



*Servicio Nacional de Geología y Minería  
Subdirección de Minería  
Departamento de Depósitos de Relaves  
Santa Lucía 360; piso 2; Santiago de Chile  
leandro.herrera@sernageomin.cl*

## **Geoquímica de Superficie de Depósitos de Relaves de Chile**

El Sernageomin, a través del Departamento de Depósitos de Relaves de la Subdirección Nacional de Minería genera y publica este estudio en el trasfondo del ***Programa de Caracterización Geoquímica de Depósitos de Relaves*** de Chile. La información fuente se obtiene de muestras tomadas durante dos años, correspondiente a superficie de cubetas, muros y sedimentos, aguas abajo de los depósitos. Los datos se entregan en formato Excel™, versión 97-2003, y además pueden ser solicitados en formato CSV (u otros) mediante el formulario de contacto.

A la fecha de esta entrega, 27 de diciembre de 2016, los datos geoquímicos corresponden a 331 depósitos de relaves de un total de 696 depósitos que figuran en el Catastro Nacional de Depósitos de Relaves (generado también por este Departamento). Estos 331 depósitos, que ya tienen resultados de caracterización geoquímica, generan 870 registros de muestras caracterizadas (un mismo depósito genera varias muestras).

El Departamento de Depósitos de Relaves y el Departamento de Laboratorio continúan trabajando para hasta completar, a fines de 2017, los 696 depósitos existentes. Durante 2017 se inicia el estudio de composición en profundidad de los depósitos de relaves que presentan interés económico.

En estos 870 registros de datos, hay 447 registros de muestras de cubetas; 234 registros de muestras de muros; y 189 registros de muestras de sedimentos aguas abajo del depósito.

Se debe tener en cuenta que la minería se ha desarrollado durante toda la historia del país, de modo que existen relaves muy antiguos, no sujetos a normas del Estado; su localización y composición no son, por lo tanto, conocidos, y constituyen, habitualmente, evidencias de aquello que no se debió hacer (por ejemplo, usar ríos naturales para llevar relaves hasta la costa, usando el borde costero como sitio de disposición final de residuos masivos, y generando efectos imprevistos sobre la biota marina y submarina).

Hoy, en cambio, los depósitos deben cumplir requisitos legales ambientales y aquellos específicos de la minería, como el Decreto Supremo 248 del Ministerio de Minería (2007)<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> DS 248/2007: [www.sernageomin.cl/pdf/mineria/seguridad/reglamentos\\_seguridad\\_minera/DS248\\_Reglamento\\_DepositosRelave.pdf](http://www.sernageomin.cl/pdf/mineria/seguridad/reglamentos_seguridad_minera/DS248_Reglamento_DepositosRelave.pdf)

## Elementos y compuestos medidos por el programa

La caracterización geoquímica de las muestras cuantifica la concentración de 56 elementos y especies de cada muestra. Las mediciones son:

- 12 Elementos mayores, formadores de los minerales que forman la roca, expresados como óxidos: silicio ( $\text{SiO}_2$ ), aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), titanio ( $\text{TiO}_2$ ), hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), calcio ( $\text{CaO}$ ), magnesio ( $\text{MgO}$ ), manganeso ( $\text{MnO}$ ), sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ ), fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ), azufre ( $\text{SO}_3$ ) y compuestos perdidos por calcinación (PPC, como carbonatos, por ejemplo).
- Contenido porcentual de azufre (S).
- 30 elementos comunes en trazas (por debajo de 1%): cobre (Cu), vanadio (V), cromo (Cr), cobalto (Co), níquel (Ni), zinc (Zn), rubidio (Rb), estroncio (Sr), circonio (Zr) niobio (Nb), bario (Ba), plomo (Pb), cesio (Cs), hafnio (Hf), tantalio (Ta), arsénico (As), escandio (Sc), itrio (Y), molibdeno (Mo), antimonio (Sb), estaño (Sn), torio (Th), plata (Ag), cadmio (Cd), bismuto (Bi), wolframio (W), uranio (U), oro (Au), y mercurio (Hg).
- 14 tierras raras elementales<sup>2</sup>: Lantano (La), cerio (Ce), praseodimio (Pr), neodimio (Nd), samario (Sm), europio (Eu), gadolinio (Gd), terbio (Tb), disprosio (Dy), holmio (Ho), erbio (Er), tulio (Tm), iterbio (Yb), y lutecio (Lu).
- Se agrega además el total de elementos mayores, por simple suma.

