se descubrió sus propiedades de absorción de neutrones (que el Zirconio no posee) entonces se empezó a producir lingotes de Hafnio de alta pureza para incorporar este elemento en los sistemas aislantes de las plantas nucleares. A partir de la posibilidad de contar con Hafnio puro se han encontrado diversas aplicaciones, las más relevantes son como aislante de plantas nucleares, aleaciones aeroespaciales y últimamente como reemplazo del Silicio en semiconductores. La producción se encuentra entre 75 y 100 toneladas al año con Francia y Estados Unidos los principales oferentes. En términos de reservas Sudáfrica y Australia poseen más del 60% de un valor total que supera las 660 Kt. En este sentido no se prevé una escasez de este elemento.

Respecto del Molibdeno y Níquel se tiene que ambos participan como actores relevantes en aleaciones de acero. El Molibdeno supero el nivel de significancia en tecnología eólica por su uso en aleaciones, sin embargo su valor es bastante cerca del umbral. Generalmente obtenido como subproducto de operaciones de Cobre, el Molibdeno posee un excelente rendimiento mecánico a altas temperaturas por lo que es casi insustituible. Los países productores y con mayores reservas son China, Estados Unidos y Chile. Estos países cuentan con más del 80% de la oferta y más de un 85% de las reservas a nivel mundial. Si bien se prevé a futuro un desbalance entre oferta y demanda, dado su bajo nivel de relevancia en el desarrollo de tecnologías eólicas se considera con un bajo nivel de riesgo.

Por su parte Níquel no superó el nivel de significancia en ninguna de las tecnología propuesta sin embargo está presente en varias de éstas como aleación para el acero (nuclear, eólica, y CCS), por lo que la suma de índices sí supera el nivel de significancia. Su producción se basa en producto principal y co-producto junto con Zinc. El Níquel posee un mercado relativamente desconcentrado con 6 países que producen cerca del 90% del total a nivel mundial, mientras que las reservas están ampliamente distribuidas en diversos países por lo que se espera una desconcentración en el futuro. Actualmente existe un 45% de reciclaje de Níquel a partir de chatarra vieja, este valor es alto con respecto a otros elementos y de cierta forma asegura una disponibilidad futura.

Finalmente se encuentra el Cadmio (Cd) cuya principal aplicación actual es en baterías de Níquel-Cadmio sin embargo la razón por la cuál es incorporado en este análisis es por el relevante rol que puede llegar a tener en las tecnología fotovoltaica de paneles delgados de CdTe.

De acuerdo a lo considerado por la JRC-IET, el Cadmio supera el nivel de significancia al momento de evaluar la penetración de la energía fotovoltaica. Su principal fuente de producción son los yacimientos de Zinc, cuando posterior a la tostación del concentrado obtenido se logra obtener Cadmio como subproducto del proceso, por su parte la segunda fuente más importante es el reciclaje de baterías de Ni-Cd donde se obtiene un 20% de la oferta disponible. La aplicación principal de Cadmio corresponde a baterías, sin embargo en el último tiempo el consumo ha tendido a disminuir por sus posibles riesgos tóxicos sumado al reemplazo de baterías de Ni-Cd por otras de mayor tecnología. Se le agrega a esto el hecho de que en faenas de otro tipo de minerales se les está exigiendo, por razones ambientales, la recuperación de Cd para la deposición de los relaves. Esto ha tendido a aumentar la oferta e incluso a disminuir la parte del mercado ocupada por las faenas de Zinc. Lo anterior le entrega una ponderación global de bajo riesgo.

Se tiene entonces que el Centro de Investigación Conjunta del Instituto de Energía y Transporte de la Comunidad Europea (JRC-IET), considera que los ECE corresponden a los siguientes 14 elementos, en orden del número atómico: V, Ni, Ga, Se, Nb, Mo, Ag, Cd, In, Sn, Te, Nd, Dy y Hf. Esta elección responde a las aplicaciones de estos elementos en los tipos de tecnología consideradas por el trabajo y donde además se agrega cierta incerteza en la estabilidad de la oferta de estos mercados.

Respecto de las estrategias a tomar, el JRC-IET plantea una serie de sugerencias bastante similares a las planteadas por el DoE, pero sólo hace un análisis a los cinco elementos de riesgo global alto, dejando de lado los restantes nueve elementos. La primera estrategia sugerida guarda relación con generar capacidad de levantar información en términos de oferta, demanda y precio de estos elementos. Luego sugiere una serie de medidas para incentivar la industria local, medidas que van desde el apoyo a empresas juniors que exploran estos elementos hasta el fortalecimiento de los eslabones de la cadena de valor que ocurren en Europa. Para el caso del Nd y Dy Europa no posee minería en su territorio (excepto casos puntuales de reciente exploración en Groenlandia) pero sí tiene industrias manufactureras de imanes permanentes por lo que ésta debe ser protegida. El caso de los otros tres elementos: Te, Ga e In es distinto puesto que si bien la comunidad no posee explotaciones mineras asociadas a estos elementos, sí tiene diversas faenas de refinación de Cobre, Níquel y Aluminio donde se estima que haciendo esfuerzos en investigación y desarrollo se podría mejorar las tasas de recuperación de estos tres elementos como subproductos del proceso. Luego esta investigación debe también ser apoyada. Determina también que se debe desarrollar una cultura de reciclaje de estos elementos, tanto de chatarra vieja como la nueva. Finalmente sugiere en general investigar productos o tecnologías sustitutas de cada elemento o tecnología, en particular incita a enfocar la investigación en sustitutos de Indio en los óxidos de Indio Estaño y también buscar reemplazantes del Telurio en las aplicaciones de bajo valor como son las aleaciones aumentando así la cantidad de Telurio disponible para el desarrollo de paneles solares.



### 3. China, India y Japón

Hasta el momento ninguno de estos tres países ha emitido un estudio o informe donde se formalice las respectivas definiciones de Elementos Críticos Energéticos, sin embargo sí existe un elevado interés en estos elementos, en particular el caso de las Tierras Raras. Desde una perspectiva de la demanda, China y Japón son el primer y segundo país que más consume TTRR respectivamente, considerando además que la oferta está prácticamente concentrada en China (más del 95% del mercado) entonces ambos países son casos interesantes a considerar. Respecto de India, hasta el momento no juega un rol particularmente importante en este mercado, sin embargo es un país de gran tamaño en población donde si bien existe un nivel de subdesarrollo también poseen altos niveles de desarrollo tecnológico. Finalmente estas características los transforman en interesantes casos de estudio, por lo menos desde la perspectiva de las TTRR

#### 3.1 China

En términos generales se tiene que China empezó su producción de tierras raras a mediados de la década del 80 y fue paulatinamente tomando control del mercado mientras que Estados Unidos, el que en su momento fue el principal productor de estos elementos, fue reduciendo su producción por varias razones entre las que destaca problemas ambientales en el procesamiento de éstas. Fueron necesarios solo 15 años para que China representara más del 90% del mercado, posición que muy lejos de perder se ha ido haciendo cada vez más fuerte pues es el único país que logra ir creciendo su producción en armonía con la demanda (Tse, 2011).

