

# RELAVES EN LA MINERÍA CHILENA:

## CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y SITUACIÓN LEGAL EN RELACIÓN A ELEMENTOS CONTAMINANTES

Seminario de Título entregado a la  
Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile  
en cumplimiento parcial de los requisitos  
para optar al título de

**QUÍMICO AMBIENTAL**

**Bernardita Araya Kleinsteuber**



Director Seminario de Título: Sr. Enrique Carretero González

Profesor Patrocinante: Dr. Hernán Ríos Peña y Lillo

**Junio 2001**

FACULTAD DE CIENCIAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

INFORME DE APROBACIÓN  
SEMINARIO DE TÍTULO

Se informa a la Escuela de Pregrado de la Facultad de Ciencias de la  
Universidad de Chile que el Seminario de Título presentado por la  
Alumna

Bernardita María Araya Kleinsteuber



Ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación del Seminario de Título  
como requisito para optar al Título de Químico Ambiental

Comisión: Dr. Víctor Manríquez  
Dr. Fernando Mendizábal  
Prof Patrocinante: Dr. Hernán Ríos P.

A mi madre ...



Quisiera agradecer a Billiton Chile B.V., especialmente al señor Enrique Carretero, por la cálida acogida que me brindaron y por el apoyo constante a mi trabajo. Agradezco también a las compañías mineras que participaron en este estudio, y por supuesto, a mi familia ... por creer en mí.



# ÍNDICE



Página

## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1. Antecedentes Generales	1
2. Objetivos	4
2.1. Generales	4
2.2. Específicos	4
3. Metodología de Trabajo	5
3.1. Compañías Mineras Participantes	6
4. Evolución Histórica de la Industria Minera en Chile	7
5. Reservas Minerales de Cobre en Chile	9
6. Producción de Cobre en Chile	11

## CAPÍTULO II. RELAVES

1. Antecedentes	15
2. Producción de Relaves	21
3. Puntos de Conflicto	23
3.1. Impactos potenciales	23
3.2. La generación de Ácidos	23
3.2.1 <i>Oxidación de Minerales Sulfurados</i>	23
3.2.2 <i>Componentes que Afectan la Generación de Ácido Sulfúrico</i>	26
3.2.3 <i>Factores Contribuyentes</i>	27
3.3. Determinación del Potencial de Generación de Acidez	30
3.4. Soluciones	32
3.4.1 <i>De la Generación de Ácido</i>	32
3.4.2 <i>Tratamiento de Soluciones Acuosas de Relaves</i>	33
3.4.3 <i>Del uso del Agua</i>	34



### **CAPÍTULO III      MARCO LEGAL CON RESPECTO AL MANEJO DE RESIDUOS PELIGROSOS**

1. Legislación Vigente	35
2. Legislación Propuesta	37

### **CAPÍTULO IV      DETERMINACIÓN DE LA MOVILIDAD DE LOS METALES: TEST DE LIXIVIACIÓN**

1. Antecedentes Generales	42
1.1. Definición	42
1.2. Proceso	44
1.3. Parámetros	45
1.4. Aplicación de test para determinar la movilidad de los iones metálicos	46
1.4.1 <i>Definición de Residuo Peligroso</i>	46
1.4.2 <i>Procedimiento Básico</i>	47
2. TCLP	48
3. SPLP	51

### **CAPÍTULO V      CARACTERIZACIÓN DE LOS RELAVES**

1. Muestra	53
2. Caracterización Química	54
3. Lixiviación	57
3.1. Test TCLP	57
3.2. Test SPLP	59
3.3. Test ABA	62

**CAPÍTULO VI      CONCLUSIONES**

66

**BIBLIOGRAFÍA**

**ANEXOS**



## ÍNDICE DE TABLAS



1. Reservas Geológicas de Cobre por Yacimiento	9
2. Producción de Cobre de Mina en Chile	13
3. Producción de Cobre en Chile por Tipo de Producto	14
4. Producción de Relaves en cada Compañía Minera	22
5. Bacterias de Minerales Sulfurados y sus Condiciones de Crecimiento	25
6. CMP para la Aplicación del Test de Toxicidad por Lixiviación	38
7. Resultados Caracterización Química de Muestras de Relaves	55
8. Resultados Aplicación Test TCLP y SPLP a Muestras de Relaves	61
9. Resultados Aplicación Test ABA a Muestras de Relaves	65



## ÍNDICE DE FIGURAS



1. Reservas Chilenas de Cobre, Aporte en % de cada Yacimiento	10
2. Cobre: Avances Tecnológicos.	12
3. Diagrama de Flujo Extracción y Procesamiento de Minerales de Cobre Oxidado	16
4. Diagrama de Flujo Extracción y Procesamiento de Minerales de Cobre Sulfurado	17
5. Celda de Flotación	19
6. Fotografía Disposición de Relaves	20
7. Procedimiento TCLP	58
8. Procedimiento SPLP	60
9. Procedimiento ABA	64



## ÍNDICE DE ANEXOS

1. **Decreto Supremo N° 745/1992 Aprueba Reglamento Sobre Condiciones Sanitarias y Ambientales Básicas en los Lugares de Trabajo.**  
Ministerio de Salud, Actualizado al 09/09/1995. Instituto Nacional de Normalización
2. **Decreto Supremo N° 594, Ministerio de Salud. 29 abril 2000.**  
**Aprueba Reglamento Sobre Condiciones Sanitarias y Ambientales Básicas en los Lugares de Trabajo**
3. **Proyecto Reglamento Sobre Manejo Sanitario De Residuos Peligrosos,**  
República de Chile, Ministerio de Salud, División de Salud Ambiental,  
Departamento de Programas Sobre el Ambiente. Noviembre 1999.
4. **Decreto 90: Establece Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales, 30 Mayo 2000.**  
República de Chile, Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República.
5. **Método 1311, United States Environmental Protection Agency**
6. **Método 1312, United States Environmental Protection Agency**
7. **Procedimiento ABA**

## RESUMEN

La posición de Chile como importante país minero y sobre todo como primer productor mundial de cobre, hace indispensable analizar la interacción que la industria minera tiene con el medio ambiente, en donde la atención se centra en los relaves como el principal producto de desecho de la gran minería del cobre, y en su relación con la legislación ambiental que los regula.

El presente estudio contempló un análisis cualitativo y cuantitativo respecto de la generación y disposición de los relaves en la mediana y gran minería de nuestro país, encontrándose que el volumen de generación de éstos corresponde aproximadamente a 100 veces la producción de concentrados de cobre, considerando una ley de 1% de cobre. Durante el año 1999 se produjeron 3,029 millones de toneladas de concentrado, en cuya producción se generaron 300 millones de toneladas de relaves, y se estima que esta cifra alcanzará los 320 millones de toneladas producidas durante el 2000.

Por otra parte, se incluye un estudio del peligro potencial de los relaves, en cuanto a la generación de ácido y a la posibilidad de que éste disuelva elementos metálicos contaminantes lo que ocurre debido a la oxidación de minerales sulfurados, principalmente pirita,  $Fe_2S$ . Este proceso depende de variados factores, principalmente del acceso de agua y oxígeno a los relaves, además de factores físicos como tipo de material, porosidad, área superficial, etc, y se proponen posibles soluciones, como almacenamiento del relave evitando la entrada de agua, evitando así la generación de ácido.

En este contexto, se incluyó la realización del test ABA: Acid/Base Account, que permite determinar el potencial de generación de ácido de un residuo basándose en una comparación entre la cantidad de sulfuro disponible para producir ácido sulfúrico a partir de la oxidación de los minerales sulfurados versus la cantidad de

ácido que puede ser consumido por una muestra sólida, lo que se atribuye a la presencia de carbonatos y otros minerales que pueden consumir iones hidrógeno. Se encontró que Andina, El Teniente, Chuquicamata, Collahuasi y El Salvador tienen un alto potencial generador de ácido, Los Pelambres un potencial marginal, y El Soldado no presenta potencial de generación de ácido.

Se incluye además un estudio del estado de la legislación ambiental en Chile, con relación en la actual generación de relaves y su efecto en la minería, donde se encontró que la legislación vigente (Decreto Supremo 594) no es precisa en la regulación del manejo de residuos peligrosos y no presenta métodos para determinar cuándo un residuo debe ser considerado como tal. En este contexto se hace un análisis del Proyecto: "Reglamento de Manejo Sanitario de Residuos Peligrosos", el cual se encuentra en etapa de perfeccionamiento y aprobación. En este reglamento se observó un adecuado tratamiento del tema, que supera ampliamente las deficiencias presentadas por la legislación vigente e incluye, además, los métodos analíticos para definir su peligrosidad y su relación con el medio ambiente. El reglamento aludido contempla una calificación de la peligrosidad de los relaves en cuanto a la potencial movilidad de algunos elementos químicos conflictivos como cobre, arsénico, hierro, manganeso, etc.

En cuanto a los métodos de determinación de la movilidad de los metales, se incluye un análisis general del proceso de lixiviación y de los test para la determinación de la toxicidad por lixiviación, TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) y SPLP (Synthetic Precipitation Leaching Procedure). Además, se establecen las características de éstos y se revisan las deficiencias que presenta el TCLP en su aplicación a residuos mineros debido a que considera la co-disposición con residuos municipales. En este contexto, el SPLP representaría mejor las condiciones de lixiviación en los relaves.

Finalmente, se incluye un análisis químico de todos aquellos elementos que potencialmente puedan alterar el medio ambiente a través de emisiones acuosas.

Esto mediante los métodos analíticos especificados en el proyecto de reglamento, específicamente el test de lixiviación ácida SPLP, EPA 1312, comparándose estos resultados con aquellos obtenidos por métodos más estrictos, usados comúnmente, como el TCLP, EPA 1311. Estos análisis revelaron que todas las muestras analizadas se encuentran bajo los límites permitidos por la legislación, por lo tanto, los relaves no estarían clasificados como tóxicos según la característica de lixiviación. Sin embargo, es importante destacar que en los análisis se incluyeron metales no regulados, como Fe, Mn y Mg, los cuales presentan una lixiviación considerable y estarían infringiendo la ley de emisión de contaminantes asociados a descargas de residuos líquidos. Si se comparan ambos test, en general, los valores obtenidos mediante SPLP son mayores a los obtenidos por TCLP, lo que demuestra que este último tiende a subestimar los valores de lixiviación de metales.

Un valor agregado de este estudio fue el poder compartir los resultados obtenidos con cada una de las empresas participantes, lo que permitió analizar de manera conjunta los alcances de estos tests y proponer las mejoras y clarificaciones pertinentes, ya que al tratarse por primera vez y ser desarrollados en forma integrada, existía desconocimiento e incertidumbre al respecto.

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

### **1. ANTECEDENTES GENERALES**

Chile posee abundantes reservas de recursos minerales, principalmente Cobre, además de Molibdeno, Hierro, Plata y Oro como también Nitratos, Litio, Boro, Yodo y otros; lo que ha significado que la minería haya sido desde los inicios de Chile como país organizado la principal actividad productiva del país, convirtiéndose en el principal rubro de exportación donde sólo el cobre representa actualmente un 37% del total. Esto se debe a que las principales reservas de cobre del mundo se encuentran en nuestro país, las cuales sobrepasan los 300 millones de toneladas de cobre fino, equivalente al 40% de las reservas mundiales. Congruente con lo anterior, Chile es el mayor productor mundial de cobre.

La minería de cobre se puede dividir en 2 grandes grupos. Aquellos recursos minerales en donde el cobre se encuentra como especies minerales sulfuradas, que son procesados mediante molienda y flotación, produciendo un concentrado de cobre, y aquellos en donde el cobre se encuentra como minerales asociados a oxígeno, que se denominan minerales oxidados, y cuyo proceso de extracción está basado en la lixiviación ácida.

Los concentrados de cobre son fundidos en convertidores donde se obtiene un cobre impuro, el que es convertido en ánodos, y estos últimos son refinados electrolíticamente para producir cátodos de cobre de alta calidad.

Los minerales oxidados son disueltos en ácido sulfúrico diluido, y la solución resultante es purificada mediante un proceso de extracción por solventes, que produce un electrólito de alta ley de cobre en solución. El cobre del electrólito así obtenido es electro-depositado como cátodo de alta pureza.

Las leyes de cobre de los recursos minerales sulfurados en Chile son cercanas al 1%. Al realizar el proceso de flotación y extraer el cobre, el 99% restante es residuo. O sea, por cada tonelada de cobre producida se generan aproximadamente 100 toneladas de residuos o relaves los que se retornan al medio ambiente como una pulpa de minerales finamente molidos en solución acuosa.

En el caso de los recursos minerales oxidados, las leyes de cobre son menores de 1%, pero los residuos, denominados ripios, se devuelven al medio ambiente con una granulometría más gruesa, por ejemplo media pulgada, lo que los hace menos reactivos al medio. En este caso, los residuos o ripios son equivalentes a 100 o más toneladas por tonelada de cobre producido.

A pesar del gran incremento de los procesos hidrometalúrgicos, en Chile la mayor producción de cobre es originada por flotación de minerales, ya que la gran parte de las reservas chilenas de cobre corresponden a recursos de minerales sulfurados. Por esto los residuos que producen, relaves, son cuantitativamente muy superiores, los que constituyen un factor crítico de la industria minera. De lo anterior se infiere que es altamente necesario realizar una descripción y cuantificación de estos residuos, así como también, analizar el marco legal que regula su evacuación, disposición y control.

En Chile, la legislación ambiental ha tenido un desarrollo tardío. Se pretende que en el corto plazo se iguale a la de países altamente desarrollados, como Canadá, Estados Unidos, Europa, Japón y otros. Actualmente, se encuentra en trámite una actualización de la legislación correspondiente al manejo de residuos peligrosos. Esta legislación regulará la disposición de los relaves y residuos industriales sólidos en general, y sin lugar a dudas puede causar un enorme impacto en la actividad minera.

En este estudio se pretende anticipar resultados previos a la promulgación de la ley mencionada (Proyecto: Reglamento Sobre Manejo Sanitario De Residuos Peligrosos), de manera de lograr no sólo una evaluación del impacto sino que además, un conocimiento de los métodos analíticos utilizados (EPA 1311 y 1312), sus resultados,

y posibles modificaciones requeridas en los procesos para estar en concordancia con la legislación. Además compartir los resultados obtenidos con la industria minera, de manera que ésta se familiarice con las nuevas regulaciones.

En la legislación propuesta se definen los métodos analíticos para calificar los relaves en cuanto a su grado de peligrosidad. Los resultados obtenidos se comparan con los máximos permitidos y cuando se sobrepasan los valores máximos, la calificación de los relaves es de peligrosa y, por lo tanto, se requiere una disposición diferente.

Concordante con lo anterior, la importancia de ello radica en que la mayoría de las empresas mineras no ha evaluado sus residuos con estos análisis, ni tampoco los laboratorios analíticos locales se han familiarizado con ellos. Por lo tanto, este estudio pretende contribuir a la implementación de los test y a la gestión que harán las empresas frente a esta nueva legislación. Por el gran volumen de los relaves, cualquier cambio que se requiera en su manejo conlleva un impacto económico significativo, el que es posible que la industria minera aún no haya evaluado en su real magnitud.



## **2. OBJETIVOS**

### **2.1- Generales:**

Analizar la situación actual e histórica de generación de relaves de flotación en la mediana y gran minería del cobre, tanto en lo cuantitativo como en lo cualitativo, en relación a la legislación ambiental vigente y propuesta referida a su potencial emisión de elementos contaminantes.

### **2.2- Específicos:**

- Evaluar la generación de relaves en empresas mineras de la mediana y gran minería del cobre de Chile.
- Realizar un estudio de la legislación nacional que regula la disposición de relaves, principalmente en cuanto su calificación y tratamiento como residuo peligroso, y en lo que respecta a los métodos analíticos para determinar dicha condición; bajo este mismo parámetro analizar la legislación propuesta.
- Analizar la composición química de los relaves generados por las empresas participantes.
- Analizar los métodos analíticos de determinación de toxicidad por lixiviación propuestos por la legislación y sus resultados; con especial atención en elementos químicos contaminantes: Arsénico, Cobre, Hierro, Molibdeno y otros.