Los métodos de análisis están descritos en el Laboratorio del Sernageomin.<sup>3</sup>

## Relaves de la minería según metal beneficiado

En Chile, la minería metálica generadora de relaves ha sido, principalmente, la minería de cobre y de oro. En menor escala, se encuentra la minería del hierro y del zinc. En general, otros metales se han extraído como productos secundarios (molibdeno, por ejemplo), de modo que se encuentran depósitos de relaves cuyos orígenes son variados, según el metal beneficiado. En los datos clasificados se encuentran formas de minería principalmente de Cobre, (Cobre; Cobre-Oro; Cobre-Molibdeno; Cobre-Oro-Plata; Cobre-Plata-Oro y; Cobre-Oro-Fierro) y de Oro (Oro; Oro-Cobre; Oro-Cobre-Plata; Oro-Plata y; Oro-Zinc). Además, existen registros de otras formas de minería (Hierro; Zinc y; Zinc-Cobre). Existen aún algunos registros en que se desconoce el origen de pequeños depósitos, marcados con S/I (abreviación de sin información).

---

<sup>2</sup> El Prometio (Pm) es un tierra rara, pero no se logrado aislar en la naturaleza (es sintético).

<sup>3</sup> Ver métodos en : [http://intranet.sernageomin.cl/laboratorio/?drawer=Laboratorio\\*4 Unidad%20de%20Laboratorio %20Qu%C3%ADmico%20y%20Medio%20Ambiente](http://intranet.sernageomin.cl/laboratorio/?drawer=Laboratorio*4%20Unidad%20de%20Laboratorio%20Qu%C3%ADmico%20y%20Medio%20Ambiente)

## Impacto económico de los depósitos de relaves

Estos datos pueden ser base de información económica inicial para la posible recuperación de elementos de valor en los depósitos de relaves, idea revisada por diversos actores, en particular la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO), mediante los proyectos:

- “Identificación, cuantificación y extracción (bio) tecnológica de minerales/elementos de valor contenidos en depósitos de relaves, código 16PTECME-66524” e
- “Investigación y Desarrollo para la Recuperación de Elementos de Valor Desde Relaves”, código 16PTECME-66627”.

Los elementos que pueden aportar valor económico, van desde el cobre hasta algunas de las Tierras Raras (Rare Earth Element) que han tenido gran valoración de mercado hace algún tiempo<sup>4</sup>, pero que en 2016 experimentan importantes bajas, según los estudios más especializados<sup>5</sup>. Otros elementos son, naturalmente, oro, plata, tungsteno, etc. En general, los elementos que figuran en la entrega de datos pueden ser tanto fuente de valor económico, como contaminantes. Los metales por ejemplo pueden ser valiosos si se les extrae en forma purificada, y pueden ser contaminantes si se les abandona en un estado que pueda ingresar y circular en los diversos ciclos de los ecosistemas. A partir de esta observación se puede postular que la extracción de todos los valores metálicos de un relave, previo a su depositación, sería una operación ventajosa tanto por los valores de venta de los elementos purificados como por la reducción de costos de Planes de Cierre, al asegurar que se dispone de material efectivamente inocuo. Si se extraen todos los valores metálicos o si se extrae toda la capacidad de producción de ácido, se dispondría de un relave inocuo, cuyo plan de cierre se vería simplificado y sus costos reducidos de manera importante.