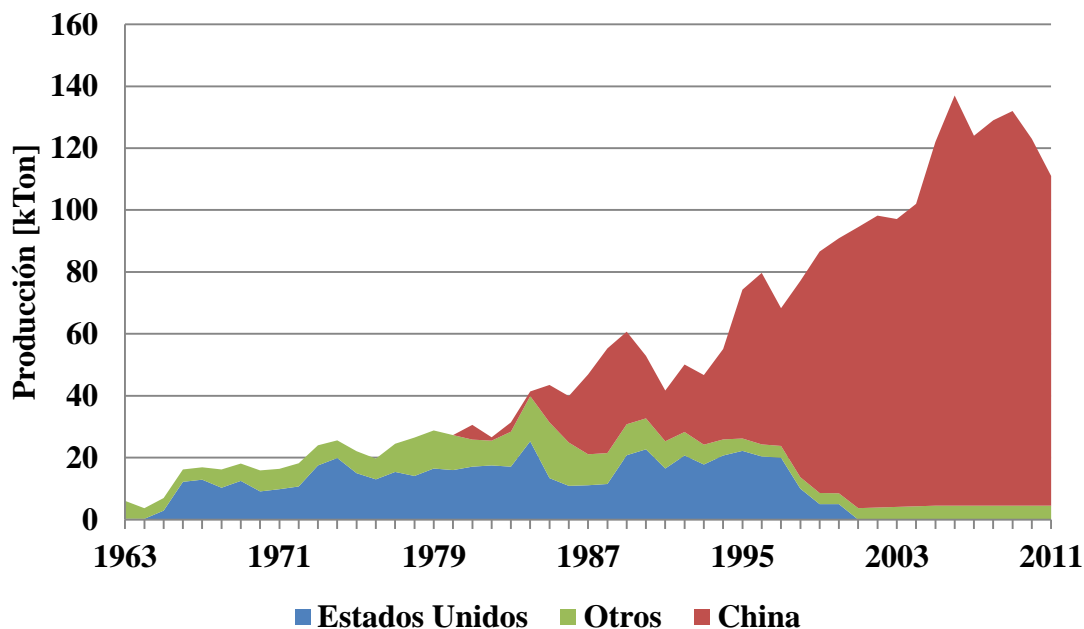


Gráfico 3.1-1 Producción China y Mundial de óxidos de Tierras Raras

Elaboración propia. Fuente: USGS

El año 2011 China produjo más de 97,000 toneladas de Tierras Raras de acuerdo a un informe entregado por el Ministerio de Industria e Información Tecnológica de ese país (MIIT), este valor es concordante con las 130,000 toneladas de óxido de tierras raras que el USGS estima fueron producidas por el país asiático. La cifra que no es en absoluto concordante es el porcentaje de reservas que posee China, por una parte el informe del MIIT estima que a nivel mundial ellos representan un 23% de las reservas (China Ministry of Industry and Information Technology, 2012) mientras que según el USGS este valor se alza por sobre el 50% (USGS, 2012). Este tipo de información asimétrica es bastante recurrente cuando se analiza lo que ocurre dentro de China puesto que la información entregada por ese país es, a veces, confusa e incongruente además de que el mismo Estado reconoce dificultades en estimar la producción real en la industria. Prueba de esto es la diferencia en cantidad de tierras raras exportadas según el servicio de aduanas chino respecto de la cantidad importada según los servicios de aduana de los países extranjeros. Entre los años 2006 y 2008 esta diferencia alcanzó valores cercanos al 35%, 56% y 36% respectivamente (China Ministry of Industry and Information Technology, 2012). Esta discrepancia hace evidente la existencia de un mercado no oficial de comercio de Tierras Raras, esto es aún más crítico si se considera que el estado chino estima que logró, el año 2005, un completo control de las faenas productoras de tierras raras dentro de su país, por lo que también existe un mercado productivo no oficial.

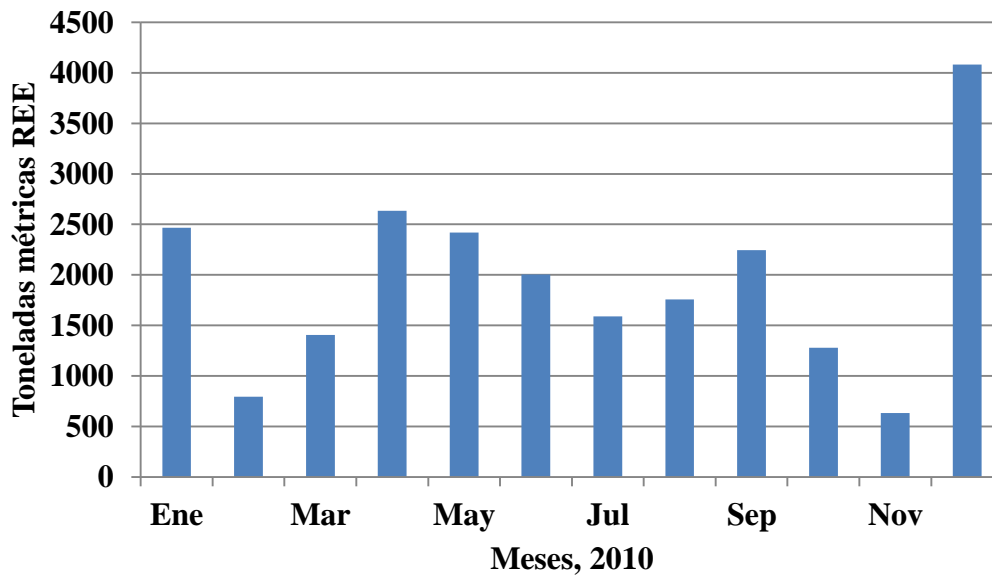
A pesar de todo esto China ha impuesto una cuota de producción de Tierras Raras desde comienzos de la década del 90, la cual ha ido variando a lo largo de los últimos diez años e incluso dos fuentes oficiales del gobierno chino han emitido distintos valores de cuotas para un mismo año generando una confusión mayor en la industria (Tse, 2011). Estas cuotas de producción son a nivel país y van acompañadas de cuotas de exportación que está definida para cada empresa productora y cuyo valor dependerá de si la empresa es de capitales chinos (empresas domesticas) o es un Joint Venture (JV) entre algún conglomerado extranjero con una empresa local (empresas sino-foráneas). No existe permiso para que empresas que en su totalidad sean extranjeras operen y/o procesen yacimientos o minerales de tierras raras dentro de China.

Además de las cuotas de exportación, el estado chino ha definido impuestos a la exportación de concentrado, óxido o cualquier otro tipo de producto de tierras raras donde éstas se encuentren en algún nivel de pureza (carbonatos, cloratos y otros), de esta forma junto con las cuotas de exportación y los impuestos, China ha estado tratando de incentivar el desarrollo interno de las industrias que utilizan Tierras Raras como insumo, y a modo de consecuencia se tiene que China produce más del 70% de los productos finales que utilizan estos elementos como son los imanes permanentes, artículos de luminiscencia, almacenamiento de hidrógeno entre otros. Todo esto con el objetivo de avanzar en la cadena de valor. (Tse, 2011)

En el año 1992 el entonces líder chino Xiaoping Dong dijo “el Medio Oriente tiene petróleo, pero China tiene Tierras Raras”, esta frase en su momento se utilizó como idea política económica de que estos elementos ayudarían a generar la riqueza necesaria para llevar a China desde el subdesarrollo a un país más avanzado en esas materias. Hoy en día el gobierno chino está convencido de que este “avance” se debe centrar en posicionar a China como el país referente en Tierras Raras, no solo a nivel de producción sino también en su conocimiento geológico, metalúrgico, de aplicaciones y de desarrollo de mercado.

### 3.2 Japón

Respecto de China, Japón se ubica justo en la situación opuesta. Si bien es el segundo país consumidor de Tierras Raras a nivel mundial (China es el primero), Japón prácticamente no posee producción de TTRR a partir de yacimientos propios, y sus recursos minerales de este tipo aparentan ser nulos (USGS, 2012). Esto ha llevado a que Japón posea un altísimo nivel de dependencia con China respecto de la disponibilidad de estos elementos, dependencia de la que China ha sabido tomar ventajas de distintas naturalezas, destacando principalmente el uso de esta situación como medio de negociación de temáticas político soberanas con Japón. En septiembre del año 2010 China cortó abruptamente el suministro de tierras raras a Japón como medida de presión respecto de una disputa de soberanía de las islas Senkaku (en japonés) o Diaoyu (en chino) (Morrison & Tang, 2012). El gráfico a continuación ilustra que en los meses de Octubre y Noviembre Japón vio sumamente reducida sus importaciones de productos de TTRR desde China



**Gráfico 3.2-1 Importaciones japonesas de TTRR desde China**

Elaboración propia. Fuente: Servicio de Aduanas de Japón.

En la actualidad, Noviembre 2012, estos países vuelven a enfrentarse por la soberanía de estas islas pero dado el aprendizaje obtenido el año 2010 por Japón y los esfuerzos económicos hechos por el país en generar una estrategia de suministro de Tierras Raras (Ministry of Economy, Trade and Industry, 2009) cuyo presupuesto superó los \$ 650 MUS\$ (Maeda, 2011), han logrado que Japón sea menos dependiente de China en la disponibilidad de estos elementos (Seaman, 2012).

En un comunicado al Parlamento japonés el Ministro de Economía, Comercio e Industria, Yukio Edano, informó que Japón reducirá un 50% la cantidad de Tierras Raras exportadas desde China para mediados del año 2013 (Westlake, 2012), evidencia de esto son las operaciones que el gobierno abrirá en Kazajistán, India y Vietnam.