### 3. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para el desarrollo de este análisis sobre la situación actual de los relaves en nuestro país, se seguirá la siguiente metodología:

- Recolección de información legal:

El análisis del marco legal se hará basándose en el estudio de leyes y reglamentos vigentes y pronto a su aprobación, en cuanto a la producción, tratamiento, composición, y manejo de los relaves. Esta información será obtenida directamente en el Ministerio de Salud y en el INN.

- Recolección de Información Industrial:

Para conocer cabalmente la situación actual de la generación y disposición de relaves, es necesario contar con la asistencia de las compañías mineras. Para ello se recurrió directamente a las compañías mineras explicando los objetivos del estudio y se solicitó lo siguiente:

- Producción actual e histórica de relaves.
- Composiciones químicas disponibles.
- Muestra actual, para realización de análisis.

- Análisis de la composición química de los relaves generados por las compañías mineras y/o ejecución del análisis.

Para esto, se dispuso de las muestras entregadas directamente por las compañías mineras, tomadas por el muestreador de la planta. Por lo tanto, se seguirá el protocolo de todas las muestras tomadas en la planta.

La caracterización química se hizo mediante un análisis ICP para 34 elementos, y fué realizado por el Centro de Investigación Minero y Metalúrgico, en su área de Tecnología y Servicios, CIMM T&S S.A.

- Ejecución de los test analíticos propuestos por la legislación, y análisis de los resultados.

A cada muestra se le realizó el test TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) y el SPLP (Synthetic Precipitation Leaching Procedure), métodos 1311 y 1312 de la EPA, respectivamente, que son los métodos que se utilizan actualmente para determinar la toxicidad por lixiviación, y son los que especifica la legislación. Además se determinó el potencial de generación de ácido sulfúrico mediante el test ABA (Acid Base Account). Todos estos análisis fueron realizados por CIMM T&S S.A.

- Comparación de los valores obtenidos con la legislación vigente y propuesta, y análisis general de los resultados, de manera de determinar la peligrosidad de las muestras.

### **3.1 Compañías Mineras Participantes :**

- División Andina, Codelco-Chile
- División El Teniente, Codelco-Chile
- División Chuquicamata, Codelco-Chile
- División El Salvador, Codelco-Chile
- Compañía Minera Los Pelambres
- Compañía Minera Doña Ines de Collahuasi
- Compañía Minera Disputada de Las Condes, Planta El Soldado

#### 4. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA INDUSTRIA MINERA EN CHILE

La minería ha estado ligada al desarrollo económico de Chile desde la época de la Colonización. Es así como descubridores y colonizadores vinieron a Chile a buscar oro, y fue la producción de lavaderos la que sustentó casi todo el período colonial, dominando la minería en Chile hasta fines del siglo XVIII. A partir de 1760 comenzaron a explotarse ricas minas de plata, las que fueron desplazadas por la explotación del salitre, que jugó un rol determinante en la minería chilena, por cuanto generó riqueza y desarrollo industrial, comenzando en los años 1770 para convertirse en la principal actividad minera hasta la gran crisis mundial de 1930, cuando la demanda del salitre bajó a la décima parte, producto de la sustitución del salitre por nitrato sintético durante la Primera Guerra Mundial. Con esto terminó por reducirse la industria salitrera, quedando decenas de instalaciones y campamentos abandonados.

La minería de cobre adquiere importancia a partir de la década de 1840, cuando el metalurgista alemán Carlos Lambert incorporó la tecnología de reverbero para procesar los minerales sulfurados, ya que anteriormente se explotaban principalmente minerales oxidados. Con esto la producción chilena de cobre adquirió importancia mundial, y pese a todos los remezones económicos de esa época, la demanda del cobre creció rápidamente por los descubrimientos en el campo eléctrico, donde el cobre jugó una importancia primordial, tanto en la generación y distribución de la energía eléctrica así como en las comunicaciones (teléfono y telégrafo)

A partir de 1910 se inicia lo que podría llamarse "Gran Minería", a consecuencia de las importantes inversiones que empresas norteamericanas empezaron a efectuar en Chile, que permitían aplicar técnicas de minería masiva y explotar minerales de menor ley. Es así como en 1905 se inicia la explotación de Chuquibambilla (Anaconda Cooper Company). En 1906 comenzó El Teniente (Braden Cooper Company), y Potrerillos, hoy Salvador, se inició en 1927 llegándose ese año a una producción total de 243.000 toneladas de cobre fino.

Desde 1930 en adelante, estas tres grandes empresas representaron más del 80% de la producción nacional, consolidándose esta actividad como un sector clave en la economía del país hasta hoy y, sin duda, para el futuro próximo.

Actualmente, la minería en Chile constituye la mitad del comercio exterior del país, y la mayor cantidad de los ingresos de divisas. Dentro de un total de exportaciones por US\$ 15 mil millones en 1998, los productos mineros aportaron US\$ 7 mil millones (48%). En este campo, la minería del Cobre representa más del 80% de la actividad minera y, a su vez, el 38% de las exportaciones totales del país corresponde solamente a Cobre, sumando un total cercano a los 6.000 millones de dólares.

## 5. RESERVAS MINERALES DE COBRE

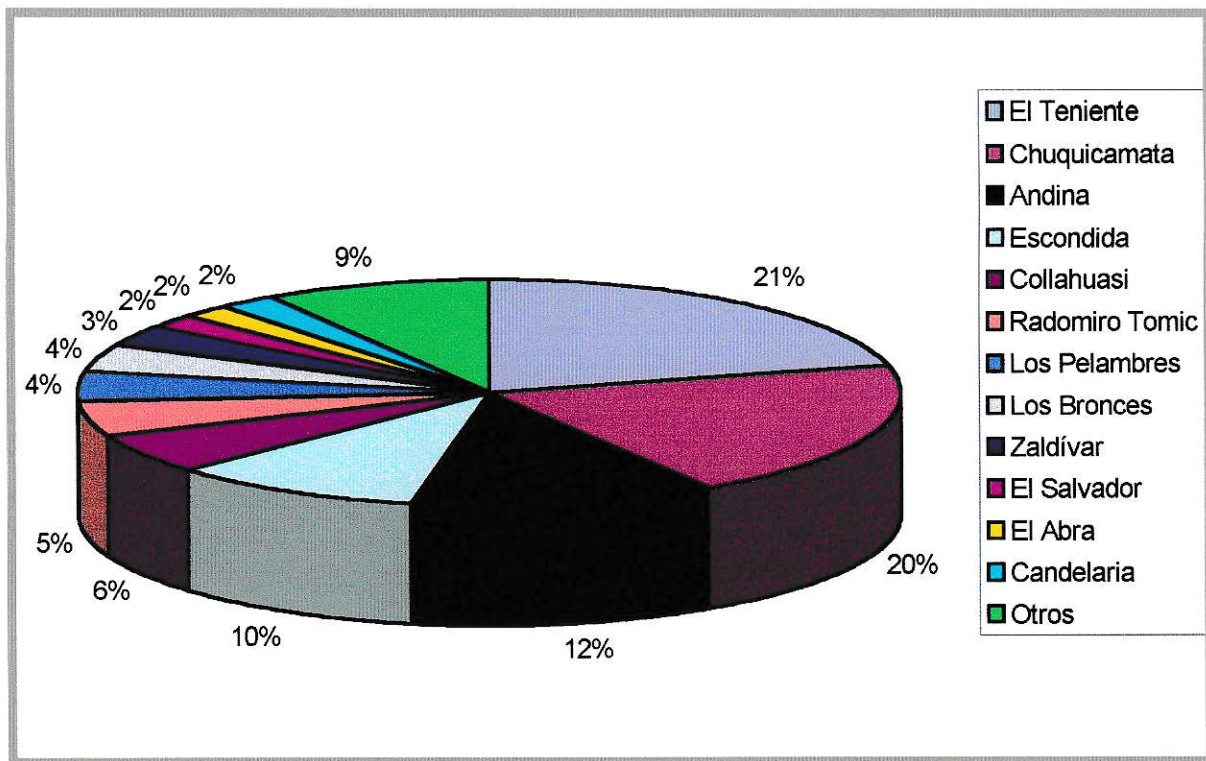
En cuanto a las reservas, Chile tiene las mayores reservas de Cobre del mundo, las cuales pueden alcanzar incluso los 300 millones de toneladas de fino, esto sumando sólo los depósitos conocidos, lo cual sería suficiente para 75 años de explotación al ritmo actual. En la tabla 1 y en la figura 1 se presenta la estadística de las reservas geológicas de cobre en Chile, por yacimiento, Congruente con sus reservas, Chile es también el mayor productor mundial de Cobre, produciendo 4,391MMt (millones de toneladas métricas) durante el año 1999, que representan aproximadamente un 28% del consumo mundial de cobre.

**TABLA 1: Reservas geológicas de Cobre por yacimiento**

<b>Yacimiento</b>	<b>%</b>	<b>MILLONES DE TONS MMt</b>
EL TENIENTE	21 %	56,7
CHUQUICAMATA	20 %	54,0
ANDINA	12 %	32,4
ESCONDIDA	10 %	27,0
COLLAHUASI	6 %	16,2
RADOMIRO TOMIC	5 %	13,5
LOS BRONCES	4 %	10,8
LOS PELAMBRES	4 %	10,8
ZALDÍVAR	3 %	8,1
EL ABRA	2 %	5,4
EL SALVADOR	2 %	5,4
CANDELARIA	2 %	5,4
OTROS	9 %	24,3
<b>TOTAL</b>	<b>100 %</b>	<b>270</b>

*Fuente: Compendio de La Minería Chilena 2000*

Figura 1: Reservas Chilenas de Cobre, aporte en % de cada yacimiento



## 6. PRODUCCIÓN DE COBRE EN CHILE

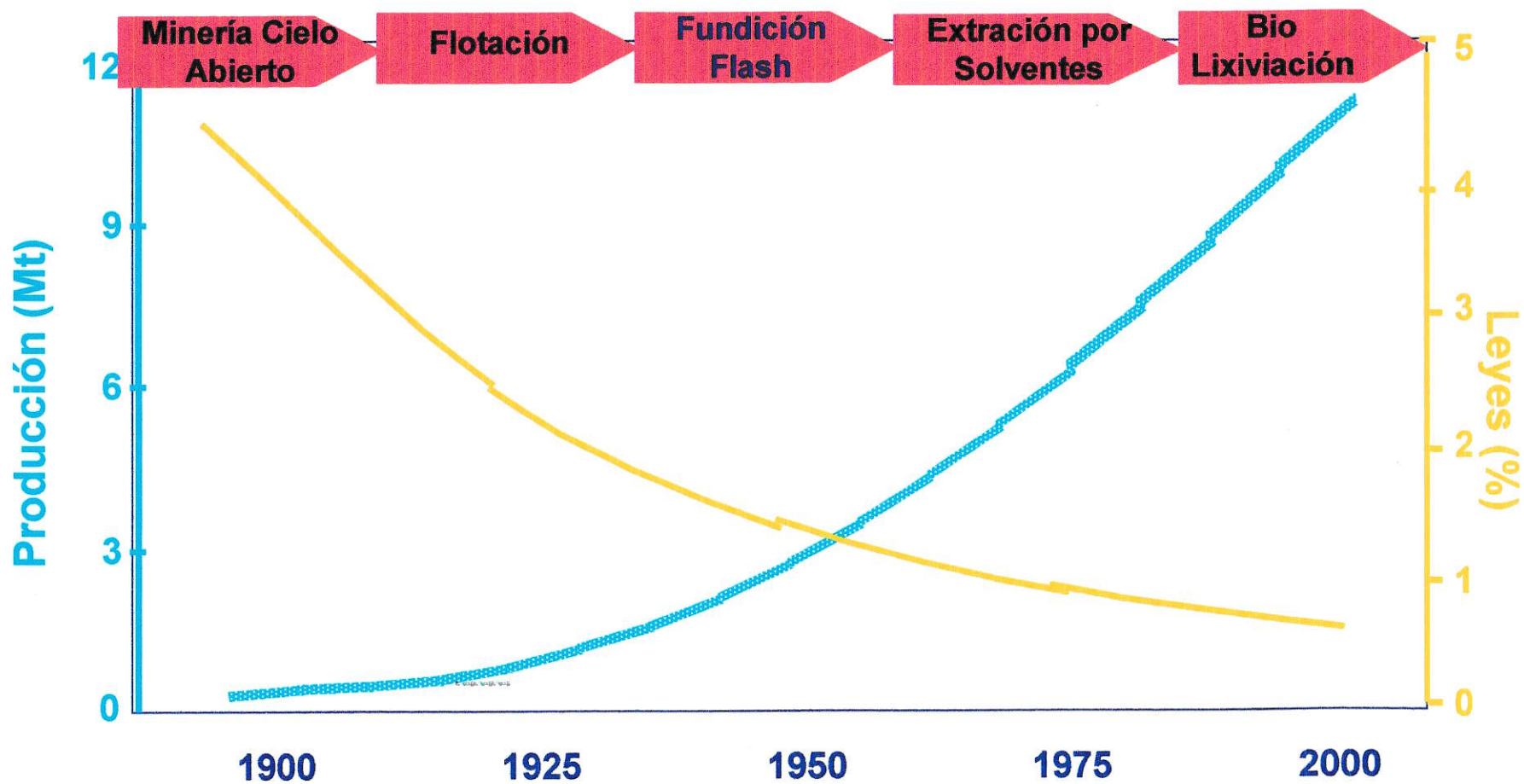
La mayor empresa productora del país y del mundo es Codelco, que produce 1,512 MMt (1999) desde cinco complejos mineros: Chuquicamata, El Teniente, Andina, Salvador, y Radomiro Tomic, participando además con Phelps Dodge en la mina El Abra (49%). Pese a la significación de Codelco, el mayor crecimiento de la producción de cobre en Chile proviene de la inversión extranjera en minería a partir de los años noventa, cuando se establecen nuevas empresas mineras, tales como: Escondida, que es hoy la mina de mayor producción de cobre del mundo, además de Candelaria, Quebrada Blanca, Cerro Colorado, Zaldívar, y más recientemente, El Abra, Collahuasi, Los Pelambres, Lomas Bajas y Leonor. Las tasas de producción de cobre de estas empresas pueden observarse en la tabla 2. Escondida es el segundo productor chileno de cobre, después de Codelco, pero a diferencia de la empresa estatal que tiene varias minas, toda la producción proviene en este caso de un mismo yacimiento, lo que la ha convertido en la mayor mina productora de cobre del mundo.

Junto a las nuevas inversiones privadas, el crecimiento de la minería del cobre en Chile está fundado en la revolución tecnológica que ha significado la utilización del proceso de Lixiviación-Extracción por Solventes-Electroobtención (Lix-SX-EW), como se observa en la Figura 2. Este proceso utiliza ácido sulfúrico y solventes químicos para separar el cobre, y permite obtener cátodos refinados de cobre casi puro (99.99% Cu), en lugar de los cátodos provenientes de los concentrados, que son el producto típico de la mayoría de las instalaciones mineras (99.94% Cu). Además de ser un proceso más económico que la flotación tradicional, la producción de cátodos de electroobtención es menos dañina para el medio ambiente, ya que no requiere fundición. La Lix-SX-EW permite explotar aquellos minerales de baja ley, debidamente dispuestos en pilas. Además soluciona el problema de la utilización del ácido sulfúrico que se genera en las plantas de tratamiento de gases, que son los mecanismos de control de la contaminación en las fundiciones de concentrados de cobre.