## Impacto de contaminantes

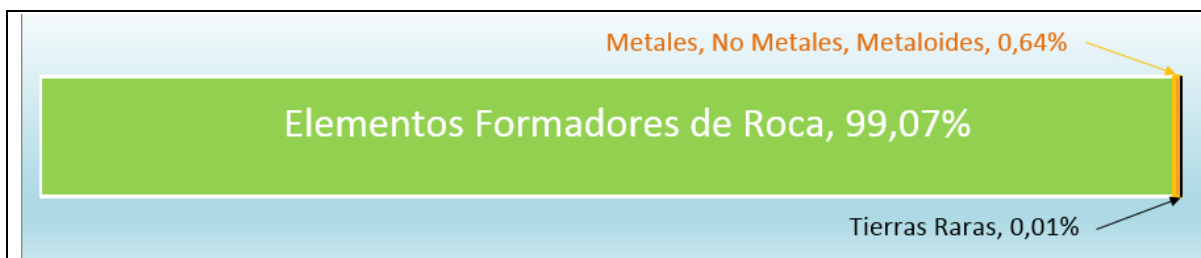
En los datos entregados, al promediar la suma de los elementos mayores formadores de los minerales que constituyen las rocas, estos dan cuenta del 99,07% de la masa total de las muestras de los relaves depositados. Los elementos mayores son inocuos en términos ambientales. Sólo el resto de los elementos analizados (0,93%) podrían generar una concentración objetable, desde el punto de vista de los ecosistemas y la salud humana.

Del 0,93% restante, se puede contabilizar 0,64% al promediar la suma de los metales, metaloides y no metales. Similarmente, al promediar la suma de las tierras raras, estas totalizan 0,01% de las muestras de relave depositado. Se llega, entonces, a que todos los elementos y compuestos medidos dan cuenta del 99,72% de la masa contenida en las muestras.

---

<sup>4</sup> Ver Ch. McLeod; *Investing in Today's Critical Metals*; Investing in Today's Critical Metals; en línea <http://investingnews.com>

<sup>5</sup> Ver When Will Rare Earth Prices Recover? En línea [http://investingnews.com/daily/resource-investing/critical-metals-investing/rare-earth-investing/jon-hykawy-rare-earth/?nameplate\\_category=Rare%20Earth%20Investing](http://investingnews.com/daily/resource-investing/critical-metals-investing/rare-earth-investing/jon-hykawy-rare-earth/?nameplate_category=Rare%20Earth%20Investing)



Esto indica, naturalmente, que el resto de los elementos del sistema periódico (que no se miden) tiene una participación másica en las muestras de los relaves del orden del 0,28% que, aunque menor, pudiese ser interesante medirlas en un futuro cercano.

Si bien los “contaminantes” en aguas corresponden a una larga lista, los principales elementos de connotación ambiental (CCA) relacionados con la actividad minera en Chile – a la fecha- han sido el cobre, el cromo, el níquel, el cinc, el plomo, el arsénico, el cadmio y el mercurio.

### **Distribución geográfica de los depósitos de relaves**

Los depósitos se instalaron en el país de acuerdo con los yacimientos que alimentaban la minería. Entonces, dada la desigual distribución de yacimientos, existe igualmente una desigual distribución de depósitos en el país. Los registros de datos contienen Región y Comuna de cada depósito. La distribución regional se observa en la siguiente tabla:

Distribución regional de los 696 depósitos de relaves en el Catastro Nacional de Depósitos de Relaves									
Región	I	II	III	IV	V	RM	VI	VII	XI
Cantidad	7	43	158	365	73	24	18	3	5

### **Tamaño de los depósitos de relaves**

Es también importante destacar la escala de los depósitos de relaves, que recorre desde los muy modestos depósitos de la Pequeña y Mediana Minería (el más pequeño en el catastro es de 300 toneladas y pertenece al Departamento de Minas de la Universidad de La Serena) hasta la Gran Minería (el más grande en Chile es el depósito Talabre, perteneciente a CODELCO, en la Comuna de Calama, Región de Antofagasta, que al momento de publicarse esta información, contiene 2100 millones de toneladas).

Naturalmente, los depósitos activos siguen aumentando su contenido de relaves, mientras que aquellos no activos o abandonados tienen una cantidad ya fija. En esta entrega, hay resultados de 89 depósitos activos; 93 depósitos abandonados, y 155 depósitos abandonados.

## Conclusiones

El trabajo desarrollado por el Departamento de Depósitos de Relaves, en su Programa de Caracterización de Depósitos de Relaves de Chile, ha tomado muestras de los 696 depósitos de relaves catastrados, por el mismo departamento, en el país. Producto de este trabajo, se entregan a la comunidad los valores de elementos y compuestos medidos durante el Programa, cubriendo 331 depósitos, mientras que las mediciones de los 365 faltantes se entregarán durante el año 2017, a la vez que se aumenta la profundidad de la toma de muestras de los depósitos de mayor impacto económico. Un simple análisis de estos datos muestra grandes posibilidades económicas de una veintena de depósitos, al menos.