### **3.3 India**

Este país posee varias características que lo proponen como un interesante actor en la industria de los elementos críticos energéticos. En términos generales India cumple con ser un país de gran cantidad de población (segundo después de China) y un desarrollo de tecnologías de bajo costo que va en aumento. Si se le suma a esto la preocupación a nivel gubernamental de desarrollar una estrategia focalizada para la producción local de Elementos Críticos Energéticos, que incorpore la disponibilidad geológica y el desarrollo de procesos de recuperación (Subramaniam, 2011), queda en evidencia la preocupación de esta futura potencia en el tema de los ECE.

En el caso particular de las Tierras Raras, India posee un segundo lugar en producción pero ésta representa menos del 2.5% mundial (USGS, 2012) mientras que sus reservas también bordean ese nivel de representatividad a nivel global. Sin embargo, de acuerdo a P. V. Sukumaran, India posee un entorno geológico que representa buenos objetivos de exploración de Tierras Raras, entre estos destacan los más de 40 plutones calco-alcalinos que ya están reconocidos y también el potencial en yacimientos de tipo ion-adsorbido y lateríticos. Toda esta información se orienta en la idea de que el país debe aumentar su nivel de exploración de Tierras Raras y debe desarrollar una industria asociada a la metalurgia y aplicaciones de éstas (Sukumaran, 2012).

## B. Producción de Cobre en Chile por tipo de producto

Flujo	Nombre	Fuente	2010 KTMF	2011 KTMF	Acumulado 1992- 2011 MTMF
1	Producción Mina	Cochilco	5419	5263	85
2	Producción Cátodos (LIX-SX-EO)	Cochilco	2089	2025	26
3	Producción de Fundición	Cochilco	1560	1364	29
4	Producción RAF (incluye RMB)	Cochilco	101	69	3
5	Producción Cátodos ER	Cochilco	1055	999	21
6	Producción Concentrado	(1)-(2)/0,8	2808	2732	53
7	Producción Concentrado no fundido	(6)-(3)/0,95	1166	1296	23
8	Producción Fundido no Electro Refinado	(3)-(5)/0,98	483	345	7
9	Producción de Concentrado no Electro Refinado	(6)-(5)/0,95/0,98	1675	1659	30

## C. Supuestos operacionales

Proceso	Recuperación Cu del proceso	Recuperación Acumulada desde Mina	Otros Supuestos	Valor	Unidda
Producción Mina	-	100%	Ley Minerales a Planta de LIX	1%	% en peso Cu
Producción Cátodos (LIX-SX-EO)	80%	80%	Recuperación en Peso LIX	5%	% en peso
Flotación sulfuros	86%	86%	Ley Minerales a Flotación	0,8%	% en peso Cu
Fundición de Concentrado	95%	82%	Ley Concentrado	28%	% en peso Cu
Refinado a Fuego	98%	80%	Producción Escoria	1.8	Ton de Escoria por Ton de Cobre Blíster
Electrorefinación	98%	80%	Producción Barro Anódico	1.5	Kg/ton de Cátodo ER
			Ley Cu en Precipitado	25%	% en peso Cu
			Participación Pórfidos en Cobre	77%	Del total de Cu flotado

## **D. Ripios de lixiviación Pórfidos Cupríferos**

En términos generales la obtención de Cobre mediante la lixiviación de minerales tiene por objetivo principal lograr recuperar el Cobre presente en minerales oxidados que generalmente se encuentran en la zona oxidada propia de los yacimientos de tipo pórfido cuprífero. Además de esta aplicación, en la actualidad la bio-lixiviación se ha utilizado como método de lixiviación de minerales supérgenos de sulfuros de Cobre, puesto que gracias a la presencia de bacterias se logra mantener el potencial Redox necesario para la disolución anódica del Azufre lo que permite la posterior disolución del Cobre (Vargas, 2003) .

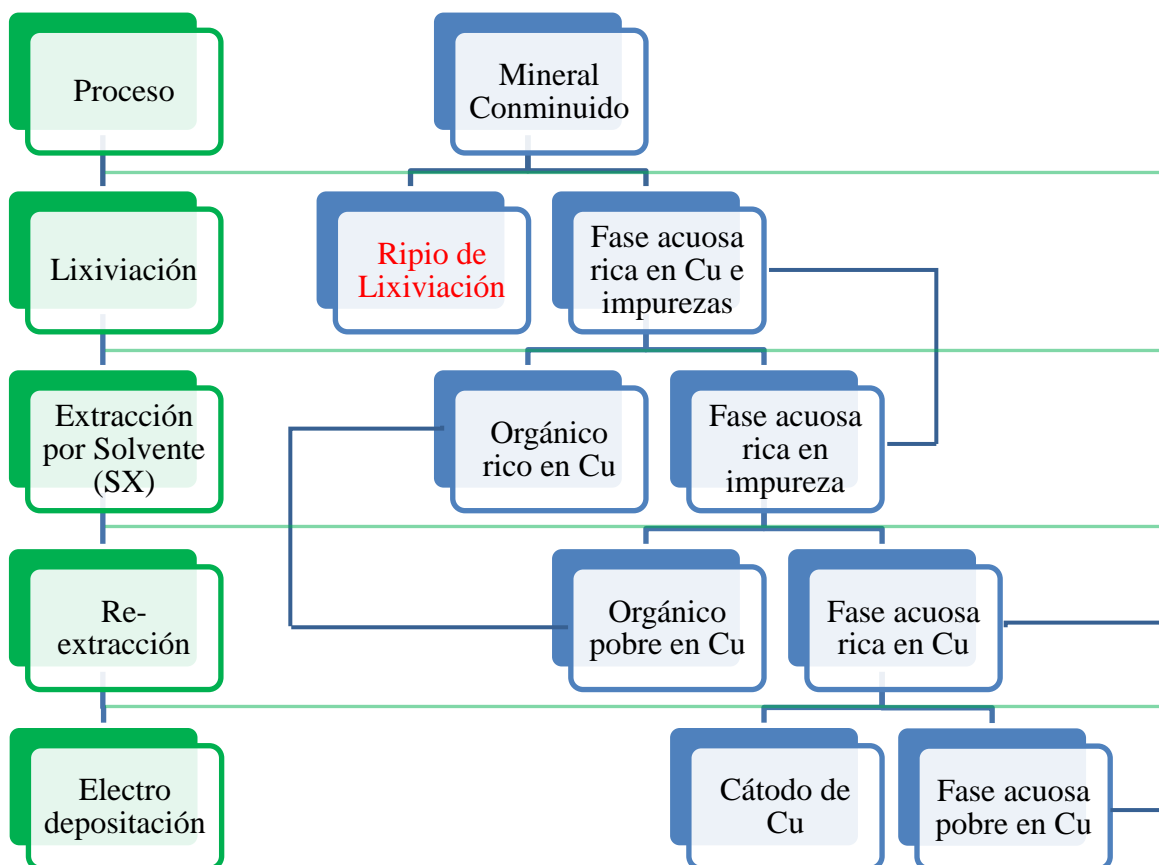
El proceso general de la lixiviación consiste en irrigar el mineral de Cobre con una solución ácida forzando electroquímicamente la disolución de los elementos a recuperar. Para el caso de los óxidos de Cobre, la lixiviación se lleva a cabo mediante una solución de ácido sulfúrico, por su parte para la lixiviación de sulfuros de Cobre también se utiliza una solución de ácido sulfúrico pero esta vez incluye además un agente oxidante para la disolución del Azufre. Respecto de las técnicas de irrigación del medio lixivante existen tres métodos principales: lixiviación en pilas mediante el riego del líquido ácido, lixiviación en bateas y finalmente lixiviación en celdas agitadas. En términos generales se tiene que la primera es la de menor costo de operación, menor recuperación y mayor tiempo necesario para realizar el proceso, la segunda alternativa es un estado intermedio y finalmente la lixiviación en celdas agitadas es la de mayor costo, mayor recuperación y la que menor tiempo de exposición del mineral al ácido requiere. Las razones económicas para elegir un sistema respecto de los disponibles dependerá de diversas variables cómo la mineralogía, costos de ácido e infraestructura cercana al yacimiento.

Desde el punto de vista del proceso global, de los insumos involucrados y de los productos obtenidos se tiene que el proceso de lixiviación posee cuatro etapas principales.