**Figura 2: Cobre : Avances Tecnológicos**

Evolución de la producción de cobre en función de los avances tecnológicos, considerando la disminución en las leyes



Fuente: BILLITON Chile

**Tabla 2 :Producción de cobre de Mina en Chile**

(Miles de Toneladas Métricas de Cobre Fino,Mt)

	<b>1996</b>	<b>1997</b>	<b>1998</b>	<b>1999</b>
<b>Codelco Chile</b>	<b>1.221</b>	<b>1.231</b>	<b>1.403</b>	<b>1.512</b>
Div. Chuquicamata	636	650	650	630
Div. El Teniente	345	343	339	346
Div. Andina	154	145	164	249
Div. Radomiro Tomic		4	162	190
Div. Salvador	90	88	88	92
<b>Sector Privado</b>	<b>1.895</b>	<b>2.213</b>	<b>2.374</b>	<b>2,868</b>
Escondida	841	933	868	959
Zaldívar	78	96	131	150
Cerro Colorado	60	60	75	100
Quebrada Blanca	68	67	71	73
Collahuasi	0	0	48	435
Los Pelambres	22	22	7	12
El Soldado	68	68	64	65
Otros	758	967	1110	1794

*Fuente: Compendio de la Minería Chilena*

A pesar del gran incremento de los procesos hidrometalúrgicos, la concentración por flotación mantiene su predominio y, probablemente lo será por mucho años más. La razón principal es que la mayor parte de las reservas chilenas de cobre corresponden a minerales sulfurados. Los minerales que se lixivian corresponden a las capas superiores de los yacimientos, básicamente óxidos, a minerales mixtos y sulfuros secundarios, que son procesados mediante biolixiviación, y también a los rípios de óxidos anteriormente procesados y depositados. Todo lo anterior suma reservas inferiores a las de los minerales sulfurados propiamente tales.

Como se observa en la Tabla 3, la producción actual de cobre fino contenido en concentrados es de aproximadamente 3 MMt anuales, sobre una producción de 4,39 MMt de cobre fino en Chile, y se estima que en el año 2000 la producción de concentrados llegó a los 3,2 MMt de cobre fino en concentrados; este incremento proviene principalmente de la minería privada, tanto de nuevas minas como de ampliaciones de las que actualmente se explotan.

**Tabla 3 : Producción de Cobre en Chile por Tipo de Producto**

	Miles de Toneladas métricas Cobre Fino <sup>1</sup>
	Mt
Cu concentrados	<b>1555,2</b>
Cu cátodos electrorefinado	<b>1304,3</b>
Cu blister	<b>169,6</b>
Total cobre proveniente de Flotación	<b>3029,1</b>
Cu cátodos electroobtención	<b>1362,1</b>
<b>Total</b>	<b>4391,2</b>

<sup>1</sup> 1999

Fuente: Compendio de la Minería Chilena

## CAPÍTULO II

### RELAVES

#### 1. ANTECEDENTES

El cobre es extraído de dos tipos de recursos minerales: óxidos y sulfuros. En los minerales oxidados de cobre típico, el cobre está en la forma de Crisocola ( $\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), Brochantita ( $\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$ ), Cuprita ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), Atacamita ( $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ ) entre otros, y el cobre es procesado por lixiviación. En la Figura 3 se observa un diagrama de flujo de la extracción de minerales de cobre oxidado

En los minerales sulfurados, el cobre se encuentra como Calcocita ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), Covelita ( $\text{CuS}$ ), Calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), Bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ), entre otros, y se procesan por flotación. En la figura 4 se observa un diagrama de flujo de este tipo de procesamiento.

La flotación es un proceso metalúrgico basado en un arrastre selectivo de los sulfuros, que han sido previamente acondicionados con reactivos de flotación, desde una suspensión de sólidos finamente molidos en agua.

Previo al proceso de separación de los sulfuros de los materiales inertes (flotación), el mineral debe ser reducido de tamaño hasta donde queden liberadas las partículas con contenidos metálicos de valor económico. Por ejemplo, moler todo hasta menos de 100 mallas. Este proceso se realiza en varias etapas: el mineral debe pasar por un proceso de molienda gruesa en seco, chancado, en donde queda en un tamaño aproximado de hasta unas 6 pulgadas, luego es molido en un molino SAG (molienda semi autógena húmeda) para finalmente pasar a una molienda fina húmeda en molinos de bolas donde se llega a la liberación de los sulfuros metálicos.

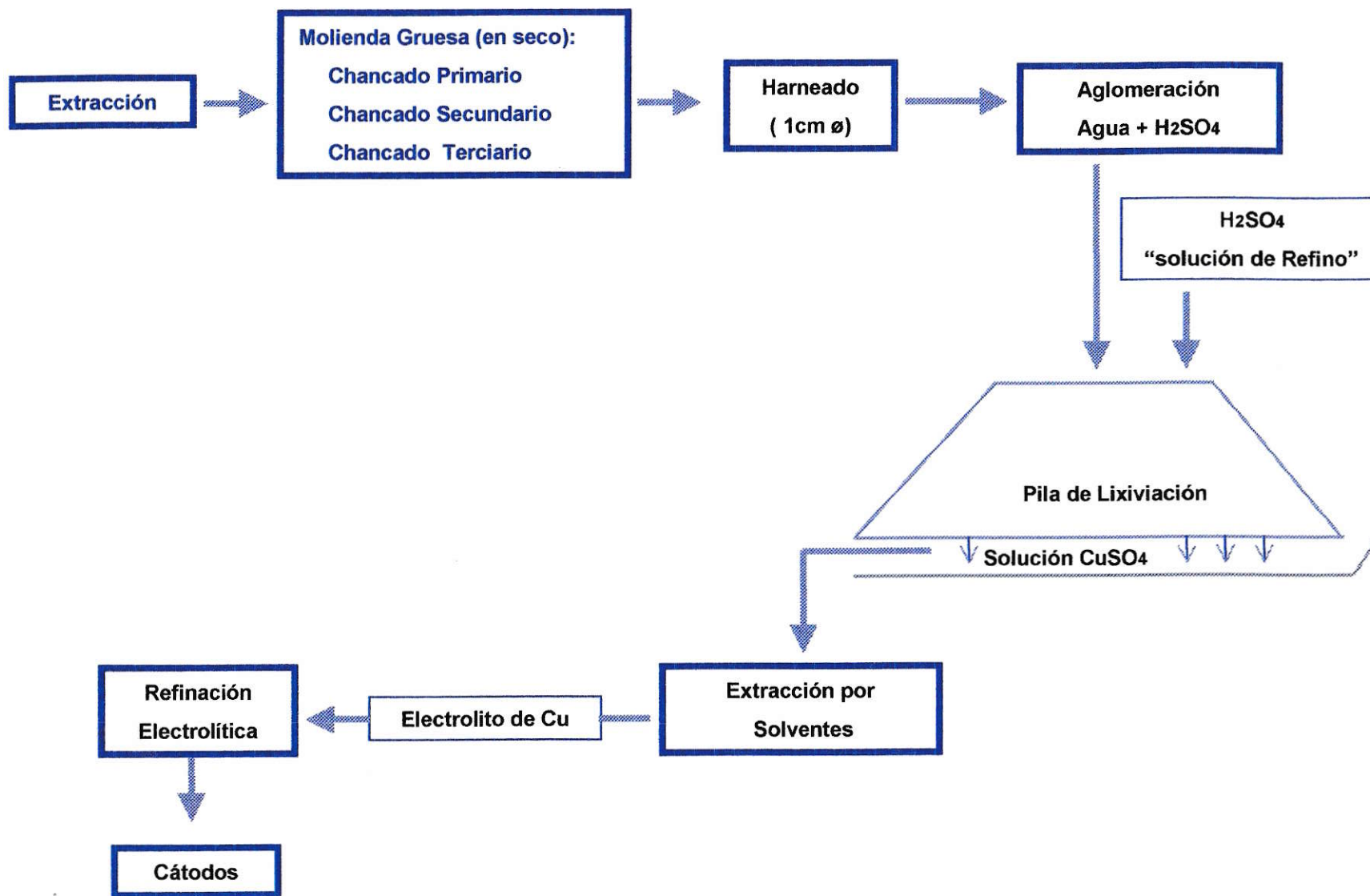


Figura 3: Diagrama de Flujo Extracción y Procesamiento de Minerales de Cobre Oxidados

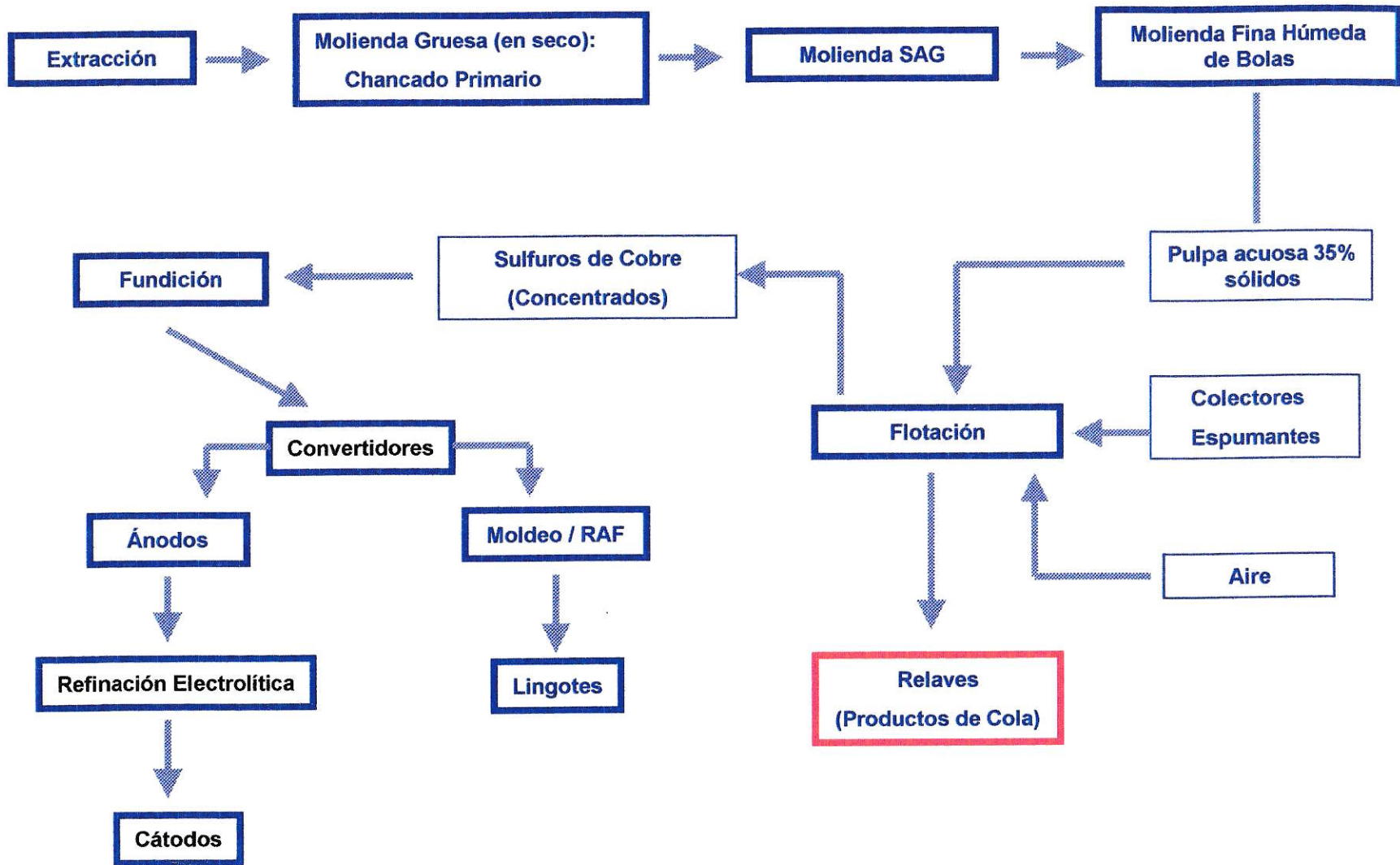


Figura 4: Diagrama de Flujo Extracción y Procesamiento de Minerales de Cobre Sufurados

En el proceso anterior los minerales están como pulpa acuosa, por ejemplo con 35 % de sólidos, a la que se le adicionan reactivos químicos colectores y espumantes. Los colectores pueden ser xantatos, tionocarbamatos o ditiofosfatos, entre otros. Estos productos químicos convierten la superficie de los sulfuros metálicos en hidrofóbicas, de manera tal que puedan ser arrastradas por aire desde la suspensión acuosa.

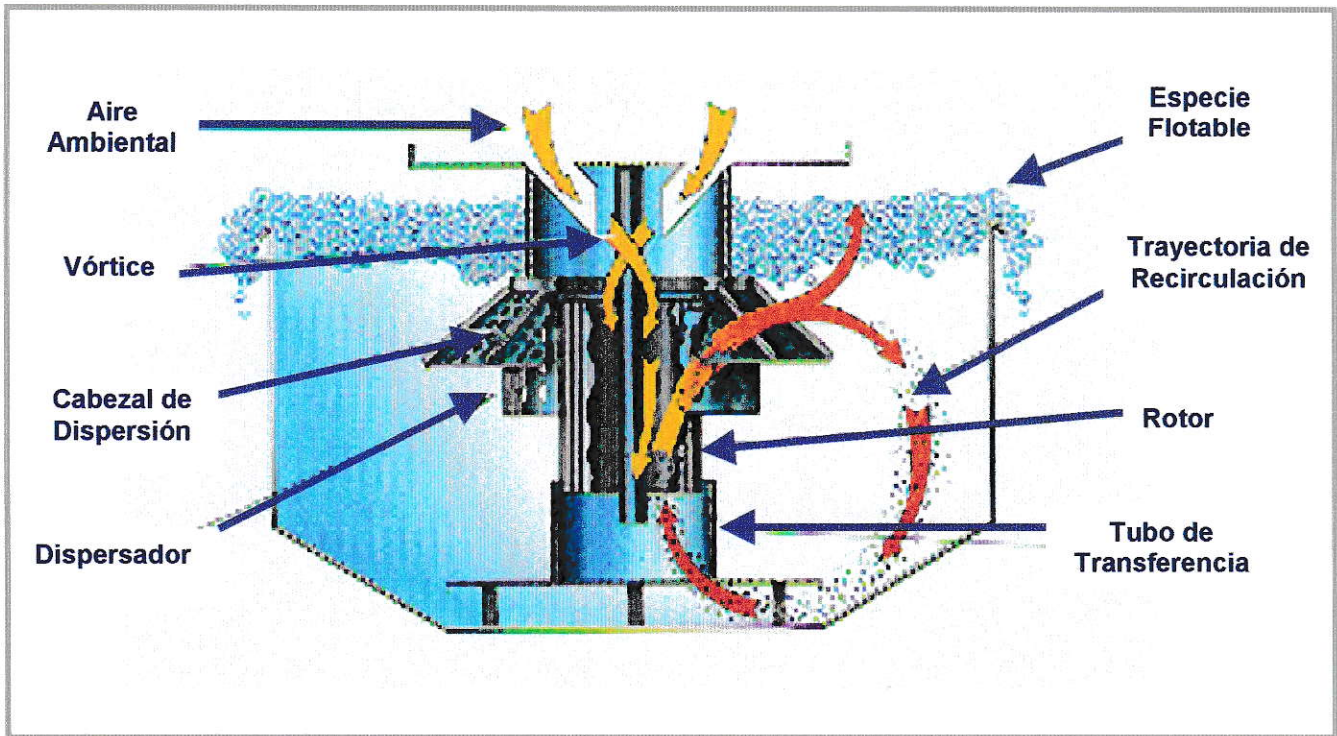
Para mejorar la separación se le agregan reactivos espumantes como éteres metílicos del polipropilenglicol, metil isobutil carbinol o aceite de pino entre otros. Estos espumantes producen una espuma semi estable que mantiene a las partículas de los sulfuros a flote gracias al aire y a los reactivos de flotación, luego los sulfuros pueden ser separados por simple rebalse de la espuma de las celdas donde se hace el arrastre con aire. Estas celdas se denominan celdas de flotación. Ver figura 5

De estas celdas se obtiene además un residuo acuoso en forma de pulpa o *relave*, que es básicamente material inerte como cuarzo, feldespatos, arcillas y otros que no tiene valor comercial ni otro uso.