Dela misma forma, una breve comparación entre muestras de cubeta y aguas debajo de cada depósito, en general muestra que la concentración de elementos contaminantes, disminuye ostensiblemente, de tal forma que se mantiene la importancia de la depositación segura, de acuerdo a las normas, reglamentos y leyes, ya que los relaves deben permanecer contenidos y aislados de los ecosistemas para proteger la salud de las personas y del medio ambiente. El Programa seguirá entregando herramientas valiosas para una mejor comprensión del problema y de la fenomenología asociada a los depósitos de relaves; este aporte busca una participación más informada de todos los actores implicados, que –en la práctica- son todos los ciudadanos, dada la importancia de la actividad minera para Chile. Este programa continuará en el tiempo, entregando la mejor información posible.

## Alcances

El Departamento de Depósitos de Relaves publica estos datos en forma preliminar, ya que corresponden a un programa en desarrollo al momento de esta publicación.

Los datos se han identificado como provisionales y están sujetos a revisión, siguiendo el espíritu de las normas del USGS, respecto de la entrega pública de datos, contenidas en la sección 500.24 del USGS Manual<sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup> Ver: <https://www2.usgs.gov/usgs-manual/500/500-24.html> [Visitado el 6 de diciembre de 2016].

## Agradecimientos

El Programa de Caracterización Geoquímica de Depósitos de Relaves cuenta con el apoyo del Sernageomin. El programa se basó sobre datos del [Catastro Nacional de Depósitos de Relaves](#) (ver también el [Atlas de Depósitos de Relaves](#)). La exhaustiva y ardua tarea de visitas a terreno para colección de muestras fue realizada por los profesionales de este Departamento: Mariano Gajardo; Roberto Fernández; Sebastian Urbano; Gullibert Novoa, Cristóbal Carrasco y Osvaldo Ramírez. En el análisis de datos trabajó Leandro Herrera, y todos los integrantes del equipo participaron en la revisión y discusión de resultados. Esta investigación no hubiera sido posible sin el entusiasta y excelente aporte de Eugenia Fonseca y Juan Bustamante, del Departamento de Laboratorio del servicio, donde se cuantificó cada uno de estos datos. Este trabajo es de alcance nacional, cubriendo todos los depósitos del país donde las Direcciones Regionales del Sernageomin juegan un rol crítico, mediante el aporte de infraestructura y apoyo de conductores que, de otro modo, hubiese sido inalcanzable..

*María Francisca Falcón Hernández*  
Jefa del Departamento de Depósitos de Relaves  
Subdirección Nacional de Minería  
Servicio Nacional de Geología y Minería

## **Estructura del Catastro Geoquímico de Depósitos de Relaves (Versión 1, 2016).**

### **Valores de los datos**

Los datos son de dos clases: aquellos que identifican la muestra y aquellos que contienen los valores de concentración de especies en las muestras. Aquellos que especifican concentraciones de las especies medidas son, en su gran mayoría, numéricos. Hay dos excepciones:

- Una celda en blanco refleja que esa concentración o dato no fue medida.
- Una celda con el carácter “<” (menor que) indica que el número a continuación es la resolución instrumental del método usado para medir dicha concentración (Nota: fracción decimal con “,”). Se sabe, así, que el valor de la especie es menor que la capacidad de detección del instrumento.

Los datos caracterizados por texto (por ejemplo, el nombre de un dueño) se han reducido a los caracteres ASCII (acrónimo inglés de American Standard Code for Information Interchange —Código Estándar Estadounidense para el Intercambio de Información); es decir, se han reemplazado las “Ñ” por “N” y se han eliminado todas las tildes de las vocales acentuadas. Esta es una presentación incómoda para hispanoparlantes, pero imprescindible para evitar confusiones en la utilización internacional de los datos, ya que hay otros idiomas que poseen una diversidad de símbolos menor que el español.

### **Estructura de los registros (líneas) de Datos Geoquímicos**

Cada registro corresponde a una muestra y genera una línea de datos.

El primer registro contiene un encabezado con los rótulos de cada dato (columna), especificados en la definición de datos, en la tabla de más abajo en este documento.