La primera consiste en la preparación mecánica del mineral (conminución), el cuál posteriormente será apilado o ingresado en bateas o celdas agitadas. Luego la segunda etapa consiste en la inyección del medio ácido al mineral previamente preparado, este medio inducirá la disolución de diversos elementos presentes en el mineral, particularmente el elemento de interés que es el Cobre. La tercera etapa consiste en la extracción por solvente (SX) donde el objetivo es eliminar las impurezas del electrolito obtenido en la etapa dos (aquellos elementos que no son interesantes pero que igualmente fueron lixiviados) y también se busca aumentar la concentración de Cobre en el líquido para así reducir los volúmenes de operación y mejorar las recuperaciones aguas abajo.

Esto ocurre mediante la utilización de un medio orgánico que mezclado con el medio líquido (electrolito de la etapa dos) logra selectivamente incorporar como compuesto orgánico el elemento de interés (Cobre) dejando en la fase acuosa todas las otras impurezas.

Luego este medio orgánico enriquecido en Cobre y carente de otras impurezas es sometido a un proceso de re-extracción en medio ácido, obteniéndose finalmente un electrolito rico en Cobre y libre de impurezas. Finalmente en la cuarta etapa, los iones de Cobre del electrolito son sometidos a un campo eléctrico dado por la inyección de corriente en un par de electrodos, forzando la depositación de Cobre de alta pureza en el cátodo.



**Diagrama D-1 Diagrama de lixiviación de Minerales de Cu**

Elaboración propia. Fuente: Apuntes Prof. T. Vargas

En el diagrama anterior está de color rojo el potencial candidato a recurso metalúrgico. Los rípios de lixiviación son básicamente minerales oxidados que han sido sometidos a una lixiviación por lo que existe un empobrecimiento de aquellos elementos solubles a las concentraciones de ácido con las que se trabaja. Además de este recurso, periódicamente existe una limpieza de las piscinas de electro depositación como también de las impurezas existentes en la fase acuosa obtenida en la primera etapa de la extracción por solvente. Sin embargo, como se verá más adelante, dado los tipos de mineral tratados por este método y su contexto mineralógico ninguno de estos recursos representa una fuente relevante de elementos críticos energéticos.

Este análisis también es válido para los rípos de lixiviación, puesto que provienen del mismo mineral, mas dado la importancia en volumen que este recurso tiene se dimensionará de todas maneras la actual producción chilena de rípos de lixiviación y posteriormente se detallará las razones por las cuales no debe esperarse encontrar una composición interesante de este recurso.

Para dimensionar el volumen de rípos que anualmente se produce en Chile es necesario conocer la fracción de Cobre que se extrae del país mediante el método de extracción por solvente e identificar que parte de esta producción proviene de la lixiviación de minerales de yacimientos tipo pórfidos cupríferos, puesto que en algunos yacimientos tipo IOCG este método también es utilizado para recuperar el Cobre, ejemplo de esto es Manto Verde, perteneciente a la división norte de Anglo American Chile.

Además de la producción de Cobre por esta vía, es necesario realizar un supuesto respecto de las leyes de Cobre en el mineral a lixiviar y también de la recuperación global de Cobre obtenida a través de este método.

El año 2011, Chile extrajo un total de 5.26 Mton de Cobre fino de sus diferentes operaciones mineras, de éste valor el método por extracción por solvente representa cerca de 2.03 Mton de cátodos de Cobre (COCHILCO, 2012). Además de esto se tiene que las operaciones que se desglosan en el anuario de estadísticas de Cochilco representan más de un 92% de la producción por lo que se puede determinar si estas provienen de yacimientos tipo IOCG o de pórfidos cupríferos. Para el año en cuestión, de las operaciones que representan más del 90% de la producción nacional, sólo Mantos Blancos, Manto Verde y Candelaria corresponden a yacimientos IOCG, el resto es de tipo pórfido cuprífero. De estas tres operaciones, Candelaria no procesa óxidos de Cobre puesto que dado el emplazamiento del yacimiento éste nunca afloró en superficie y por ende no existió un proceso de oxidación de minerales de Cobre (Maksaev, 2003).

Por su parte Manto Verde procesa únicamente óxidos de Cobre mediante SX mientras que Mantos Blancos procesa sulfuros y óxidos de Cobre. Esta última operación produjo un total de 36 Kton de cátodos de Cobre mediante lixiviación y Manto Verde alcanzó una producción total de 58.7 Kton de cátodos de Cobre con este mismo método, ambos valores corresponden a la producción del año 2011 (Anglo American Chile, 2012).

De esta forma, de los 2.03 Mton de cátodos de Cobre mediante SX que fueron producidos en Chile se sabe que 94.7 Kton provienen de yacimientos tipo IOCG. Luego para el caso de la producción no desglosada por Cochilco, que representa cerca de un 7% del total, no se logra conocer el origen geológico del metal. Dado que esta producción titulada como “otros” por la Comisión Chilena de Cobre representa un total 383.7 Kton de Cobre fino se tiene que la producción de cátodos mediante el método de extracción por solvente varía entre 1,915 Kton de Cobre fino (en el caso de que “otros” corresponda en su totalidad a yacimientos de tipo pórfido cuprífero) y 1,646 Kton de Cobre fino (en el caso de que “otros” corresponda en su totalidad a yacimientos distintos a los pórfidos cupríferos) (COCHILCO, 2012).



Bajo el supuesto conservador de que el valor corresponde a 1,646 Kton de cátodos de Cobre, considerando además que la ley media de los minerales es de 1% (el valor no deja de ser arbitrario sin embargo guarda relación con lo que las industrias publican en la actualidad) se tiene que si la recuperación de Cobre global del proceso es de un 80% (lixiviación, SX y deposición), entonces el año 2011 Chile lixivió un total de 205 Mton de minerales oxidados de Cobre. Luego, dada una pérdida de la masa del mineral de 5% producto de la lixiviación, se tiene que durante ese año en Chile se produjo cerca de 196 Mton de rípios de lixiviación. Es evidente que este valor puede cambiar considerablemente si se modifican los supuestos, dentro de los más relevantes son la ley media de estos minerales y la fracción de Cobre que proviene de yacimientos tipo pórfido cuprífero.

Corresponde entonces determinar si este recurso metalúrgico puede ser fuente de Elementos Críticos Estratégico, y lograr cuantificar este valor. Sin embargo y como fue descrito anteriormente no existe ninguna evidencia que permita postular que estos recursos puedan ser fuente de elementos como los que están en cuestión. Desde una perspectiva netamente geológica se tiene que los pórfidos cupríferos suelen presentar un empobrecimiento en Tierras Raras respecto al promedio de la corteza terrestre (Berger, Ayuso, Wynn, & Seal, 2008) lo que descarta cualquier potencial asociado a elementos como Neodimio, Disproso, Terbio, Itrio, y Europio.

Así mismo se sabe la existencia de Telurio en los pórfidos de Cobre (es la razón por la cual se obtiene Telurio dentro de los barros anódicos) sin embargo, esta estudiado la relación estrecha entre este elemento y las concentraciones de Arsénico en el yacimiento (Berger, Ayuso, Wynn, & Seal, 2008), en ese sentido dada la baja presencia de As en la zona oxidada de los yacimientos de este tipo (CHÁVEZ, 1990), no es de esperar que concentraciones interesantes de Telurio vayan a ser alimentadas a plantas de extracción por solvente.

Por otro lado, desde el punto de vista metalúrgico, el proceso de extracción por solvente no conlleva una modificación importante en la estructura mineralógica general de la alimentación a la planta.

Al contrario de lo que ocurre con la flotación y fundición (donde existe molienda y un proceso pirometalúrgico), en el proceso de LIX-SX-EO sólo ocurre una disolución de aquellos elementos más solubles cómo son Cobre, y Hierro (ENAMI, 2010) por lo que el mineral original no debiese cambiar en forma importante su composición ni tampoco su estructura mineralógica de tal forma que elementos trazas que eventualmente estuviesen presentes en la zona oxidada del yacimiento sufrieran un proceso de concentración o algo similar. En otras palabras, si el mineral original no correspondía a un yacimiento interesante desde la perspectiva de los Elementos Críticos Energéticos, el proceso sufrido en la lixiviación no va a cambiar esta realidad desde el punto de vista metalúrgico como sí ocurre en el proceso de los sulfuros de Cobre donde en los barros anódicos se obtienen interesantes concentraciones de Telurio.