Las características físicas y químicas de los relaves varían de acuerdo a las características geológicas del mineral que ha sido extraído y a las condiciones de operación y extracción utilizadas. El contenido de agua típico de los relaves es 50 a 70%, en peso de sólidos. Estos contienen partículas de arcilla, limo y arena, y restos de minerales de cobre no recuperados, como también pirita ( $\text{FeS}_2$ ), que es una impureza no deseable en el concentrado de cobre.

El principal valor económico de los relaves radica en el agua que contienen, entonces previo a su disposición se le extrae la mayor cantidad de agua posible en espesadores y en algunos casos puntuales se filtran (Mantos Blancos). Luego va a tranques de relaves, donde se almacenan en forma indefinida, tratando de recuperar parte del agua sobrenadante.

**Figura 5: Celda de Flotación**





En la Figura 6 se presenta una vista general de la disposición común de los relaves:

**FIGURA 6: Vista disposición de Relaves.**



## 2. PRODUCCIÓN DE RELAVES

Si se considera que la producción de cobre en concentrados anual<sup>1</sup> durante 1999 fue de 3,029 MMt, con una ley promedio de 1,0 % de cobre, los residuos de material inerte generados actualmente en la extracción de cobre por concepto de producción de concentrados, serían del orden de 99 toneladas por tonelada de cobre producido, sumando un total de aproximadamente 300 MMt de residuos generados sólo en 1999, para llegar a 320 millones en el año 2000, con tendencia a aumentar en el año 2001

Si se hiciera una estimación de la cantidad de residuos generados a lo largo de la historia de la minería Chilena, las cifras serían altísimas. Como ejemplo, se tienen antecedentes de las compañías mineras<sup>2</sup> que participan en el presente estudio, lo cual sirve para hacerse una idea de la magnitud del problema.

La División Andina de Codelco-Chile, desde el inicio de sus faenas en 1970 hasta Diciembre de 1999, ha depositado un total de **229.891.108 ton** que corresponden a 34.018.289 ton en el Tranque Piuquenes y 195.872.819 ton en el Tranque Los Leones, sin contar lo depositado durante el año 2000, en el nuevo Tranque Ovejería, donde se depositan aproximadamente 62.000 ton cada día.

En la División El Teniente, se han producido más de **1.305.437.500 ton** de relaves, que han sido depositados principalmente en el Embalse Laguna Carén, y actualmente se producen, en promedio 94.000 ton/día.

En la División Chuquicamata, ya se han acumulado **1.258.103.700 ton** de sólido seco, produciendo actualmente 145.466 ton/día.

---

<sup>1</sup> Fuente: Compendio de la minería Chilena 2000

<sup>2</sup> En base a información entregada directamente por las compañías mineras

En la minera Los Pelambres, la producción histórica (Noviembre 1990 a Agosto 2000) asciende a más de **256.513.212 ton**, teniendo actualmente una producción promedio de 124.033 ton/día,

En la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi se depositaron, sólo durante el año 2000, **23.050.707 ton**, y produce actualmente un promedio de 66.720 ton/día.

Lo anterior se resume en la siguiente tabla:

**Tabla 4: Producción de Relaves en cada Compañía Minera**

<b>Minera*</b>	<b>Operación</b>	<b>Producción Histórica (ton)</b>	<b>Producción Actual (ton/día)</b>
Andina	1970 -1999	229.891.108	62.000
Chuquicamata	1954 -1999	1.258.103.700	145.466
Teniente	1950 -1999	1.305.437.500	94.000
Los Pelambres	Nov 1990 - Ag 2000	256.513.212	124.033
Collahuasi	Enero-Dic 2000	23.050.707	66.720

\*El Soldado y Salvador no entregaron esta información.

### **3. PUNTOS DE CONFLICTO**

#### **3.1- Impactos Potenciales**

El agua contenida en los relaves depositados puede ser tóxica para el medio ambiente debido a los reactivos químicos y elementos metálicos en solución que contiene, y que provienen del proceso de flotación, ya que la emisión de ésta solución puede transportar contaminantes hacia otros lugares, y alcanzar napas de aguas superficiales o subterráneas. Una emisión masiva de agua embalsada, sin control, podría afectar la integridad de la estructura del depósito de relaves, lo cual conlleva la posibilidad de una catástrofe de magnitud mayor, afectando a la vida silvestre, los organismos acuáticos, las poblaciones humanas y finalmente la costa marina.

#### **3.2- La generación de ácidos**

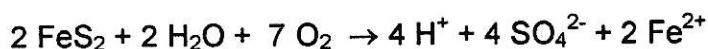
La mineralogía del material, especialmente los sulfuros metálicos, así como también la disponibilidad de ingreso de oxígeno y agua a los relaves en su disposición final son los causantes de la generación de acidez, la que ocurre producto de la oxidación de los sulfuros presentes en el relave. Los minerales metálicos sulfurados están presentes en los recursos mineros, y no son cuantitativamente separados por flotación, por ejemplo, se pierde aproximadamente un 8% de cobre y un 70 % de pirita en los relaves.

##### **3.2.1- Oxidación de Minerales Sulfurados**

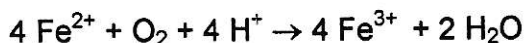
Previo a la actividad minera, la oxidación de minerales y la consecuente formación de ácido sulfúrico es función sólo de procesos de meteorización. Este término se refiere a la destrucción de rocas sólidas a causas de fuerzas químicas, como oxidación, reducción e hidrólisis; físicas/mecánicas como cambios de temperatura, y cristalización de sales; y/o fuerzas biológicas, como la presencia de raíces y bacterias. Este es un proceso que ocurre lentamente donde el tipo de roca, sus propiedades

físicas y químicas, y el clima determinarán finalmente el tipo y magnitud de las fuerzas que tendrán lugar y eso a su vez, determinará el tipo de materiales formados, como rocas sedimentarias y el suelo propiamente tal. Durante estos procesos va variando el contenido de minerales de la roca, debido a la distinta resistencia que presentan a los procesos antes mencionados. En este proceso de rompimiento y formación de materiales, muchos metales quedan liberados y pueden movilizarse a través del suelo, lo que ocurre debido a su interacción con las soluciones acuosas presentes.

La oxidación de los minerales sulfurados consiste en una serie de reacciones. Cada sulfuro tiene una distinta velocidad de oxidación; por ejemplo, la marcasita y la pirita framboidal se oxida rápidamente, mientras que la pirita cristalina lo hará lentamente aún cuando existe catálisis de microorganismos. También debe considerarse la presencia de otros minerales sulfurados como calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), calcocita ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) y arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ) entre otros. Para ejemplificar el proceso, la oxidación de la pirita:



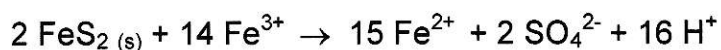
La especie  $\text{S}_2^{2-}$  es oxidada para formar sulfato, liberando iones hidrógeno, ambos productos de la disociación del ácido sulfúrico en solución. El  $\text{Fe}^{2+}$  soluble está libre para reaccionar. La oxidación del ión ferroso a ión férrico ocurre más lentamente a pH más bajo, según:



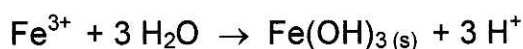
A niveles de pH comprendidos entre 3.5 y 4.5, la oxidación del hierro es catalizada por microorganismos tipo *Metallogenium*, una bacteria filamento. Bajo pH 3.5, la misma reacción es catalizada por la bacteria *Thiobacillus ferrooxidans*. Otras bacterias que pueden catalizar esta reacción se presentan en la tabla 5.

misma reacción es catalizada por la bacteria *Thiobacillus ferrooxidans*. Otras bacterias que pueden catalizar esta reacción se presentan en la tabla 5.

Si el ión férrico es formado en contacto con pirita, puede ocurrir la siguiente reacción::



disolviendo la pirita y generando más ácido sulfúrico. La disolución de pirita por el ión férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ), en conjunto con la oxidación del ión ferroso constituye el ciclo de oxidación de la pirita. El ión férrico precipita como óxido de hierro hidratado, como se indica en la siguiente reacción:



**Tabla 5 : Bacteria de minerales sulfurados y sus condiciones de crecimiento**

MICROORGANISMO	PH	TEMP, °C	AERÓBICO	NUTRICIÓN
<i>Thiobacillus thiooparus</i>	4.5 - 10	10 - 37	+	Autótrofo
<i>T. ferrooxidans</i>	0.5 - 6.0	15 - 25	+	"
<i>T. thiooxidans</i>	0.5 - 6.0	10 - 37	+	"
<i>T. neapolitanus</i>	3.0 - 8.5	8 - 37	+	"
<i>T. denitrificans</i>	4.0 - 9.5	10 - 37	+/-	"
<i>T. novellas</i>	5.0 - 9.2	25 - 35	+	"
<i>T. intermedius</i>	1.9 - 7.0	25 - 35	+	"
<i>T. perometabolis</i>	2.8 - 6.8	25 - 35	+	"
<i>Sulfolobus acidocalderius</i>	2.0 - 5.0	55 - 85	+	"
<i>Desulfovibrio desulfuricans</i>	5.0 - 9.0	10 - 45	-	Heterótrofo

La acidez generada es la responsable de la disolución de iones como As, Fe, Mn, Mo, o también Cu, Co, Cr, etc., que producto de su movilidad acuosa pueden salir del enclave de los relaves y así causar daño a la flora y fauna aguas abajo o a las aguas subterráneas.

### **3.2.2- Componentes que afectan la generación de ácido sulfúrico**

En la siguiente lista de componentes se describe la composición de la fase sólida y el ambiente de reacción de los minerales sulfurados, que afectarán la generación de ácido.

Componentes que afectan la total capacidad de generar ácido:

- Cantidad de minerales (sulfuros) presentes,
- Cantidad de minerales consumidores de ácido presentes,
- Cantidad de arcillas intercambiadoras de iones (Esmectita)

Componentes que afectan la cantidad de ácido generada:

- Tipo de mineral sulfurado (incluyendo su forma cristalina)
- Tipo de carbonato presente (y otros minerales consumidores de ácido)

Componentes que afectan la velocidad de generación de ácido:

- Área superficial del mineral disponible para la reacción
- Disponibilidad de agua y oxígeno
- Bacterias
- Temperatura
- pH inicial

### **3.2.3- Factores Contribuyentes**

El potencial de un residuo minero para generar ácido y emitir contaminantes depende de los factores enumerados en el punto 3.2.2.

La velocidad con que un residuo minero se oxida puede ser manipulada si se considera que algunos minerales sulfurados son más fácilmente oxidables que otros, tal es el caso de la pirita framboidal, la marcasita, y la pirrotita, lo cual conlleva que puedan tener un mayor impacto en la duración y la magnitud de la generación de ácido, que otros sulfuros metálicos. También es importante considerar el estado físico del mineral, en efecto aquellos en forma de cristal tienen menor área de contacto que aquellos que están en forma dispersa, como partículas.

La presencia de agua y oxígeno es indispensable para la generación y circulación de ácido. El agua sirve como reactante y como soporte para las bacterias que catalizan el proceso de oxidación, además de ser el medio de transporte de los productos de la oxidación.

El oxígeno es particularmente importante para mantener el medio de oxidación bacteriana en valores de pH bajo 3,5. La oxidación de sulfuros se reduce considerablemente cuando la concentración de oxígeno en los espacios porosos de los residuos mineros es menor que 1 o 2% del volumen total.

La reacción de oxidación es exotérmica, y puede generar una gran cantidad de calor que es disipado mediante evaporación y convección. Esto ocurre gracias a la alta porosidad del material, que permite la formación de celdas convectivas, que pueden ir transmitiendo el calor hasta llegar a la atmósfera y seguir dirigiendo la reacción de oxidación. El flujo de gas convectivo, así como la oxidación misma, dependen de la máxima temperatura que pueda alcanzarse en el interior de la unidad del residuo (roca, partícula).



EL pH inicial es fundamental para la cinética de la generación de ácido. La neutralización del ácido mediante descargas alcalinas, por ejemplo cuando el ácido reacciona con carbonato, es una manera importante de regular la producción de ácido. Los minerales más comunmente usados para regular la acidez son calcita y dolomita, o bien la cal agregada durante el proceso de flotación.

Durante la generación de ácido, el pH de las soluciones implicadas baja a 2,5 o menor aún; éstas condiciones generan la disolución de los minerales asociados a los sulfuros metálicos y la liberación de cationes metálicos tóxicos, por ejemplo plomo, cobre, plata, manganeso, cadmio, hierro y zinc. Además, la concentración de los aniones disueltos también tiende a aumentar, principalmente sulfato. Todas estas especies contribuyen a la carga de contaminantes de la solución.

La naturaleza física del material, como tamaño de las partícula, permeabilidad, y características de meteorización, son muy importantes para la generación de ácido. El tamaño de partícula determina la superficie que está expuesta a la meteorización y a la oxidación. El área superficial es inversamente proporcional al tamaño de la partícula, así, un material muy áspero y granuloso expone poca área superficial para la reacción de oxidación, pero permite un mayor ingreso de aire y agua y a un nivel más profundo en la unidad, exponiendo más el material a la oxidación, con lo cual finalmente se generaría mayor cantidad de ácido. La circulación de aire a través de material grueso es facilitada por el viento, cambios en la presión atmosférica y el posible flujo de aire convectivo debido al calor generado en la reacción de oxidación.

En contraste con lo anterior, en aquel material conformado de granos muy finos, el flujo de aire se ve retardado, y el agua puede circular muy lentamente. Sin embargo, los granos finos exponen una mayor área superficial a la oxidación, y la reacción puede ocurrir más fácilmente, siempre que exista suficiente agua y oxígeno disponible. Esto es lo que ocurre en los relaves, donde el tamaño de partícula se encuentra aproximadamente en 200 mallas.

Obviamente, la relación entre el tamaño de la partícula, el área superficial y la velocidad de oxidación juega un papel muy importante en la generación de ácido y en la consecuente lixiviación de contaminantes.

La manipulación que permita bloquear la generación de ácido en relaves consiste en disponerlos con una reserva alcalina, impedir la entrada de agua al sistema y mantener una compactación o baja permeabilidad para reducir el flujo de agua y oxígeno disuelto en agua.

### **3.3- Determinación del Potencial de Generación de Acidez:**

Como consecuencia de la creciente necesidad de determinar si un material, residuo, o suelo propiamente tal, presenta propiedades de generación de ácido, se han desarrollado numerosos métodos para dicho efecto. De ellos el más utilizado es el procedimiento ABA (Acid Base Accounting).

Los procedimientos ABA son utilizados para predecir el potencial de generación de ácido y la lixiviación ácida. Las mediciones son realizadas durante un período determinado de tiempo, y los resultados son interpretados en términos del "potencial" de la capacidad de generación de ácido de un material residual para exceder o no el potencial de neutralización de ese material.

El potencial ácido de una muestra representa la cantidad de sulfuro disponible para producir ácido sulfúrico a partir de la oxidación de los minerales sulfurados. Entonces el potencial ácido (AP, Acid Potential) es calculado directamente a partir de la presencia de sulfuros. El potencial de neutralización (NP, Neutralization Potential) es determinado basándose en la cantidad de ácido que puede ser consumido por una muestra sólida, lo que se atribuye a la presencia de carbonatos y otros minerales que pueden consumir iones hidrógeno.

La comparación entre el AP y el NP de una muestra provee una indicación del potencial de la muestra de producir ácido cuando está expuesta a la atmósfera por largos períodos de tiempo, y puede ser usada como un criterio para evaluar el potencial que tiene los materiales de producir ácido en el futuro. Si el valor de NP es mayor que el de AP, debiera existir, teóricamente, suficiente potencial de neutralización para consumir el ácido generado durante la oxidación de los minerales sulfurados. Si el valor de AP es mayor que el de NP, entonces habría suficiente sulfuro en la muestra como para producir acidez neta luego de que ha ocurrido la oxidación de los minerales sulfurados.