Desde el segundo registro (hasta el 871) comienzan los datos organizados de acuerdo con la estructura definida más abajo.

Los registros están ordenados según Región de Chile donde se encuentra el depósito, y subsecuentemente: “Estado de actividad” (activo o no); empresa minera; y finalmente, origen de la muestra (Cubeta, Muro o Sedimento). Las personas interesadas pueden ordenar como le parezca mejor para los propósitos del análisis que se realicen.

El primer campo del registro es un número de identificación, el IDQ (Identificador de Datos Geoquímicos), que correlaciona los registros y su única utilidad es la identificación con los sistemas de datos del Departamento de Relaves (si el usuario necesita detalles de un registro, por ejemplo, puede citar este número).

El segundo campo es el nombre de la Empresa que opera el depósito de relave del registro al momento de publicarse el estudio.

El tercer campo es el nombre que recibe el depósito.

El cuarto campo especifica tipo de minería (cobre, oro, etc.) del que proviene el relave (ver: Relaves de la minería según metal beneficiado).

El quinto campo registra el dato de la masa de relaves en la cubeta, en toneladas, a la fecha actual, o en su defecto, el dato más cercano a la fecha actual. En este campo solo tiene sentido especificar la masa en la **cubeta**, de modo que si el registro de datos es de muro o sedimentos, en lugar de un número, aparece el texto “NO APLICA”.

El sexto campo describe el Estado (ya citado en el tercer párrafo de este acápite), activo o no; el Estado puede ser uno de tres valores: “activo”, “no activo” o “abandonado”.

El séptimo campo registra el lugar donde se tomó la muestra. Su valor puede ser cubeta, muro, o sedimentos. En estos 870 registros de datos, hay 447 registros de muestras de cubetas; 234 registros de muestras de muros; y 189 registros de muestras de sedimentos aguas abajo del depósito.

Enseguida se especifica (8° campo) la región del país, (9° campo) la comuna, (10° campo) las coordenadas Norte y (11° campo) Este, del *datum* WGS84.

Luego, se encuentran -a partir de la columna 12- los valores de las especies geoquímicas para cada registro. Las especies se organizan como se describe en la Tabla a continuación.

#### **Estructura de los campos de los datos de Geoquímica de Relaves**

Cada registro contiene 68 campos (o datos), alojados en una estructura de columnas. Como resumen, los campos (columnas) contienen:

Reg	Nombre	Descripción
1	IDQ	Número identificador de cada registro.
2	Empresa Minera	Empresa registrada para el depósito.
3	Depósito	Nombre registrado del depósito.
4	Recurso	Tipo de minería que origina el depósito. Válido para cubeta y muro solamente (para SEDIMENTO aparece el texto “NO APLICA”)
5	Masa (toneladas)	Tonelaje (máximo) de relaves del depósito.
6	Estado	Activo, Inactivo o Abandonado.
7	Origen de la Muestra	La muestra puede provenir de Cubeta, Muro o Sedimento (aguas abajo del muro del depósito).
8	Región	De acuerdo con la clasificación regional del país.
9	Comuna	Identificación de la comuna donde está el depósito.
10	Coord. N	Coordenadas NORTE UTM <sup>7</sup> , en metros, <i>datum</i> WGS84.
11	Coord. E	Coordenadas ESTE UTM, en metros, <i>datum</i> WGS84.
12	Cu	Concentración de cobre en el sólido, en ppm <sup>8</sup> (idéntico a g/ton).
13	V	Concentración de vanadio en el sólido, en ppm (idéntico a g/ton).

<sup>7</sup> En inglés, Universal Transverse Mercator (UTM).

<sup>8</sup> Partes por millón (ppm).