A partir de la discusión generada en los párrafos anteriores se concluye que el potencial de este recurso es interesante desde el punto de vista del volumen (más de 180 Mton de ripios fueron producidas en Chile el año 2011), sin embargo dado el tipo de minerales que se tratan y el proceso en sí que estos minerales sufren se descarta que los ripios de lixiviación puedan ser fuente de elementos críticos estratégicos.

## **E. Relave IOCG**

Cómo fue explicado anteriormente, el proceso de obtención de relave para yacimientos de tipo IOCG es equivalente al realizado en las operaciones de pórfidos cupríferos por lo que no se volverá a explicar y diagramar el proceso en cuestión.

Respecto de la producción de Cobre asociada a la flotación de sulfuros provenientes de yacimientos de tipo IOCG actualmente existe sólo un principal operador: Compañía Minera Candelaria. Esta faena, que el año 2011 produjo 148.4 kTon de Cobre fino (COCHILCO, 2012), consiste en un yacimiento explotado mediante minería a cielo abierto y dos operaciones subterráneas, todas ellas alimentan a la planta de flotación Candelaria. Además de esto, Freeport McMorran (actuales dueños mayoritarios de esta operación), posee una pequeña faena denominada Ojos del Salado, que se encuentra al norte de Candelaria. Esta operación consiste en dos minas subterráneas Santos y Alcaparrosa, la primera alimenta su mineral a la planta Pedro Aguirre Cerda mientras que Alcaparrosa entrega su mineral a la faena de Candelaria. Su capacidad de operación es de 3,800 toneladas por día, lo que representa cerca de un 5% de la capacidad de Candelaria (FCX, 2013). De esto, y suponiendo que la producción de Cobre de cada faena es proporcional a su capacidad de procesamiento, se puede estimar que la planta Pedro Aguirre Cerda proceso cerca de 7.42 Kton de Cu fino del mineral proveniente de la mina Alcaparrosa.

Por otro lado la Empresa Nacional de Minería (ENAMI) posee una planta de beneficio denominada Planta Manuel Antonio Matta, ubicada en las afueras de la ciudad de Copiapó, Tercera región de Atacama.

Dada la ubicación de esta faena, y el hecho de que todos los yacimientos del tipo IOCG se ubican en las cercanías de Copiapó (distrito punta del cobre principalmente) es razonable suponer que de existir una pequeña minera explotando un yacimiento de tipo IOCG entonces el operador debiese comercializar su mineral a esta faena. Ningún sentido tendría llevarla a otras divisiones de ENAMI que se encuentran a mayor distancia.

De acuerdo a la información publicada por ENAMI, se tiene que planta Matta tiene una capacidad de tratar 100 Kton al mes de mineral. Si se considera una ley de 1% de Cobre en el mineral entonces anualmente Planta Matta podría tratar 12 Kton de Cu fino. Si bien suponer que toda la producción de esta Planta corresponde a sólo un tipo de yacimiento es bastante restrictivo, la eventual producción representa menos del 10% de lo producido por Candelaria en el mismo periodo.

De esta forma, de las tres faenas identificadas (Candelaria, P. Aguirre Cerda y Matta) y tomando los mismos supuestos considerados en la Tabla 4.3.1-1, se tiene que durante el año 2011 y bajo los supuestos antes comentados en Chile se produjo 16 Mton de relave proveniente de yacimientos de tipo IOCG.

**Tabla E-1 Producción Relave IOCG año 2011**

	Cobre Alimentado [Kton]	Relave producido [Kton]
Candelaria	148.4	18,080
Pedro A. Cerda	7.42	905
Planta Matta	12	1,460
Total	167.82	20,445

Elaboración propia. Fuente: CCMC, ENAMI y Freeport McMorran

Recalcar que este valor puede variar si alguno de los supuestos cambia de manera considerable, principalmente el que establece que planta Matta es alimentada en su totalidad por minerales de yacimientos tipo IOCG. Otro factor importante a considerar es que dentro de la estadística de producción de Cochilco, el ítem “otros” alcanza una producción de 383.9 Kton de Cobre fino para e mismo año. Luego se puede replicar el ejercicio realizado para la estimación de rípios en la sección anterior, y de darse la situación de que éstas casi 400 Kton de Cobre pertenecen en su totalidad a este tipo de yacimiento, entonces el relave producido sería cercano a las 37 Mton (en este caso hipotético la producción de Planta Matta y Pedro Aguirre Cerda estaría incluido en el ítem “otros”). En cualquiera de los casos (16,2 o 37 Mton) de relave producido al año el volumen es considerablemente menor que la producción asociada a pórfidos cupríferos, por lo que la cantidad de este recurso no es competitiva con las más de 300 Mton de relave que fueron estimadas para los yacimientos porfídicos.

Corresponde entonces determinar la calidad de este recurso, cuyo origen geológico lo hace interesante como fuente de Tierras Raras. Desde el punto de vista experimental se tiene que el año 1997 la Compañía Contractual Minera Candelaria (CCMC) ingreso una declaración de impacto ambiental puesto que buscaba reubicar los relaves de la Compañía Ojos del Salado en el tranque de la compañía Candelaria (CCMC, 1997).

Para ese entonces la compañía presento la composición media de ambos relaves, en cuyo análisis se consideraron los óxidos mayores (Al, Fe, Mg y Si) además de elementos traza como Oro, Plata y Telurio.

Los resultados presentados en la declaración son los siguientes:

**Tabla E-2 Composición media Relave Ojos del Salado y Candelaria**

Elemento	Unidad	Ojos del Salado	Candelaria
Ag	g/t	1	1.6
Au	g/t	0.14	0.1
Fe	%	16.7	22.7
Te	%	<0.0002	<0.0002

Elaboración propia. Fuente: CCMC

De los resultados anteriores se puede deducir que no existe un potencial interesante en los relaves generados por estas faenas. Esta aseveración es válida por lo menos en el caso del Telurio. La interrogante que se genera es si elementos como las Tierras Raras no fueron medidos o los resultados obtenidos fueron tan bajos que no era necesario reportarlos. Dado que esto no queda claro en el documento de la declaración ambiental y tampoco ha sido publicado por otros autores que han estudiado estos relaves (Dold & Fontbote, 2002) no es posible realizar una aseveración al respecto. Sin embargo, cómo fue publicado en el capítulo de recursos geológicos, el distrito punta del cobre posee variadas leyes de Tierras Raras y dependen fuertemente de la zona de alteración y el yacimiento en el que se mide.

En particular se tiene que para el yacimiento de Candelaria las Tierras Raras que son consideradas Elementos Críticos Energéticos suman un total que varía entre 40 y 60 g/t, destacando principalmente el Itrio y el Neodimio. Luego, si se realiza el restrictivo supuesto de que todas estas Tierras Raras quedan concentradas en el relave, entonces dado que la recuperación en peso de la flotación de Cobre no supera un 4% se puede estimar que las leyes de estos elementos no subirían más de un 5%. A su vez si tenemos que el total de Tierras Raras en cuestión se concentran junto con el Cobre, entonces su ley en el concentrado debiese aumentar cómo máximo a 1,500 g/t. Claramente el primer caso deja el relave del proceso prácticamente en la misma concentración que la roca original, sin embargo los costos asociados a la preparación mecánica del recurso ya están pagados.

Por su parte, de ser cierta la segunda situación hipotética, esto se contradiría con la composición del concentrado de Cobre que reporta la compañía.

En el año 2010, la empresa solicitó un estudio de monitoreo marino costero de la bahía de Caldera, en el documento se reporta la composición media del concentrado de Cobre que ellos cargan en esa bahía y no se reporta la concentración de las TTRR (CCMC, 2010). La información se presenta en detalle para cada año, desde 1995 hasta 2009.

En el reporte se consideran tanto las leyes de los elementos principales (Fe y Cu) cómo también elementos menores cuyas concentraciones no superan los 100 g/t (Cd, Hg y Mo entre otros) esto puede interpretarse de que la leyes de Tierras Raras en su concentrado de Cobre no representa un valor relevante. De esta forma la segunda alternativa de concentración se vuelve improbable. Como es de esperar la situación real del proceso de concentración de Cobre es que las Tierras Raras se distribuyan tanto en el concentrado como en el relave, sin embargo dado el argumento anterior es el relave el que más cantidad de Tierras Raras abarca.

De esta forma se tiene que los relavas de flotación de Cobre a partir de yacimientos de tipo IOCG no presentan concentraciones interesantes de Tierras Raras y tampoco de Telurio.