Una manera de evaluar los resultados es mediante la comparación de la razón entre NP y AP. Si es 1, lo que implica  $NP=AP$ , corresponde al límite bajo el cual la generación de ácido es probable, y sobre el cual el potencial de generación de ácido disminuye, hasta que un valor sobre 3 representa que no habría generación de ácido. En muestras con un NP/AP entre 1 y 3 se considera que el potencial de generación de ácido es incierta.

Las unidades para expresar el Potencial de Neutralización (NP) o al potencial de Acidez (AP) se puede expresar como Kg  $CaCO_3$  /ton o bien como Kg  $H_2SO_4$ /ton. Esta unidad está referida a la cantidad disponible de  $CaCO_3$  por tonelada de material (NP) o la cantidad equivalente de  $CaCO_3$  que podría ser consumida por el ácido generado (AP). La segunda unidad representa a la cantidad de ácido sulfúrico generado por tonelada de material (debido a AP) o la cantidad de ácido que potencialmente podría ser consumida (por NP). Si bien ambas unidades son similares, la más aceptada es la que expresa los valores en función de  $CaCO_3$ .

### **3.4- Soluciones**

#### **3.4.1- A la generación de ácido**

Se han propuesto varias soluciones para evitar la generación de ácido y consecuentemente la lixiviación de contaminantes:

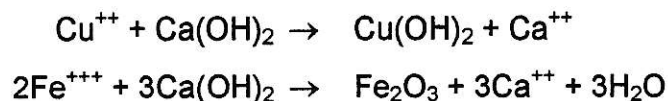
- Almacenar los relaves sin entradas de agua, que es el agente clave en la oxidación;
- Aumentar la reserva alcalina para bloquear la oxidación bacteriana;
- Almacenar en tranques estancos, con tratamiento de las soluciones sobrenadantes con cal, separación de los precipitados resultantes y retorno del agua a los cauces aguas abajo;
- Depositar los relaves de manera que se compacten, para disminuir así la circulación de aire y agua.

Otra manera de disminuir la generación de ácido, sería mediante el control de la pirita. Esto podría lograrse mediante modificaciones operacionales que permitan separar la pirita del resto de material, como la adición de un circuito de flotación para separar la pirita residual de la corriente total de relaves, produciendo así dos relaves: uno inerte, con un bajo potencial de generación de ácido, y otro concentrado en pirita. Así éstos podrían ser manejados independientemente.

Los relaves inertes serían depositados a través del sistema actual de disposición de relaves, ubicados en áreas susceptibles a la oxidación, tapando efectivamente los relaves depositados anteriormente, que sí contienen pirita, actuando como cubierta inerte. El concentrado de pirita sería depositado en un estanque donde se mantendría en condiciones de baja humedad, y podría ser encapsulado dentro de los relaves inertes.

### 3.4.2 - Tratamiento de Soluciones Acuosas de Relaves

Como se ha establecido, es posible agregar sustancias que neutralicen el ácido formado y regulen así el pH. Las reacciones de neutralización son del tipo:



Los productos formados son precipitados de óxidos/hidróxidos de metales pesados, que se separan por clarificación y espesamiento. Estos precipitados son obtenidos como geles en su forma inicial, o bien como óxidos al envejecer. Se disponen en otros pozos, o bien se retornan a los tranques de relaves. Si las leyes de cobre son importantes en estos residuos, se reprocesan por lixiviación ácida.

Las soluciones alcalinizadas, en especial por la presencia de  $\text{Ca}^{++}$ , se van neutralizando naturalmente con el dióxido de carbono,  $\text{CO}_2$  de la atmósfera, autorregulando así la acidez:



En otros lugares se ha recurrido a la reducción bacteriana (wetlands) que reducen los sulfatos a sulfuros, los cuales son precipitados y retenidos en tranques, previo a la liberación del agua a los cauces.



Para que un efluente pueda ser retornado a los cauces, se debe cumplir con los requisitos especificados en el Decreto 90<sup>1</sup>, en el cual se especifican las condiciones para la evacuación de residuos a los cuerpos de agua. En este decreto se especifica,

por ejemplo, que el rango de pH de un residuo para ser evacuado a aguas fluviales o lacustres debe estar en el rango 6,0-8,5, siempre que cumpla con los otros requerimientos asociados.

### **3.4.3- Del uso del agua**

Los efluentes obtenidos luego de la neutralización de las soluciones resultantes del almacenamiento de los relaves pueden ser vertidos en los cauces, una vez que cumplen con las exigencias químicas de la ley de aguas <sup>1</sup>: Decreto 90. Siendo el recurso agua uno de los más escasos, en la industria minera se busca la optimización máxima de su utilización, recirculándola indefinidamente hasta su pérdida por humectación en los relaves o evaporación. Lo anterior es lo que ocurre en lugares áridos, como Chuquicamata, Escondida, Collahuasi, Zaldívar, Mantos Blancos, entre otros, donde recirculan al máximo, por la escasez del agua en esa zona, no llegando nunca a la emisión de agua en los cauces, o bien, las empresas extraen desde las fuentes el agua justa de reposición para sus procesos.

En aquellos lugares donde el agua de los relaves no cumple con los requisitos de evacuación a los cauces de agua, como Disputada de Las Condes, el agua es evaporada irrigando bosques de eucaliptos en el sector de Las Tórtolas, árboles que tienen la particularidad de ser verdaderas máquinas evaporadoras de agua, con lo cual el agua es retornada al medio ambiente sin alterarlo. Esto también ocurre en Andina, donde por evaporación evacúan el agua de los relaves llegando a generar bosques en lugares áridos, lo que ocurre en la Planta Experimental de Huechún.

En otros casos, como Laguna Carén en El Teniente, se hacen tratamientos intensos de sus efluentes, llegando a mantener peces y chacras de vegetales con sus efluentes.

---

<sup>1</sup> Anexo 4 Establece Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales (30 Mayo 2000)

### CAPÍTULO III

## **MARCO LEGAL CON RESPECTO AL MANEJO DE RESIDUOS PELIGROSOS**

### **1. LEGISLACIÓN VIGENTE**

En este momento la legislación vigente sobre el manejo y disposición de residuos peligrosos no es específica, y está regido actualmente por el Decreto Supremo 745, que se refiere a las Condiciones Sanitarias y Ambientales Básicas en los Lugares De Trabajo. Posteriormente, en Septiembre de 1999 se promulgó un nuevo decreto, el Decreto Supremo 594, que fué publicado en el Diario Oficial el 29 de Abril de 2000, pero aún no es totalmente aplicado. Éste reemplaza al DS 745, y si bien incluye varias modificaciones en su contexto general, en particular a lo que a manejo de residuos se refiere, no presenta cambios significativos. En ambos sólo el Título II, "Del Saneamiento Básico de los Lugares de Trabajo", Párrafo III " De la disposición de Residuos Industriales Líquidos y Sólidos" versa sobre el manejo de residuos peligrosos. (ver anexos 1 y 2)

En éstos decretos las indicaciones son poco específicas, ya que no hay una real definición y clasificación de los residuos industriales peligrosos, por ejemplo, en el artículo 15° DS 745 (o artículo 16°-DS 594), se habla de que no podrá vaciarse a la red pública de desagüe ninguna *"sustancia o residuo industrial susceptible de ocasionar perjuicio, obstrucciones, o alteraciones que dañasen canalizaciones internas y que den origen a un riesgo o daño para la salud de los trabajadores o un deterioro del medio ambiente"*, pero sin una especificación de los parámetros y métodos analíticos para la determinación y calificación de peligrosidad. Éste artículo del DS 745 es reemplazado en el DS 594, donde sólo se incluye que *"la descarga de contaminantes al sistema de alcantarillado se ceñirá a lo dispuesto en la Ley de Bases Generales del medio Ambiente y las normas de emisión y demás normativas complementaria de ésta"*.



Otro punto relevante es el hecho de que es la "autoridad ambiental" la que prescribe y determina los tratamientos de neutralización y depuración de los relaves industriales o mineros o las aguas contaminadas para ser incorporadas a masas de agua; pero no hay una especificación de dicha autoridad: Sesma, Conama, Ministerio De Salud. Por otra parte, se hace referencia a aguas contaminadas pero no se especifica bajo qué parámetros se consideran como tal, ni a qué otro reglamento acceder para determinar dicha característica, por ejemplo, considerar la ley de emisión de contaminantes a las aguas marinas y continentales superficiales, Decreto 90.

En el artículo 17° Decreto Supremo 754 (18° DS 594) se define residuo industrial, como "*todo aquel residuo sólido o líquido, o combinaciones de éstos, provenientes de los procesos industriales y que por sus características físicas, químicas o microbiológicas no puedan asimilarse a los residuos domésticos*". Si se considera que el párrafo corresponde a la disposición de Residuos Industriales Líquidos y Sólidos, esta definición debiera encabezar dicho párrafo, y además especificar cuáles son las características físicas, químicas o microbiológicas que determinarán si un residuo puede considerarse como doméstico.

En el artículo siguiente se incluye una lista de sustancias que serán consideradas como residuos peligrosos, pero no especifica en qué concentración, ni los valores máximos permisibles, ni cómo se determina si es o no realmente peligroso. Además ordena que la industria "generadora" de residuos presente una declaración en que conste la calidad y cantidad de residuos, "diferenciando claramente" los residuos industriales peligrosos, pero aún no se establece un parámetro para dicha diferenciación.

## 2. LEGISLACIÓN PROPUESTA

Debido a las deficiencias de la legislación vigente en la regulación del manejo y disposición de los residuos industriales, sean o no peligrosos, se generó un reglamento específico para este tema, el "Reglamento sobre Manejo Sanitario de Residuos Peligrosos"<sup>1</sup> desarrollado por el Departamento de Programas sobre el Ambiente, de la División de Salud Ambiental del Ministerio de Salud de la República de Chile, el cual aún se encuentra en período de estudio para su aprobación final.

En el reglamento propuesto se incluye una definición acabada de lo que es un residuo peligroso y los métodos para determinar esta condición. En este contexto, el presente estudio analiza el problema de la lixiviación de contaminantes en los residuos, el cual es un parámetro que debe ser considerado al decidir sobre si un residuo es peligroso o no, ya que incluye su reactividad a largo plazo, y es uno de los parámetros más importantes al estudiar el impacto de los residuos mineros masivos.

Este reglamento establece las condiciones sanitarias y de seguridad mínimas a que deberá someterse la acumulación, selección, transporte, recolección, comercialización, reutilización, tratamiento y disposición final de los residuos peligrosos. Además incluye las definiciones pertinentes para el entendimiento y aplicación del reglamento, entre ellas, las más relevantes para el presente análisis son:

- **Acumulación o Almacenamiento** : se refiere a la conservación de residuos peligrosos en el recinto de generación durante un lapso máximo definido, al final del cual éstos deben ser conducidos a una instalación de Eliminación de Residuos Peligrosos.
- **Disposición final** : procedimiento de eliminación mediante el depósito definitivo en el suelo de los residuos peligrosos, con o sin tratamiento previo.
- **Generador** : propietario de toda instalación o actividad que genere residuos peligrosos.
- **Lixiviado** : líquido que ha percolado o drenado a través de un residuo y que contiene componentes solubles de éste.

Se hace notar que la incorporación de polvo al aire desde los depósitos de relaves no es tratada en este reglamento, sino que para éste tema se debe recurrir a la regulación de los ambientes de trabajo, al que hace referencia el Anexo 2, del Decreto Supremo 594, mencionado anteriormente.

Es importante mencionar que se especifica que las condiciones sanitarias y ambientales de los lugares de trabajo en los cuales se manejen residuos peligrosos serán las establecidas por el DS 745, incluyendo sus modificaciones posteriores, e incluye una definición acabada de cuándo un residuo será considerado como peligroso:

*"Un residuo o una mezcla de residuos se considerará como peligrosos en función de sus características de peligrosidad, puede presentar riesgo para la salud pública, provocando o contribuyendo al aumento de la mortalidad o a la incidencia de enfermedades y/o presentando efectos adversos al medio ambiente cuando es manejado o eliminado en forma inadecuada"*

Y define características de peligrosidad como:

*"Serán características de peligrosidad:*

- TOXICIDAD AGUDA*
- TOXICIDAD CRÓNICA*
- INFLAMABILIDAD*
- REACTIVIDAD*
- CORROSIVIDAD*
- TOXICIDAD POR LIXIVIACIÓN "*

Para el caso específico del presente análisis, interesa qué ocurre en el caso de la toxicidad por lixiviación. Al respecto:

*" ... se considerará un residuo como peligroso si los productos de lixiviación de una muestra representativa del residuo sometida al TEST DE TOXICIDAD POR LIXIVIACIÓN, definido en el Anexo II del presente reglamento, sobrepasa la concentración máxima permisible CMP, de uno o más de los siguientes constituyentes tóxicos" Estos son presentados en la Tabla 6.*

En el caso de los residuos mineros masivos como los relaves, los elementos de relevancia son los elementos inorgánicos (\*), como As, Ba, Cd, Hg, Pb, Ag, Se, pero también debiera considerarse que ocurre con elementos como Mn, Mg y Fe, los cuales si bien son constituyentes principales de los minerales, en los residuos se encuentran más expuestos al medio y, por lo tanto, pudieran por lixiviación, llegar a contaminar el entorno o permear a aguas subterráneas.

En cuanto al "Test de Toxicidad por Lixiviación" definido en el reglamento, se trata del TCLP, o Toxicity Characteristic Leaching Procedure<sup>2</sup>, método 1311 de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (United States Environmental Protection Agency, US EPA). Este test está siendo aplicado hace mucho tiempo, y es la primera vez que se reglamenta con respecto a su uso.

---

<sup>2</sup> Ver Anexo 6

**Tabla 6: Concentraciones Máximas Permisibles Para La Aplicación Del Test De Toxicidad Por Lixiviación**

SUSTANCIA	CMP (MG/L)
Arsénico	5 *
Cromo	5 *
Mercurio	0.2 *
Plomo	5 *
Selenio	1 *
Bario	100 *
Benceno	0.5
Cadmio	1 *
Tetracloruro de Carbono	0.5
Clordano	0.03
Clorobenceno	100
Cloroformo	6
o-Cresol (*)	200
m-Cresol (*)	200
p-Cresol (*)	200
Cresol (*)	200
2,4-D	10
1,4-Diclorobenceno	7.5
1,2-Dicloroetano	0.5
1,1-Dicloroetileno	0.7
2,4-Dinitrotolueno	0.13
Endrin	0.02
Heptacloro (y su hidróxido)	0.008
Hexaclorobenceno	0.13
Hexacloro-1,3-Butadieno	0.5
Hexacloroetano	3
Lindano	0.4
Metoxicloro	10
Metiletilcetona	200
Nitrobenceno	2
Pentaclorofenol	100
Piridina	5
Plata	5 *
Tetracloroetileno	0.7
Toxafeno	0.5
Tricloroetileno	0.5
2,4,5-Triclorofenol	400
2,4,6-Triclorofenol	2
2,4,6-TP(silvex)	1
Cloruro de Vinilo	0.2

Es importante mencionar que se especifica que cuando no exista una metodología aprobada por el Ministerio De Salud, se tomará como referencia la última edición del documento SW-846 "Test Methods for Evaluating Solid Waste" de la US EPA.

En cuanto al manejo específico de los residuos mineros, establece que:  
*"para efectos de la aplicación del presente reglamento, los siguientes residuos mineros masivos que provengan de las operaciones de extracción, beneficio y procesamiento de minerales no serán considerados como peligrosos:*

- a) *Estériles,*
- b) *Minerales de baja ley,*
- c) *Residuos de minerales tratados por lixiviación,*
- d) *Relaves, y*
- e) *Escorias.*

*Para efectos de la caracterización de la toxicidad por lixiviación de los residuos masivos mineros, se utilizará el método "Lixiviación por Precipitación Sintética", método 1312 (Synthetic Precipitation Leaching Procedure) de los Test Methods for Evaluating Solid Waste" de la US EPA. El procedimiento de la aplicación del método se presenta en el anexo 4*

Con lo anterior queda claro en el reglamento que los residuos mineros deben ser analizados de manera distinta, disipando las dudas que generaba anteriormente la aplicación del test TCLP.