14	Cr	Concentración de cromo en el sólido, en ppm (idéntico a g/ton).
15	Co	Concentración de cobalto en el sólido, en ppm (idéntico a g/ton).
16	Ni	Concentración de níquel en el sólido, en ppm (idéntico a g/ton).
17	Zn	Concentración de zinc en el sólido, en ppm (idéntico a g/ton).
18	Rb	Concentración de rubidio en el sólido, en ppm (idéntico a g/ton).
19	Sr	Concentración de estroncio en el sólido, en ppm (idéntico a g/ton).
20	Y	Concentración de itrio en el sólido, en ppm (idéntico a g/ton).
21	Zr	Concentración de circonio en el sólido, en ppm (idéntico a g/ton).
22	Nb	Concentración de niobio en el sólido, en ppm (idéntico a g/ton).
23	Ba	Concentración de bario en el sólido, en ppm (idéntico a g/ton).
24	Pb	Concentración de plomo en el sólido, en ppm (idéntico a g/ton).
25	Sc	Concentración de escandio en el sólido, en ppm (idéntico a g/ton).
26	Cs	Concentración de cesio en el sólido, en ppm (idéntico a g/ton).
27	Hf	Concentración de hafnio en el sólido, en ppm (idéntico a g/ton).
28	Ta	Concentración de tantalio en el sólido, en ppm (idéntico a g/ton).
29	Th	Concentración de torio en el sólido, en ppm (idéntico a g/ton).
30	U	Concentración de uranio en el sólido, en ppm (idéntico a g/ton).
31	As	Concentración de arsénico en el sólido, en ppm (idéntico a g/ton).
32	Mo	Concentración de molibdeno en el sólido, en ppm (idéntico a g/ton).
33	Sb	Concentración de antimonio en el sólido, en ppm (idéntico a g/ton).
34	Sn	Concentración de estaño en el sólido, en ppm (idéntico a g/ton).
35	Ag	Concentración de plata en el sólido, en ppm (idéntico a g/ton).
36	Cd	Concentración de cadmio en el sólido, en ppm (idéntico a g/ton).
37	Bi	Concentración de bismuto en el sólido, en ppm (idéntico a g/ton).
38	W	Concentración de wolframio en el sólido, en ppm (idéntico a g/ton).
39	S total (%)	Porcentaje de azufre en la muestra, elementos mayores
40	SiO <sub>2</sub> (%)	Porcentaje de silicio, como óxido en la muestra, elementos mayores.
41	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Porcentaje de aluminio, como óxido en la muestra.
42	TiO <sub>2</sub> (%)	Porcentaje de titanio, como óxido en la muestra, elementos mayores.
43	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Porcentaje de hierro, como óxido en la muestra, elementos mayores.
44	CaO (%)	Porcentaje de calcio, como óxido en la muestra, elementos mayores.
45	MgO (%)	Porcentaje de magnesio, como óxido en la muestra.
46	MnO (%)	Porcentaje de manganeso, como óxido en la muestra.
47	Na <sub>2</sub> O (%)	Porcentaje de sodio, como óxido en la muestra, elementos mayores.
48	K <sub>2</sub> O (%)	Porcentaje de potasio, como óxido en la muestra, elementos mayores.
49	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	Porcentaje de fósforo, como óxido en la muestra, elementos mayores.
50	PPC (%)	Porcentaje de Pérdida por calcinación (p.e. carbonatos).
51	SO <sub>3</sub> (%)	Porcentaje de sulfato, como óxido en la muestra, elementos mayores.
52	SUMA (%)	Suma de los elementos mayores, (minerales formadores de roca).
53	La	Concentración de lantano en el sólido, en ppm, tierras raras .
54	Ce	Concentración de cerio en el sólido, en ppm.

55	Pr	Concentración de praseodimio en el sólido, en ppm, tierras raras.
56	Nd	Concentración de neodimio en el sólido, en ppm, tierras raras.
57	Sm	Concentración de samario en el sólido, en ppm, tierras raras.
58	Eu	Concentración de europio en el sólido, en ppm, tierras raras.
59	Gd	Concentración de gadolinio en el sólido, en ppm, tierras raras.
60	Tb	Concentración de terbio en el sólido, en ppm, tierras raras.
61	Dy	Concentración de disprosio en el sólido, en ppm, tierras raras.
62	Ho	Concentración de holmio en el sólido, en ppm, tierras raras.
63	Er	Concentración de erbio en el sólido, en ppm, tierras raras.
64	Tm	Concentración de tulio en el sólido, en ppm, tierras raras.
65	Yb	Concentración de iterbio en el sólido, en ppm, tierras raras.
66	Lu	Concentración de lutecio en el sólido, en ppm, tierras raras.
67	Au	Concentración de oro en el sólido, en ppm.
68	Hg	Concentración de mercurio en el sólido, en ppm.

Santiago de Chile, 29 de Diciembre de 2016