## **F. Descubrimiento y generalidades del Telurio**

Previo al descubrimiento por parte de Müller, en Rumania se había identificado en diversas zonas un mineral de Oro (de alto nivel de exfoliación) que poseía un elemento aparte del Oro. Algunos sostenían que correspondía a Antimonio, mientras que otros (incluido el propio Müller) sostenían que este “otro” elemento no era Antimonio sino que un compuesto de Azufre y Bismuto. Finalmente a fines de 1782 Muller, basado en el peso específico del compuesto y en otras propiedades como el olor emitido al ser calentado a fuego directo, concluye que este mineral posee Oro nativo y que además el “otro” elemento no está compuesto ni por Azufre y tampoco por Bismuto por lo que concluye que están frente a un “nuevo” constituyente de la materia.

A partir de esto el científico envía una muestra del mineral a otro investigador de Rumania, Torbern Bergman, quien sólo logra reproducir los experimentos de Müller y confirmar los resultados que él había obtenido. Meses después Bergman muere y por lo tanto sus investigaciones al respecto no logran profundizarse más. Una década después, el mismo Müller decide enviarle una muestra a otro científico, Martin Heinrich Klaproth, quién esta vez logra aislar este “nuevo” elemento del resto del mineral, confirmando lo propuesto por Müller hace ya varios años atrás, y denomina al nuevo elemento Tellurium (Telurio en español) cuyo significado corresponde a “Tierra” (del latín Tellus, que significa dios de la Tierra). En su publicación científica (Berlin, 25 de Enero de 1798) Klaproth menciona que el descubridor original es Müller y que él solamente logró aislarlo. Hasta ese entonces, la historia del descubrimiento del Telurio parecía ser un avance más en el desarrollo de la química de fines del siglo XVIII y comienzos del siglo XIX.

Sin embargo, paralelo a las investigaciones de Muller y Klaproth, el científico húngaro Paul Kitaibel había descubierto el elemento por sus propios medios. Este investigador había estado investigando a fines de 1789 respecto de un mineral que estaba compuesto, en teoría, por Molibdeno, Plata y Fierro.

Kitaibel, luego de algunas investigaciones concluye que este mineral estaba compuesto por otros elementos y que debían asimilarse a los encontrados por Müller en el mineral de Oro. El húngaro entrega sus resultados a Klaproth quién reconoce el avance pero no pareciera darle mayor importancia.

Luego, en 1798 Kitaibel se entera de la publicación de Klaproth donde no se hace mención a su trabajo realizado años antes y decide, mediante una publicación en el diario alemán “German Mercury”, acusar públicamente que el descubrimiento de Klaproth está basado en investigaciones que fueron realizadas por Kitaibel, concluyendo el escrito con la frase en latín “Suum Cuique” (traducido como “vivir honestamente” o “a cada cual lo suyo”).

A partir de esa declaración hubo una gran cantidad de correspondencias entre ambos científicos dando explicaciones y solicitándose recíprocamente la enmienda publica del honor de cada uno. La discusión interna finaliza con una publicación por parte de Kitaibel donde reconoce que lo investigado por Klaproth va en una línea muy distinta a lo realizado por él, siendo el trabajo del científico alemán muchísimo más profundo y concluyente para la demostración del descubrimiento de un nuevo elemento (Weeks, 1932).

A pesar de todo el conflicto honorífico y científico al respecto, sólo años más tarde se descubrieran las diversas propiedades de este elemento, las cuales han permitido que sea utilizado distintas aplicaciones como aleaciones con acero, Cobre y Plomo, paneles solares, lubricantes y otros productos de la industria química. En términos generales el Telurio, al ser un metaloide, entrega grandes ventajas cuando se usa como aleación en algunos compuestos. Particularmente la añadidura de este elemento a productos de Plomo aumenta su durabilidad, ductilidad e incluso mejora su resistencia a la corrosión. Por otro lado, la configuración electrónica del Telurio lo transforma en un gran candidato en la industria electrónica, en particular para aplicaciones de semi-conductores. Ejemplo son las aleaciones de Cadmio-Mercurio-Telurio que dan forma a un excelente compuesto sensible a radiaciones infrarrojas y también su aplicación en paneles solares se basa en sus características eléctricas.

Dada su amplia gama de aplicaciones, algunas instituciones sostienen que se deben buscar sustitutos para el Telurio en la industria de productos más básicos (aceros, compuestos de Plomo y otros) para así aumentar la disponibilidad de este elemento en sus otras aplicaciones relacionadas con la industria electrónica (Moss, Tzimas, Kara, Willis, & Kooroshy, 2011) donde pareciera jugar un rol más insustituible.

Desde una perspectiva más productiva y centrada en la actualidad, se tiene que el origen del descubrimiento del Telurio (minerales auríferos) no representa una fuente importante de este elemento, puesto que hoy en día más del 90% de la producción mundial proviene de la maquila o procesamiento de barras anódicas obtenidos en la electro-refinación de los ánodos de Cobre (Audion & Labbé, 2010).

Hoy en día este mercado es de un volumen de producción que varía entre las 100 y 250 toneladas métricas anuales y un tamaño de mercado cercano a los 55.5 MUS\$ si se considera que durante el 2010 el precio promedio fue de 221 US\$ por kilogramo (USGS, 2012).

## G. Propiedades del Telurio

Cómo fue nombrado anteriormente es el elemento químico número 52, perteneciente al grupo 16 de la tabla periódica que actualmente se utiliza a nivel mundial. Este elemento posee seis electrones de valencia y existen más de treinta isótopos de este elemento, sin embargo sólo ocho están presentes en la naturaleza.

El Telurio es un metaloide por lo tanto presenta propiedades del grupo de los metales y de los no-metales. Es un semi-conductor p-tipo con una resistencia eléctrica cercana a 1 ohm (en condiciones de 25°C), esta resistencia disminuye al contacto con luz natural. Posee un peso específico entre 6.2 y 6.3 y su estructura cristalina es hexagonal (Karthik, 2012).

En la siguiente imagen se resalta el Telurio dentro de la tabla periódica de elementos

hydrogen 1 H 1.0079																	helium 2 He 4.0026	
lithium 3 Li 6.941	beryllium 4 Be 9.0122											boron 5 B 10.811	carbon 6 C 12.011	nitrogen 7 N 14.007	oxygen 8 O 15.999	fluorine 9 F 18.998	neon 10 Ne 20.180	
sodium 11 Na 22.990	magnesium 12 Mg 24.305											aluminum 13 Al 26.982	silicon 14 Si 28.086	phosphorus 15 P 30.974	sulfur 16 S 32.065	chlorine 17 Cl 35.453	argon 18 Ar 39.948	
potassium 19 K 39.098	calcium 20 Ca 40.078	scandium 21 Sc 44.956	titanium 22 Ti 47.867	vanadium 23 V 50.942	chromium 24 Cr 51.996	manganese 25 Mn 54.938	iron 26 Fe 55.845	cobalt 27 Co 58.933	nickel 28 Ni 58.693	copper 29 Cu 63.546	zinc 30 Zn 65.39	gallium 31 Ga 69.723	germanium 32 Ge 72.61	arsenic 33 As 74.922	selenium 34 Se 78.96	bromine 35 Br 79.904	krypton 36 Kr 83.80	
rubidium 37 Rb 85.468	strontium 38 Sr 87.62	yttrium 39 Y 88.906	zirconium 40 Zr 91.224	niobium 41 Nb 92.906	molybdenum 42 Mo 95.94	technetium 43 Tc [98]	ruthenium 44 Ru 101.07	rhodium 45 Rh 102.91	palladium 46 Pd 106.42	silver 47 Ag 107.87	cadmium 48 Cd 112.41	indium 49 In 114.82	tin 50 Sn 118.71	antimony 51 Sb 121.76	<b>tellurium 52 Te 127.60</b>	iodine 53 I 126.90	xenon 54 Xe 131.29	
caesium 55 Cs 132.91	barium 56 Ba 137.33	lanthanum 57 La [138.91]	lutetium 71 Lu 174.97	hafnium 72 Hf 178.49	tantalum 73 Ta 180.95	tungsten 74 W 183.84	rhenium 75 Re 186.21	osmium 76 Os 190.23	iridium 77 Ir 192.22	platinum 78 Pt 195.08	gold 79 Au 196.97	mercury 80 Hg 200.59	thallium 81 Tl 204.38	lead 82 Pb 207.2	bismuth 83 Bi 208.98	polonium 84 Po [209]	astatine 85 At [210]	radon 86 Rn [222]
francium 87 Fr [223]	radium 88 Ra [226]	actinium 89 Ac [227]	lawrencium 103 Lr [262]	rutherfordium 104 Rf [261]	dubnium 105 Db [262]	seaborgium 106 Sg [266]	bohrium 107 Bh [264]	hassium 108 Hs [269]	meitnerium 109 Mt [268]	ununnium 110 Uun [271]	ununium 111 Uuu [272]	ununibium 112 Uub [273]	ununquadium 114 Uuq [289]					