## CAPÍTULO 4

### DETERMINACIÓN DE LA MOVILIDAD DE LOS METALES: TEST DE LIXIVIACIÓN

#### 1. ANTECEDENTES GENERALES

##### 1.1 Definición

*Lixiviación* se denomina al proceso de remoción de materiales por disolución de ellos desde los sólidos, y puede definirse como aquello que ocurre en soluciones acuosas en las cuales la solubilidad de metales o compuestos de un material determinado en una solución dada es tal que pueden ser extraídos del material en una cantidad aceptable para cuantificar dichos metales en la solución resultante.

Para que esto ocurra, es importante que en la misma solución los metales y compuestos que son "desechados" en la reacción de lixiviación tengan una solubilidad lo suficientemente baja para producir una separación aceptable de los minerales valiosos de los de desecho, y así obtener una solución de concentración aceptable para la subsecuente recuperación del metal.

Así también debiera conocerse la solubilidad del desecho o mineral que será descartado y de lo que se desea recuperar, en términos de variables sensibles del sistema, como temperatura, presión, y concentración de los reactivos en cuestión. La solubilidad de cada sustancia es obtenida del equilibrio químico de la reacción de disolución.

Esto es válido para la lixiviación a nivel industrial, donde el proceso se utiliza para separar los metales de los minerales que los contienen y también para extraer el azúcar de la remolacha, pero éste fenómeno puede ocurrir naturalmente debido a la acción de la lluvia y otros componentes atmosféricos.

Recientemente, éste ámbito ha tomado mayor relevancia debido a la gran cantidad de residuos peligrosos que deben ser depositados, de los cuales pueden lixiviar compuestos tóxicos. A veces la ruptura natural de ciertas sustancias tóxicas en otro producto químico genera uno que es aún más peligroso, y que también es posible de ser lixiviado según las condiciones ambientales. Por ejemplo, la lluvia al pasar a través de estos materiales los incorpora también a las aguas subterráneas, a los lagos y a otros receptores.

Aunque muchos materiales tóxicos tienen baja solubilidad en agua, las concentraciones que se consideran peligrosas son también muy bajas. Además, muchos compuestos tóxicos son bioacumulados por las células, principalmente en los organelos interiores, lo que ocurre incluso a muy bajas concentraciones.

Por lo anterior y debido al creciente interés en la protección del medio ambiente, ha aumentado considerablemente el uso de métodos de determinación de la lixiviación, principalmente en áreas como tratamiento y disposición de residuos, incineración de éstos, quema de residuos combustibles, limpieza de suelos y reuso de éste, tratamiento de lodos, etc. Con ello se pretende determinar si el residuo analizado presenta lixiviación de metales, catalogando así su grado de toxicidad.

En vista de estos progresos en la consideración del test para determinar la peligrosidad de un residuo, son necesarios esfuerzos para armonizar los procedimientos de determinación de la lixiviación, los cuales podrían ser adaptados para diversas matrices y validar la aplicabilidad de pruebas existentes en otros campos. Todo esto para mejorar la relación entre los organismos reguladores y la industria, ya que una gran variedad de métodos y pruebas de lixiviación/extracción genera mayor conflicto y dificulta el logro de un consenso.



## 1.2 Proceso

En una pila de mineral sujeta al proceso de lixiviación, lo que ocurre básicamente es un proceso donde una solución acuosa, generalmente acidificada con ácido sulfúrico se hace pasar a través de la pila, en donde el sólido constituye una fase inmóvil y el solvente se infiltra a través de ella, disolviendo elementos metálicos. En el caso de los relaves, el proceso es similar, pero la acidificación de la solución proviene de la oxidación de los sulfuros metálicos residuales.

En la lixiviación industrial, se mezclan el solvente y el sólido en una proporción tal que se acerque al equilibrio de disolución, y se separan las dos fases. El líquido y los sólidos van desplazándose hacia las fases adyacentes. La fase solvente, llamada extracto, se concentra cada vez más en cada una de las etapas de contacto con el sólido, haciéndose cada vez más rico en soluto; mientras que el sólido pierde material soluble al moverse a través de la fase solvente fresca. En un depósito de desechos ocurre básicamente lo mismo, pero con la diferencia de que no es posible conocer los equilibrios implicados.

En la industria minera, la lixiviación ocurre por recirculación de las soluciones ácidas sobre las pilas o botaderos de minerales, donde la solución atraviesa éstos y es recolectada por drenajes construidos en las bases de las pilas. La solución acuosa llega a alcanzar concentraciones comerciales de elementos metálicos, que son procesados, por ejemplo en el caso del cobre, por extracción por solvente seguido de electrodeposición.

### 1.3 Parámetros

El proceso de lixiviación depende de muchas variables, como el tamaño o área superficial de los minerales, la distancia de difusión (este factor además depende, muchas veces, del movimiento del mineral) y la concentración del solvente o "reactivo de lixiviación". A esto debe agregarse el potencial redox, la temperatura, la densidad relativa de la pila, la viscosidad de la solución, y así también la cantidad de agua que está presente en la reacción; parámetros que deben ser estudiados individual y colectivamente. También deben considerarse la presencia de bacterias acidófilas, como *Acid thiobacillus ferrooxidans*, para la lixiviación de sulfuros secundarios de cobre.

Estos parámetros son considerados a cabalidad cuando se trata de la lixiviación comercial, cuando se requiere tener un preciso control del tiempo de lixiviación para asegurar así la óptima obtención del metal que se quiere extraer. El problema comienza cuando se trata de la lixiviación de contaminantes en un sitio tipo "botadero" o bien en el suelo propiamente tal, donde no se puede conocer directamente dichos parámetros y, por lo tanto, tampoco pueden controlarse.

Es entonces cuando se hace indispensable la determinación de la movilidad de los metales en estos casos, y así determinar en qué medida pasan al suelo y a las napas subterráneas.

## **1.4 Aplicación de Test para determinar la movilidad de los iones metálicos**

Para determinar y analizar los métodos de determinación de toxicidad por lixiviación, la cual hace catalogar a un residuo como peligroso o no, debe analizarse en primer lugar qué se entiende por residuo peligroso.

### **1.4.1 Definición Residuo Peligroso:**

La EPA lo define como *"Aquellos residuos sólidos que pueden presentar un peligro sustancial presente o potencial a la salud humana y al ambiente, cuando son manejados inapropiadamente"*, en la definición, se promulgan también las características que clasifican a los residuos como peligrosos, en virtud de sus propiedades inherentes. Se establecen dos criterios para identificar las características de peligrosidad de un desecho:

- i. la característica debe ser capaz de ser definida en términos de sus propiedades físicas, químicas y otras, las cuales causen que el residuo se encuentre en la definición reglamentaria de Residuo Peligroso.
- ii. Las propiedades que definen la característica deben ser medidas, estandarizadas y poseer protocolos de medición disponibles.

Según esta regla el potencial que tiene un residuo de lixiviar concentraciones significativas de sustancias tóxicas es una característica definida.

### **1.4.2 Procedimiento Básico**

Varios procedimientos de lixiviación están disponibles para evaluar movilidad de los metales. Dos de los procedimientos más utilizados requieren mezclar el residuo sólido con el líquido extractante apropiado seguido de una agitación por 18 horas en un mezclador rotatorio. El líquido es filtrado, se hace una digestión ácida en una placa caliente y los metales son analizados mediante Inducción de Plasma acoplado a Espectroscopía de Emisión Atómica (ICP-AES) excepto el mercurio que se analiza por Espectroscopía Atómica de Vapor Frío. Los demás parámetros orgánicos se analizan según los métodos analíticos apropiados.

## 2. TCLP

El método más comúnmente utilizado es el EPA 1311, Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) Procedimiento de determinación de la toxicidad característica por lixiviación (ver anexo 5), el cual evalúa la movilidad de los metales en un recinto de disposición de residuos sanitarios. El tipo de fluido de extracción fue desarrollado por un modelo computacional que simulaba el peor caso de disposición de cualquier residuo (suponiendo una co-disposición con los residuos sólidos municipales).

El TCLP fue desarrollado por la EPA en respuesta a las deficiencias presentadas por el EP, Extraction Procedure y ambos fueron diseñados para evaluar:

- si un residuo debe clasificarse como peligroso
- si el proceso de tratamiento de residuos es efectivo
- si la forma de disposición de estos residuos en el sitio estudiado es un método apropiado para manejar dichos residuos.

Si bien el TCLP reemplaza al EP y mejora considerablemente la aplicabilidad del test, muchas de las suposiciones generales se mantuvieron, como por ejemplo, el hecho de que en ambos modelos los residuos industriales son dispuestos en el mismo sitio que los residuos municipales, en un botadero municipal, asumiendo una proporción de 5% de residuos industriales sólidos, y 95% de residuos municipales.

La extracción de TCLP es realizada sometiendo el material en cuestión a un lixiviado que simula el que habría en un botadero o relleno sanitario. El ácido acético fue elegido como el líquido de la extracción porque es el componente principal de los lixiviados municipales típicos del botadero. El pH de la solución tampón del ácido acético se mantiene en 4,93; esta mezcla ácida de muestra/ácido acético se somete a 18 horas de extracción rotatoria, diseñada para acelerar en "años" la exposición de material/suelo en el tiempo más corto posible. Después de dicha extracción, el líquido que resulta es

sometido a análisis de una lista de 39 contaminantes que está contenida en las regulaciones de la EPA. Estos contaminantes incluyen ocho metales, once compuestos orgánicos volátiles, doce compuestos orgánicos semi-volátiles, seis pesticidas y dos herbicidas.

La deficiencia básica del TCLP radica en que no toma en cuenta muchos de los parámetros que afectan a la lixiviación y que ha sido aplicado en situaciones que no serían las más apropiadas. Lo anterior es importante porque un test designado para "predecir" la lixiviación en botaderos municipales puede sobre o sub-estimar el potencial de lixiviación en otros escenarios. Esto es lo que ocurre cuando se aplica para evaluar la lixiviación de contaminantes desde residuos depositados en acopios, como el caso de los relaves y otros residuos mineros, que son básicamente material inorgánico.

En general, los problemas de la aplicación del TCLP son los siguientes:

- Considera que los residuos son dispuestos en un botadero municipal, lo cual es inadecuado para los residuos mineros y del procesamiento de minerales;
- El uso de un ácido orgánico (acético) como lixiviante es inapropiado para los residuos mineros, ya que los ácidos orgánicos causan una movilización atípica de metales desde estos residuos industriales, los cuales no están normalmente sujetos a lixiviación con ácidos orgánicos;
- Las reducciones de tamaño requeridas por el TCLP no son representativas de las condiciones del manejo actual en las industrias mineras;
- La dilución y los factores de atenuación en la aplicación del TCLP no consideran el grado de dilución y atenuación que puede ocurrir entre los residuos mineros y el agua;
- No considera procesos temporalmente dependientes como meteorización, biodegradación, oxidación, reducción y fenómenos físicos y, por ende, cómo éstos pueden influir en aumentar o disminuir la lixiviación y ser incorporados al proceso de estimación.

En resumen el test TCLP puede conducir a una falsa predicción de la tendencia de la lixiviación, porque las condiciones ácidas especificadas en el test pueden no ser representativas de las condiciones reales y el período de prueba especificado para el TCLP puede no ser suficiente para alcanzar el equilibrio de disolución entre los metales y la solución. Luego al ser aplicado, puede llevar a resultados erróneos.

En concreto, el TCLP puede ser mal aplicado de dos maneras. Primero, el análisis de los compuestos no incluidos en el desarrollo de los métodos o en el reglamento final de TCLP puede proporcionar a resultados técnicamente inválidos. Un ejemplo de esto sería la utilización de la extracción de TCLP para el cianuro, donde el procedimiento de la extracción por sí mismo dará lugar a la pérdida de complejos simples del cianuro, que representan la forma más tóxica de cianuro. La segunda manera que el TCLP puede ser mal aplicado es por el uso del procedimiento para materiales que no son destinados a los botaderos, en los cuales se hace necesario buscar procedimientos alternativos.

### 3. SPLP

En aquellos casos en que los residuos son depositados independientemente de los residuos municipales, puede ser apropiado un procedimiento alternativo; el método 1312 de EPA (anexo 6), Synthetic Precipitation Leaching Procedure, SPLP (procedimiento sintetizado de la lixiviación de la precipitación), EPA SW-846; el cual se utiliza para evaluar el destino y el transporte de metales en un sitio de disposición correctamente elegido y desarrollado, del cual se excluyan los residuos sólidos municipales, cuantificando el potencial para lixiviar de los metales en las aguas subterráneas y superficiales.

Este procedimiento es aplicable para los materiales donde será determinado el potencial de lixiviación debido a la precipitación normal, proporcionando una evaluación más realista de la movilidad del metal bajo condiciones reales de campo, es decir, qué sucede cuando llueve (o nieva), ya que el líquido de la extracción fué desarrollado para simular la precipitación. Para el análisis en suelos se especifican dos soluciones, una mezcla de ácido sulfúrico y nítrico, que varían según las condiciones ambientales: Al este del río Mississippi el líquido es levemente más ácido que pH 4,20 lo que refleja el impacto de la contaminación atmosférica, producto de la industrialización y de las minas de carbón. Al oeste del Mississippi se utiliza un pH de 5,00 que refleja una menor industrialización y menor densidad demográfica. En el caso de los residuos, la solución utilizada es de pH 4,20.

En vez del lixiviado del botadero que simula la mezcla del ácido acético, los ácidos nítrico y sulfúrico se utilizan en un esfuerzo de simular la lluvia ácida que resulta de los óxidos nítricos y sulfúricos aerotransportados.

El procedimiento SPLP es útil en aquellas situaciones donde debe hacerse una determinación para estudiar si un material potencialmente contaminado, dejado in situ, lixivia sustancias tóxicas cuando está expuesto al desgaste por la acción atmosférica normal.



Esto es lo que ocurre en los residuos mineros, los cuales tienen características homogéneas, y específicamente los relaves, que consisten básicamente en material mineral molido finamente suspendido en una fase acuosa con restos de reactivos de flotación y, por lo tanto, las condiciones de disposición son distintas de aquellos residuos depositados en presencia de materia orgánica. Como consecuencia, es imposible que las condiciones de lixiviación de metales sean las mismas.

## CAPÍTULO V CARACTERIZACIÓN DE LOS RELAVES

### 1. MUESTRA

Para la caracterización de los relaves, se dispuso de una muestra entregada por cada una de las compañías participantes. Esta muestra corresponde a una fracción fresca de relave, aquél que está recién depositado en el tranque, o tomado justo en la salida. Esta muestra es mezclada y homogenizada, para luego dividirla en 4 cuartos:

1	2
3	4

De estos se desechan 1 y 4, 2 y 3 son mezclados nuevamente. Se repite el proceso, se divide en 4, y se separan las muestras en 1, 2, 3 y 4

Debe considerarse que la toma de muestra es realizada por el muestreador de la planta bajo el protocolo propio de la compañía minera para este efecto, por lo tanto aquí se tiene un posible problema de heterogeneidad de la muestra al ser tomada, por lo cual es homogenizada antes de ser enviada para su análisis, tratando así de hacerla lo más representativa posible.

Por otra parte, puede pensarse que las muestras no son comparables entre sí, puesto que no se conoce si fueron tomadas bajo las mismas condiciones, pero en este punto se considera, basándose en las indicaciones de quienes tomaron las muestras, que son tomadas bajo parámetros y protocolos standard, según referencia de ASTM.