\* Lanthanide series

lanthanum 57 La 138.91	cerium 58 Ce 140.12	praseodymium 59 Pr 140.91	neodymium 60 Nd 144.24	promethium 61 Pm [145]	samarium 62 Sm 150.36	europium 63 Eu 151.96	gadolinium 64 Gd 157.25	terbium 65 Tb 158.93	dysprosium 66 Dy 162.50	holmium 67 Ho 164.93	erbium 68 Er 167.26	thulium 69 Tm 168.93	ytterbium 70 Yb 173.04
---------------------------------	------------------------------	------------------------------------	---------------------------------	---------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	----------------------------------	-------------------------------	----------------------------------	-------------------------------	------------------------------	-------------------------------	---------------------------------

\*\* Actinide series

actinium 89 Ac [227]	thorium 90 Th 232.04	protactinium 91 Pa 231.04	uranium 92 U 238.03	neptunium 93 Np [237]	plutonium 94 Pu [244]	americium 95 Am [243]	curium 96 Cm [247]	berkelium 97 Bk [247]	californium 98 Cf [251]	einsteinium 99 Es [252]	fermium 100 Fm [257]	mendelevium 101 Md [258]	nobelium 102 No [259]
-------------------------------	-------------------------------	------------------------------------	------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	-----------------------------	--------------------------------	----------------------------------	----------------------------------	-------------------------------	-----------------------------------	--------------------------------

Ilustración G-1 Tabla Periódica de Elementos: El Telurio

Elaboración propia.

Respecto de sus propiedades físicas se tiene que el Telurio posee un punto de fusión de 450° C, y de ebullición de 998° centígrados. Su abundancia media en la corteza terrestre bordea las partículas por billón por lo que se encuentra entre los elementos naturales más escasos de la tabla periódica. Desde el punto de vista químico el Telurio posee principalmente tres estados de oxidación, Teluros (oxidación -2, compuestos como ZnTe, AuTe, HgTe entre otros), Teluritos (oxidación +4, compuestos oxidados de Hierro, Titanio y otros) y Teluratos (oxidación +6, es el estado menos frecuente).

El más frecuente estado del Telurio es el de oxidación -2 donde el mineral Calaverita (AuTe) es el más buscados producto de tratarse de un mineral de mena de Oro y Telurio.

## H. Fuentes

El Telurio es considerado dentro del grupo de “metales más raros” puesto que su promedio en la corteza terrestre corresponde al de los elementos menos presentes. De acuerdo a lo publicado por el USGS, el Telurio sería el noveno elemento de menor presencia en la corteza superficial, con un nivel cercano al del Oro, Renio y Platino

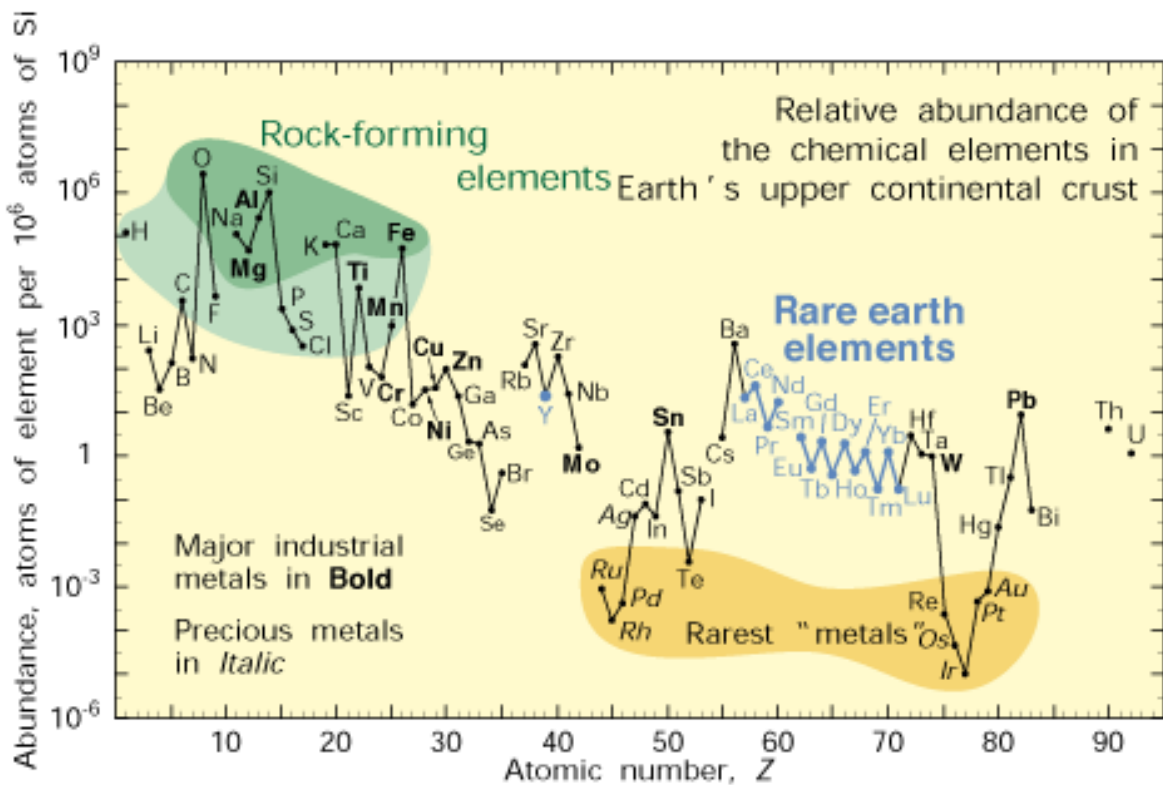


Ilustración H-1 Abundancia relativa de los elementos en la corteza terrestre continental

Fuente: USGS



Esta abundancia relativa a los átomos de Silicio, se traduce en que la ley de Telurio en la corteza corresponde a 0.3 g/ton. Valor que es incluso menor en los suelos y subsuelos de la Tierra donde la ley es inferior a 0.03 g/ton.

Por otra parte la concentración de Telurio en las aguas marinas varía entre 0.005 y 0.032 microgramos por litro (Geological Survey of Finland, 2006). De esta forma no existe un recurso no minero que si pueda representar una fuente interesante de Telurio.

Los tipos de yacimientos de Telurio que se conocen hoy en día en el mundo corresponden principalmente a tres casos: yacimientos tipo bonanza, donde la extracción de Telurio como elemento principal tiene cierta viabilidad económica, yacimientos auríferos (AuTe) donde la presencia de Telurio hace viable la extracción de este elemento como subproducto y finalmente están los yacimientos tipo pórfidos cupríferos donde si bien las leyes son bajas en el yacimiento (menos de 1 g/t) el proceso aguas abajo de la flotación de Cobre genera un subproducto (barro anódico) rico en Telurio (Green, 2008).

- a. Yacimientos tipo bonanza: se conocen dos de este tipo, el primero es el depósito de Bismuto y Telurio Dashiugou, China. Se han reportado leyes entre 0.2 y 25% de Telurio y existen publicaciones que hablan de 1000 toneladas de Telurio en calidad de reservas mientras que otras publicaciones más conservadoras hablan de 250 toneladas. El otro distrito de este tipo es Moctezuma, México donde se reportan 1,700 toneladas de Telurio a una ley media de 0.2%. Si bien este distrito es conocido hace varias décadas, ninguna empresa ha logrado producir Telurio como producto principal. Sólo una faena extrajo Oro en la zona pero nunca procesó sus relaves para la obtención de Telurio. El año 2008, la sociedad Minera Teloro obtuvo el derecho de explotación de un yacimiento ubicado en el distrito. Cabe destacar que esta compañía es subsidiaria de First Solar, única empresa del mundo dedicada a la manufactura de paneles de CdTe.
- b. Yacimientos Au-Te: destacan tres faenas principales Emperor Mine (Fiyi), Kalgoorlie (Australia) y Cripple Creek (Estados Unidos). Emperor Mine posee más de 3,500 toneladas de Telurio con una ley de 89 g/ton, siendo el total del recurso de 34 Mton. Para el yacimiento australiano se estiman recursos por más de 72 Mton de mineral de Au-Te, con una ley media de Telurio cercana a los 10 g/ton. Si bien nunca se ha producido Telurio en esta faena, estudios en los relaves hablan de leyes inferiores a 1 g/ton por lo que existe una pérdida de este elemento durante el proceso de obtención de Oro.