## 2. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

La caracterización química fué realizada mediante ICP, para 34 elementos, previa disolución de 2,5 gr de muestra con ácidos HNO<sub>3</sub> y HCl, por el Centro de Investigación Minero y Metalúrgica, en su área de Tecnología y Servicios, CIMM T&S. Los resultados se presentan en la tabla 7.

En general, se observa para todas las muestras, un alto contenido de Aluminio, Calcio, Cobre, Potasio, y principalmente Hierro, y Magnesio, lo cual es atribuible al hecho de que estos elementos son constituyentes principales de los minerales, pero el problema radica en que en los relaves las partículas tienen un tamaño de aproximadamente 200 mallas, lo que hace que los minerales estén más expuestos a la acción y degradación medioambiental.

Específicamente en el caso del cobre, en todas las compañías, excepto Pelambres, los valores se encuentran entre 1000 y 3000 ppm (expresado en gr/ton), lo que representa una pérdida de 1 a 3 kilos de Cobre por tonelada de relave generado.

**Tabla 7: Resultados Caracterización Química a Muestras de Relaves**

	EL TENIENTE ppm		ANDINA ppm		EL SOLDADO ppm	
Ag	<0.5	<0.5	1,9	1,9	1,7	1,7
Al	25800	25600	14000	12100	23400	23000
As	96	102	25	24	<5	<5
Ba	64	60	114	105	19	22
Be	<0.5	<0.5	0,7	1,0	1,1	1,2
Bi	<15	<15	<15	<15	<15	<15
Ca	20000	23500	1700	1800	60300	61100
Cd	<0.2	<0.2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
Co	14	14	8	9	14	14
Cr	58	51	87	82	34	33
Cu	1078	1016	2259	2199	2379	2422
Fe	55300	54200	48500	47000	47000	46500
Hg	<5	<5	<5	<5	<5	<5
K	5700	5700	5600	5100	700	600
La	9	9	4	3	5	4
Li	<0.15	<0.15	<15	<15	<15	<15
Mg	21200	20400	7000	6800	18900	19500
Mn	315	300	496	488	2450	2560
Mo	48	42	164	167	5	6
Na	1000	1000	200	200	500	600
Nb	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Ni	28	22	9	9	5	6
Pb	41	41	28	28	17	18
Sb	7	6	<5	<5	<5	<5
Sc	6	6	1	1	12	11
Se	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Sn	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Sr	89	91	5	4	15	14
Ti	400	400	<100	<100	1900	1900
V	97	92	42	38	105	108
W	14	11	<10	<10	<10	<10
Y	2	2	<1	<1	6	7
Zn	52	50	120	118	88	86
Zr	<0.5	<0.5	<0,5	<0,5	10	11

	CHUQUICAMATA ppm		PELAMBRES ppm		COLLAHUASI ppm		EL SALVADOR ppm	
Ag	3.2	2.9	<0.5	<0.5	1.0	0.9	0.8	1.0
Al	5700	6100	12900	12800	19600	19300	25500	24900
As	102	103	10	11	13	15	60	57
Ba	59	50	79	77	173	168	110	102
Be	<0.5	<0.5	1.7	2.0	<0.5	<0.5	1.5	1.9
Bi	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15
Ca	1600	1500	<100	<100	400	400	25800	25500
Cd	2.2	1.9	<0.2	<0.2	5.2	5.1	4.4	5.0
Co	<1	<1	7	7	3	4	6	7
Cr	79	84	14	16	71	67	40	40
Cu	3100	3000	412	382	3800	3760	1316	1305
Fe	17200	17100	14800	13800	20900	20600	34500	34800
Hg	<6	<6	<5	<5	<5	<5	<5	<5
K	2800	3000	5400	5500	4300	4000	7100	6900
La	12	12	18	18	31	28	33	34
Li	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15
Mg	600	600	10800	10300	2100	2000	13800	13600
Mn	182	181	104	100	74	71	153	151
Mo	160	164	23	20	57	53	1925	2020
Na	400	400	200	300	<100	<100	1100	1200
Nb	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Ni	<1	<1	6	8	9.4	9.4	2	3
Pb	21	22	22	20	53	51	22	23
Sb	6	8	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Sc	<1	<1	4	4	3	3	6	7
Se	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Sn	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Sr	57	65	83	79	90	86	142	140
Ti	<100	<100	<100	<100	<100	<100	500	600
V	<1	<2	58	55	22	20	60	55
W	23	26	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Y	<1	<1	5	5	12	12	6	7
Zn	374	372	14	12	80	75	60	63
Zr	1	1	1	1	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5

### 3. LIXIVIACIÓN

#### 3.1. TEST TCLP

El test TCLP<sup>1</sup> (Toxicity Characteristic Leaching Procedure: Procedimiento de Lixiviación para la Característica de Toxicidad) o método 1311 de la EPA, está diseñado para determinar la toxicidad por lixiviación de un residuo, sea éste líquido, sólido o una mezcla de estas fases, a partir de un análisis practicado a una muestra del lixiviado o extracto del mismo obtenido bajo ciertas condiciones estándares. En definitiva, el procedimiento pretende simular la lixiviación a la que podría estar expuesto un residuo que se dispone en un botadero, mediante la determinación de la movilidad en el residuo de determinados constituyentes tóxicos, sean éstos elementos o compuestos químicos, orgánicos o inorgánicos. El procedimiento consiste básicamente en la lixiviación de la muestra con una solución apropiada de ácido acético, por aproximadamente 18 horas, a temperatura y aplicación controladas.

El extracto líquido obtenido después de la lixiviación es analizado para determinar si presenta cualquiera de los elementos considerados como peligrosos, en concentraciones superiores a los valores establecidos por la EPA.

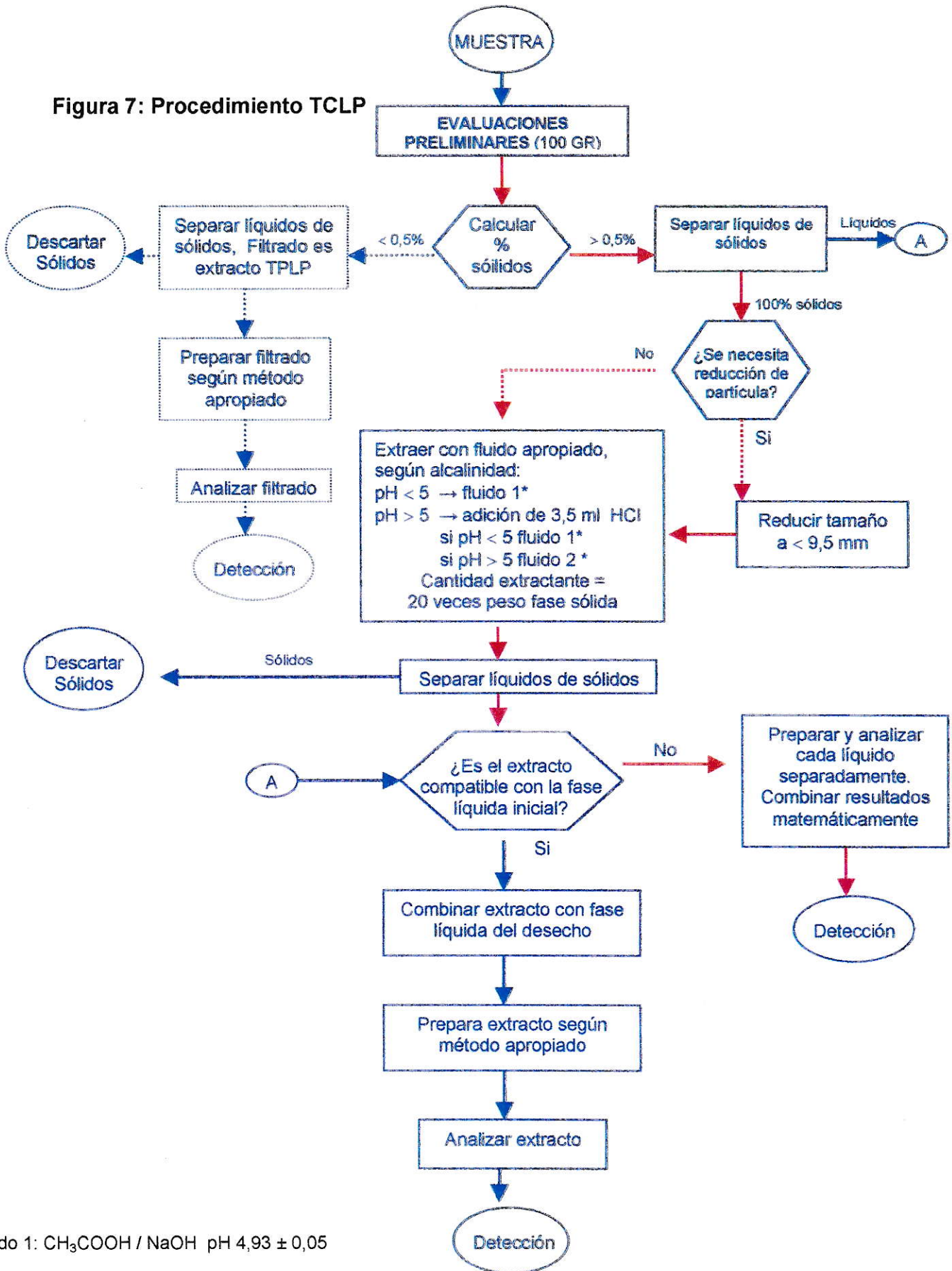
Los elementos **inorgánicos** que se regulan son: As, Ba, Cd, Pb, Hg, Se y Ag

En la figura 7 se presenta un diagrama del método, donde las flechas rojas representan el protocolo seguido para el caso de las muestras de relaves.

---

<sup>1</sup> Anexo 5

Figura 7: Procedimiento TCLP



Fluido 1: CH<sub>3</sub>COOH / NaOH pH 4,93 ± 0,05

Fluido 2: CH<sub>3</sub>COOH pH 2,88 ± 0,05

### 3.2. TEST SPLP:

El método 1312<sup>2</sup> de la EPA denominado "Synthetic Precipitation Leaching Procedure" SPLP, fué diseñado para determinar la movilidad de analitos orgánicos e inorgánicos presentes en sólidos, líquidos y residuos. Actualmente, se utiliza principalmente para evaluar la movilidad de elementos metálicos presentes en un residuo que se va a disponer en un botadero. El método consiste básicamente en una lixiviación a temperatura y agitación controlada por 18 horas con un líquido extractante conformado por una solución de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y HNO<sub>3</sub>.

El extracto líquido obtenido después de lixiviación es analizado para determinar la presencia de cualquiera de los elementos considerados como tóxicos en concentraciones superiores a los valores establecidos por la EPA. Los elementos inorgánicos que se regulan son: As, Ba, Cd, Pb, Hg, Se y Ag. En la figura 8 se presenta el protocolo para el procedimiento.

Para ambos test se realizó además el análisis de Mo, Fe y Mn. Los resultados obtenidos de la evaluación de la toxicidad de las muestras, a través del Test TCLP y test 1312 se presentan en la tabla 8.

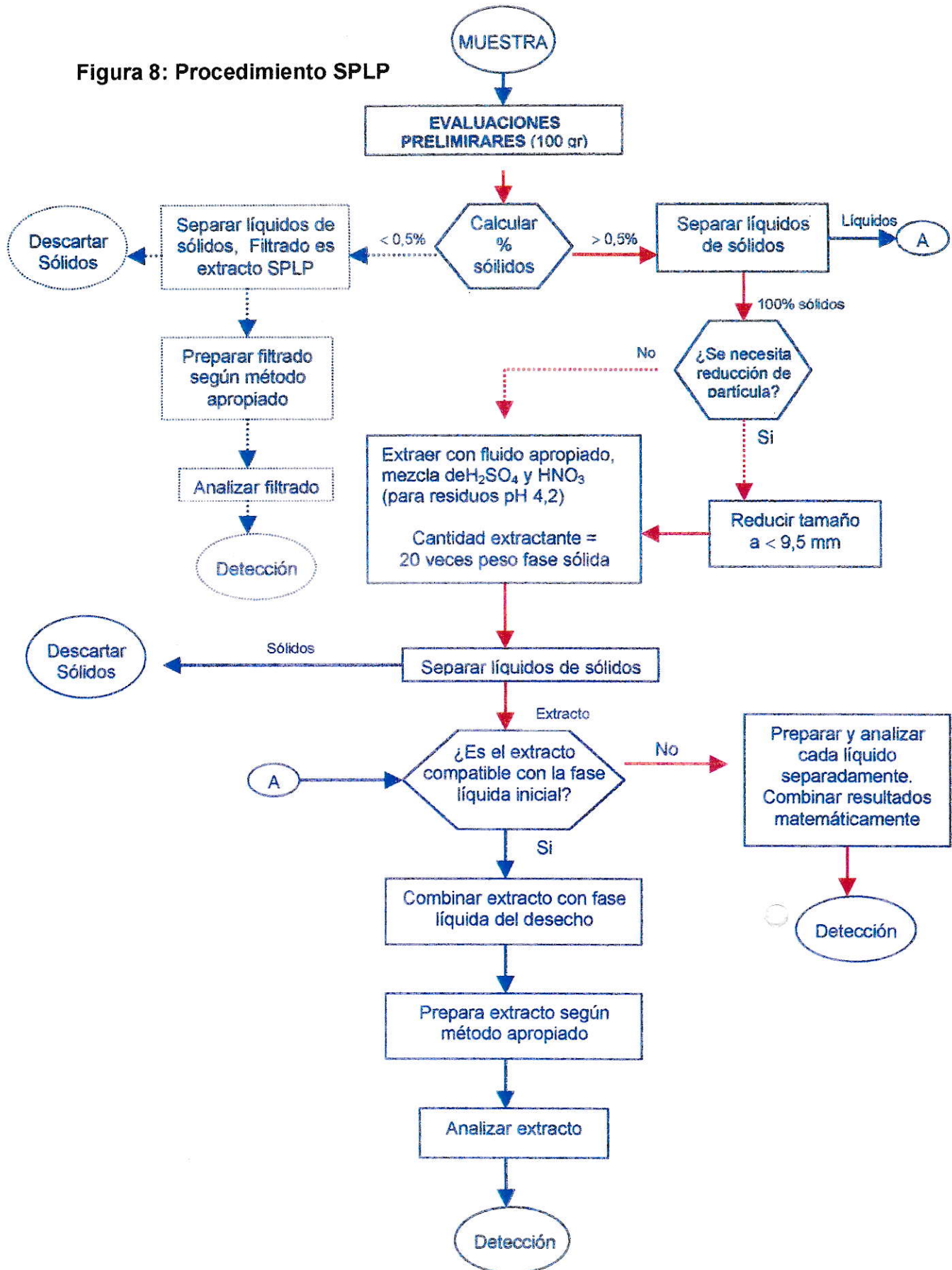
De acuerdo a la tabla, y a los valores que se tienen para la norma, todas las compañías mineras participantes estarían cumpliendo con la legislación, pero puede observarse que los valores para Hierro son bastante altos, aunque no se tiene un parámetro legal de comparación para establecer si son o no son considerados peligrosos.