La mineralización encontrada en Cripple Creek posee una ley media de 10 g/ton de Telurio, lo que da un total de reservas de 1,000 toneladas de este elemento. Se le agregan además a este tipo de yacimientos el Bjorkdal, Suecia y también Muruntau, Uzbekistán. El europeo pareciera tener leyes interesantes en su concentrado de Oro, sin embargo de recuperarse el Telurio la producción no superaría las 20 toneladas al año. Caso contrario ocurre con el yacimiento asiático, donde su ley es bastante baja (10 g/ton) sin embargo las reservas superarían las 5,000 toneladas de Telurio.

- c. Pórfidos cupríferos: representan la mayor fuente de Telurio, si bien las concentraciones de este elemento no supera los 2 g/ton, en el proceso aguas abajo existe un factor de enriquecimiento entre 300 y 1000, lo que dejaría un subproducto de ley cercana 0.2% de Te (destacar que estos valores se asemejan a las leyes de Telurio reportadas por Codelco en su proyecto de barros anódicos en Mejillones).

Se estima que anualmente más de 1,300 toneladas de Telurio son obtenidas en el proceso de electro-refinación del Cobre sin embargo se recuperan menos de 400 toneladas (este valor superaría las estimaciones de producción de Telurio a nivel mundial, aportando aún más a la confusión de las estadísticas de este mercado).

- d. Otros: existen yacimientos del tipo VMS (Volcanic Massive Sulphide) donde existen reportes de leyes interesantes de Telurio sin embargo las cantidades no superan las 100 toneladas del elemento. Además existen grandes fuentes de Telurio (más de 9 Mton del elemento) en algunos sectores de la corteza oceánica. Sin embargo las bajas leyes (menos de 50 g/ton) hacen imposible explotar este yacimiento de manera económicamente rentable.

## **I. Aplicaciones históricas del Telurio y su evolución**

Xerografía: este proceso fue inventado para copiar e imprimir documentos de forma más rápida que la inyección de tinta, dando origen a las fotocopias e impresoras láser que se conocen en la actualidad. El Telurio, al ser fotoconductor, era sometido a una luz artificial con lo cual su carga electrostática superficial cambiaba y por ende se adsorbía al papel. Esta aplicación fue relevante en el Telurio durante todo el siglo XX sin embargo a mediados de la década del 2000 fue sustituido completamente por compuestos orgánicos y el Telurio dejó del todo ser necesario en esta tecnología. De todas formas parece no haber afectado mucho el mercado puesto que existía una alta tasa de reciclaje de Telurio a partir de las fotocopadoras e impresoras que se daban de baja.

Industria fotovoltaica: a partir del Telurio (elemento semiconductor) se logra formar un compuesto de Cadmio-Telurio el cual es utilizado para la manufactura de celdas solares delgadas. Al ser una película delgada la producción de estas celdas es posible industrializarla de gran forma, hasta el punto de que se pueden fabricar rollos de películas de CdTe. Esto induce que dentro de las celdas de mayor tecnología, sean las de menor costo. Desde un punto de vista más técnico este compuesto posee una diferencia de banda de 1.45 eV, lo que sumado a su alta absorción óptica le entrega propiedades únicas desde la perspectiva de generación de electricidad a partir de la radiación solar.

Respecto a los sustitutos del Telurio para esta aplicación, no es posible sustituirlo dentro de la aleación con Cadmio, sin embargo existen diversas tecnologías fotovoltaicas que están compitiendo entre sí por una mayor participación del mercado.

Hoy en día las celdas de Silicio representan más de un 85% de la potencia instalada a nivel mundial y del 15% restante las celdas de CdTe representan un 8%. Además se proyecta un aumento en la participación de las celdas delgadas, en particular de la tecnología de CdTe puesto que existe una tendencia desde el año 2000 cuando en esa época esta tecnología prácticamente no participaba del mercado. Desde el punto de vista del reciclaje se tiene que First Solar, la principal empresa del mundo en manufactura y comercialización de paneles de CdTe, posee plantas de reciclaje de los semiconductores utilizados en sus paneles (Telurio) y espera lograr recuperar más del 95% del material contenido en este. El proceso posee certificación internacional ISO 14001 e ISO 9001 (First Solar, 2013), por lo que es de esperarse una alza en el futuro en la tasa de reciclaje del mercado del Telurio. Recordar que la vida útil de un panel supera los 25 años.

Termoeléctricos: los aparatos termoeléctricos corresponden a un tipo de artículos que poseen una particularidad: al ser sometidos a un flujo de corriente, estos generan un diferencial de temperatura entre sus dos caras. Este efecto, conocido como Peltier-Seebeck, no guarda relación ninguna con el hecho de que cualquier material al ser sometido a una corriente se calienta. Esto porque el proceso ocurrido con los materiales termoeléctricos es reversible mientras que el proceso convencional de liberación de calor no lo es. Lo interesante de estos equipos, utilizados de forma importante en China con efectos de refrigeración, es que puede jugar un rol de refrigerante o calefacción. Se le agrega a esto además, que al ser un proceso reversible entonces al someter a un equipo termoeléctrico a una diferencia de temperatura entre sus paredes, entonces éste producirá un flujo de corriente eléctrica que eventualmente puede ser reutilizado. El Telurio, al poseer un alto poder termoeléctrico (mide la diferencia de voltaje generada en un elemento en función del diferencial de temperatura al que es sometido, se mide en V/K), es un elemento usado frecuentemente en estos equipos, generalmente en aleaciones con Bismuto y otros. En la actualidad la aplicación de estos equipos es en las instituciones militares y en el enfriamiento de equipos electrónicos, sólo en China ha tenido un uso directo en los hogares como forma de refrigeración y dispensadores de agua entre otros (USGS, 2011). Hasta el momento no se ha establecido el nivel de reciclaje del Telurio a partir de equipos termoeléctricos, sin embargo es probable que parte importante de la actual tasa de reciclaje de Telurio provenga de estos equipos.

Aleaciones ferrosas: los productos siderúrgicos o ferrosos aumentan su “maquinabilidad” al ser aleados con pequeñas cantidades de Telurio (< 0.1%). La “maquinabilidad” se refiere a la facilidad con que un metal puede ser maquinado, es decir cortado o darle un acabado adecuado. Actualmente no pareciese existir reciclaje de Telurio a partir de esta fuente, sin embargo se sabe que puede ser sustituido por otros elementos como Bismuto, Calcio o Selenio entre otros. De todas formas esta sustitución suele generar una ineficiencia en el proceso si se compara cuando la aleación es en base a Telurio (USGS, 2012).

Aleaciones no ferrosas: similar a lo que ocurre en aleaciones ferrosas, la incorporación de Telurio produce un aumento en la “maquinabilidad” del metal, particularmente para el caso del Cobre la aleación con Telurio asegura un aumento de la facilidad para ser cortado sin perder la conductividad eléctrica que caracteriza al metal rojo. La situación de reciclaje y sustitución es equivalente al caso de aleaciones ferrosas.

Neumáticas: el Telurio se utiliza como un agente vulcanizador en la reparación de neumáticos y también como catalizador en el proceso de manufactura de diversas gomas y fibras sintéticas. El reciclaje a partir de estos productos aparentemente no es posible y la sustitución del Telurio ha ido ocurriendo a medida que el elemento ha ido subiendo de precio en los últimos años. Azufre o Selenio suelen sustituir al Telurio en esta industria (USGS, 2012).

Otros: las aplicaciones anteriormente nombradas corresponden al 90% del consumo mundial de Telurio. El restante 10% se utiliza como pigmento para algunos vidrios y cristales y también se usa para la producción de sensores infrarrojos incorporados en cámaras térmicas y misiles “buscadores de calor”. No se reporta reciclaje ni sustitución para estas aplicaciones, sin embargo dado el bajo valor que representa el Telurio del total del equipo, es esperable que un aumento en su precio no induzca un interés relevante de sustituir el elemento en cuestión.