---

<sup>2</sup> Anexo 6



Figura 8: Procedimiento SPLP



**Tabla 8: Resultados Aplicación de test TCLP y SPLP a muestras de Relaves**  
Valores en mg/L

	EL TENIENTE		EL SOLDADO		CHUQUICAMATA		ANDINA	
	TCLP	SPLP	TCLP	SPLP	TCLP	SPLP	TCLP	SPLP
As	0,075	4,7	<0.005	2	0.005	3.3	<0.005	0.11
Ba	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Cd	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.02
Cr	<0.05	0,06	<0.05	0.27	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Hg	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Pb	<0.05	0,08	<0.05	<0.05	0.11	0.53	<0.05	<0.05
Ag	<0.02	0.04	<0.02	<0.02	<0.02	0.03	<0.02	<0.02
Se	<0.005	0.029	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005

Mn	1.3	1.3	8.1	20	2	4	<0.1	3.6
Fe	2,8	112	<0.1	189	19	134	<0.05	0.51
Mo	<0.01	0,92	<0.01	0,06	<0.01	1.2	0.01	0.02

	LOS PELAMBRES		COLLAHUASI		EL SALVADOR		VALOR NORMA
	TCLP	SPLP	TCLP	SPLP	TCLP	SPLP	
As	<0.005	0.025	<0.005	0.007	<0.005	0.013	5
Ba	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	100
Cd	<0.01	<0.01	0.07	<0.01	<0.01	<0.01	1
Cr	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	5
Hg	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.2
Pb	<0.05	0.13	<0.05	<0.05	<0.05	0.05	5
Ag	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	5
Se	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	1

Mn	2.1	86	0.24	<0.05	1,4	<0,05	No Normado
Fe	0.10	0.42	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
Mo	<0.01	0.4	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	

### 3.3. TEST ABA

El test estático para medir el potencial de generación ácida, denominado **Acid Base Account (ABA)**<sup>3</sup>, se basa en un balance entre los componentes de la muestra potencialmente generadores de ácido (Potencial de Acidificación, PA) y los componentes neutralizadores de ácidos (Potencial de Neutralización, PN). En la Figura 9 se presenta un resumen del procedimiento.

La determinación del Potencial de Acidificación se realiza principalmente sobre la base del análisis químico de la muestra por cantidad de azufre total y azufre como sulfato. De esta manera, se calcula por diferencia el azufre como sulfuro, que sirve de base para el cálculo del PA.

El Potencial de Neutralización representa la cantidad total de minerales neutralizantes presentes en el material, principalmente carbonatos. Se determina mediante una digestión ácida de una porción de una muestra durante 24 horas, a temperatura controlada y posteriormente se realiza la titulación.

Obtenidos así ambos potenciales, se determina por diferencia el Potencial Neto de Neutralización, de acuerdo con:

$$\text{PNN} = \text{PN} - \text{PA}$$

Con lo cual se puede categorizar los materiales en tres grupos:

- **Bajo o Nulo Potencial de generación de Acido:** Si el valor del PNN es mayor que 20 kg./t y la relación PN/PA es mayor que 3.
- **Potencial marginal de generación de ácido:** Si el valor del PNN es menor que 20 kg./t y la relación entre PN/PA se encuentra entre 1 y 3.
- **Alto Potencial de Generación de Acido:** Si el valor del PNN es negativo y la relación PN/PA es menor que 1.

---

<sup>3</sup> Anexo 7, Procedimiento ABA

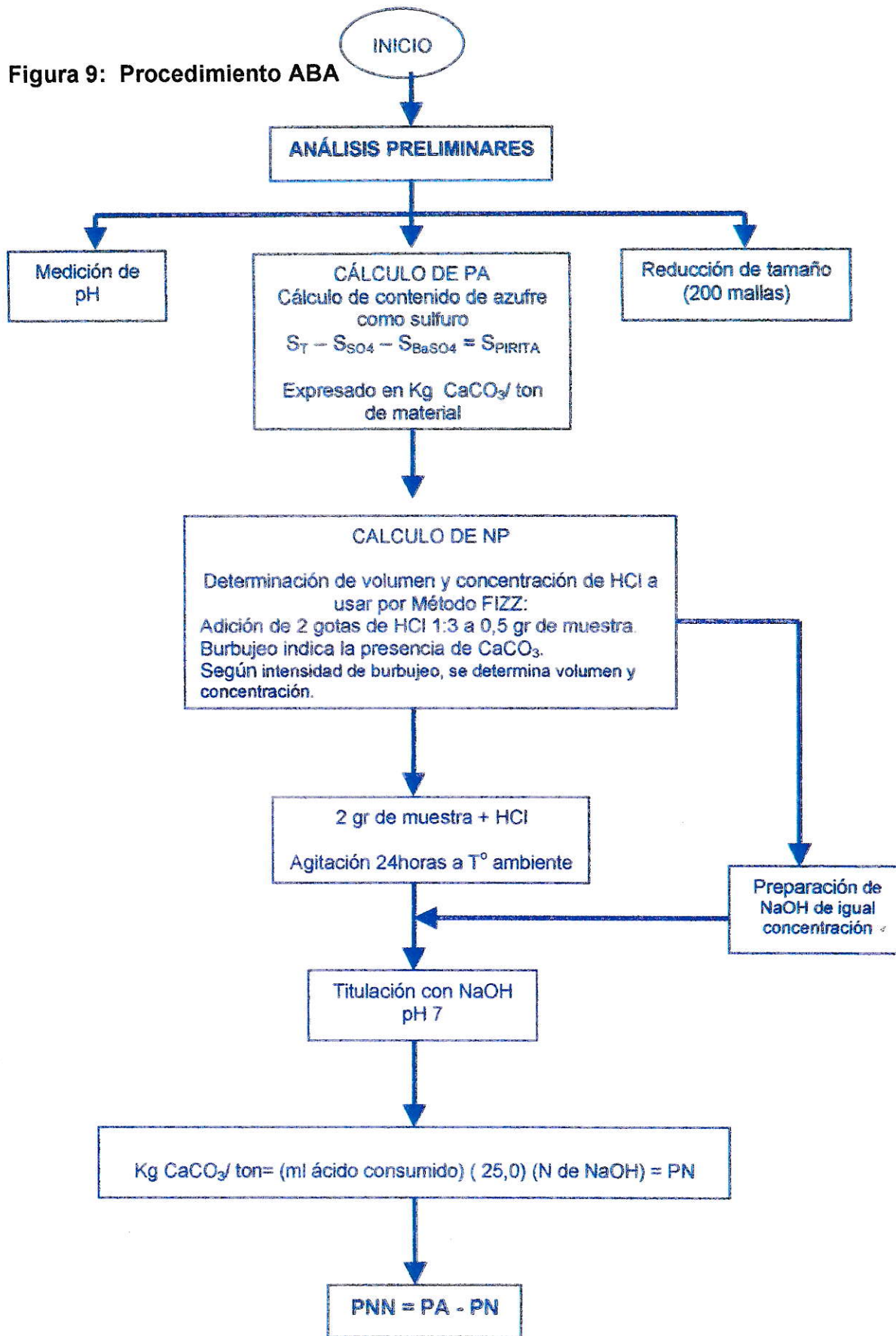
Este test puede ser usado como un método de predicción cualitativo, que sólo indica se existe o no un potencial de generación de ácido para las muestras estudiadas.

Los resultados obtenidos de la evaluación del potencial de generación ácida de las muestras se presentan en la tabla 9.

De acuerdo a la tabla, y a los criterios de interpretación, se tiene:

- Andina, Chuquicamata, Teniente, Collahuasi y El Salvador son generadoras de Acido, debido a su alto potencial de generación de ácido.
- El Soldado tiene un potencial nulo de generación de ácido.
- Pelambres presenta un potencial marginal de generación de ácido.

Figura 9: Procedimiento ABA



**Tabla 9: Resultados Aplicación de Test ABA a muestras de Relaves**

IDENTIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS	S	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	S <sub>SO4</sub>	Kg CaCO <sub>3</sub> equiv/t de material			PN/PA
	%	%	%	PN	PA	PNN	
ANDINA	0.38	0.02	0.07	4.56	11.14	-6.59	0.41
SOLDADO	0.23	0.02	0.07	42.24	6.46	35.78	6.54
CHUQUICAMATA	1.18	0.06	0.18	1.24	35.0	-33.76	0.04
TENIENTE	0.75	0.04	0.13	13.66	22.08	-8.42	0.62
PELAMBRES	0.22	0.04	0.01	6.48	6.46	0.02	1.0
COLLAHUASI	1.03	0.12	0.04	4.16	30.94	-26.77	0.13
SALVADOR	2.97	2.03	0.68	15.26	43.52	-28.26	0.35

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES

1. Existía un desconocimiento por parte de las compañías mineras en cuanto al significado de la legislación que regulará el manejo y disposición de los residuos, y principalmente en cuanto a los alcances de los test especificados. Esto generó un temor a la entrega de información y de muestras, y a la probable publicación de los resultados. Las compañías mineras se presentaban negativas frente a la posibilidad de un “estudio externo” que revisara la situación de sus relaves y determinara incumplimiento frente a la nueva legislación, lo cual dificultó aún más la entrega de información.
2. Una vez conocidos los resultados de los análisis EPA1311 (TCLP) y EPA 1312 (SPLP), se determinó que todas las compañías mineras participantes de este estudio se encontraban cumpliendo con las exigencias de la nueva legislación, con lo que perdieron el temor frente a la futura aplicación de la ley. Con esto además todas ellas accedieron a la publicación de los resultados.
3. Las empresas mineras se familiarizaron con los test que exige la nueva legislación y con los laboratorios que los realizan; y principalmente con los resultados que se obtienen.
4. Se encontró que la legislación ambiental vigente (Decreto Supremo 594) presenta muchas deficiencias, entre ellas, que no se regula claramente todo lo que a residuos peligrosos se refiere, ni especifica cómo determinar la característica de peligrosidad de un residuo. Y si bien especifica las sustancias que serán consideradas como peligrosas, no especifica la concentración ni los valores máximos permisibles que definen esta característica, ni los métodos analíticos para determinarla.

5. La nueva legislación (Reglamento sobre Manejo Sanitario de Residuos Peligrosos) presenta mejoras considerables en comparación con la legislación vigente, donde se considera, por primera vez, métodos analíticos y especificaciones para definir la peligrosidad de un residuo.
6. Si bien el Reglamento de Manejo Sanitario de Residuos Peligrosos representa un gran avance en cuanto a la regulación de los residuos, existen puntos que aún quedan pendientes, como el hecho de que no se considere la emisión de polvo al aire desde los relaves depositados. Esto es, sin duda, un punto importante en zonas que presentan serios problemas de contaminación atmosférica o falta de precipitaciones, como las cercanías a Santiago, donde se encuentran los tranques de depositación de relaves de la División Andina de Codelco Chile (Tranque Huechún), y de la Planta El Soldado de la compañía minera Disputada de Las Condes (Planta Las Tórtolas). O en aquellos lugares áridos, como ocurre en la zona norte del país donde el levantamiento de polvo debido a la acción del viento es considerable.
7. Otra deficiencia de la legislación propuesta es que considera solamente 8 elementos inorgánicos, quedando fuera de regulación otros como Fe, Mn, y Mo, que también son potenciales contaminantes.
8. Es interesante analizar además los niveles de producción de relaves, donde se estima que se produjeron sólo en 1999 300 MMt, cifra que en el 2000 se estima en 320 MMt y aumentará año tras año. Esto permite hacer una estimación de la gran cantidad de relaves que se han depositado a lo largo de la historia, como por ejemplo, sólo en Chuquicamata se han depositado 1,258 MMt (a partir de 1954) y en El Teniente 1,305 MMt (a partir de 1950). Es por esto que éste no es un tema que pueda dejar de tratarse al momento de discutir los conflictos ambientales generados por la explotación minera, en especial la alteración geográfica que conlleva la disposición de material, lo que no está regulado.



9. El principal conflicto que representan los relaves es la generación de ácido sulfúrico producto de la oxidación de los minerales sulfurados remanentes de la flotación, lo que conlleva a la potencial disolución de iones como As, Fe, Mo, Mn, Cu, Co, Cr, etc. Éste punto es interesante ya que debiera considerarse al definir y diseñar los sitios de disposición, pretendiendo evitar desde un inicio la salida de las soluciones resultantes del enclave de los relaves.
  
10. La lixiviación de metales desde residuos depositados en acopios es un tema que en países como Estados Unidos y Canadá ha sido estudiado desde hace 2 o 3 décadas, mientras que en Chile es un tema que recién toma importancia, gracias al nuevo proyecto de Reglamento de Manejo y Disposición de Residuos Peligrosos, donde es la primera vez que se regula con claridad este tema, indicando además los métodos analíticos para determinar la condición de toxicidad por lixiviación, donde se define que para el caso de los residuos mineros, debe aplicarse el test SPLP de la US-EPA, en vez del TCLP, tomando así en cuenta las deficiencias de éste último en su aplicación a residuos mineros.
  
11. En los relaves depositados, evitar la generación de ácido es esencial. Para ello se debe buscar la manera de evitar el ingreso de agua y oxígeno a los relaves, que son los agentes claves en la oxidación de los minerales sulfurados. Las formas de resolver este potencial drenaje de ácido es aumentar la reserva alcalina, bajar la permeabilidad de los relaves, o tratar los efluentes ácidos, por ejemplo, con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . El problema es que éste es un tema difícil de abordar debido a que los volúmenes de residuos generados son muy grandes, y por lo tanto, su manejo requiere de grandes inversiones, para lo cual se hace indispensable una mayor cantidad de estudios que permitan establecer cuáles métodos son los apropiados a las condiciones geológicas de Chile.

12. En cuanto a los métodos para determinar la lixiviación de metales, el TCLP fue desarrollado para representar la interacción entre el residuo potencialmente peligroso y el medio ambiente generada en un sitio de disposición de residuos municipales. Desde esa perspectiva, el concepto se adaptó a la evaluación de la lixiviación de contaminantes desde residuos depositados en acopios, como es el caso de los residuos mineros, donde la aplicación del test se hace inapropiada ya que la lixiviación de metales en un relleno sanitario es normalmente más rigurosa que la que ocurre en residuos que no contienen materia orgánica y por lo tanto, no representa las mismas condiciones.
  
13. En el caso del SPLP, éste resuelve sustancialmente las deficiencias presentadas por el TCLP, ya que el fluido de extracción en el SPLP fue desarrollado para simular las condiciones que tendría la precipitación sujeta a la acción atmosférica normal, con lo que se logra una mayor concordancia con lo que ocurriría en condiciones de materiales expuestos al desgaste por acción ambiental.
  
14. En cuanto a los valores obtenidos en los test de lixiviación que se presentan en la tabla siguiente (tabla 8), se observa que si bien las muestras de todas las compañías mineras presentaron resultados que están dentro de los valores permitidos por la legislación, al comparar los resultados de ambos test se tiene que en la mayoría de los casos éstos son mayores para el caso del SPLP, lo que confirma los errores que conlleva la aplicación del TCLP, ya que estaría subestimando la emisión de metales por lixiviación. Por lo tanto, la selección del SPLP en lugar del TCLP para la determinación de la toxicidad por lixiviación en residuos mineros es correcta.

**Tabla 8: Resultados Aplicación de test TCLP y SPLP a muestras de Relaves**

Valores en mg/L

	EL TENIENTE		EL SOLDADO		CHUQUICAMATA		ANDINA	
	TCLP	SPLP	TCLP	SPLP	TCLP	SPLP	TCLP	SPLP
<b>As</b>	0,075	4,7	<0.005	2	0.005	3.3	<0.005	0.11
<b>Ba</b>	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
<b>Cd</b>	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.02
<b>Cr</b>	<0.05	0,06	<0.05	0.27	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
<b>Hg</b>	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
<b>Pb</b>	<0.05	0,08	<0.05	<0.05	0.11	0.53	<0.05	<0.05
<b>Ag</b>	<0.02	0.04	<0.02	<0.02	<0.02	0.03	<0.02	<0.02
<b>Se</b>	<0.005	0.029	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005

<b>Mn</b>	1.3	1.3	8.1	20	2	4	<0.1	3.6
<b>Fe</b>	2,8	112	<0.1	189	19	134	<0.05	0.51
<b>Mo</b>	<0.01	0,92	<0.01	0,06	<0.01	1.2	0.01	0.02

	LOS PELAMBRES		COLLAHUASI		EL SALVADOR		VALOR NORMA
	TCLP	SPLP	TCLP	SPLP	TCLP	SPLP	
<b>As</b>	<0.005	0.025	<0.005	0.007	<0.005	0.013	<b>5</b>
<b>Ba</b>	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<b>100</b>
<b>Cd</b>	<0.01	<0.01	0.07	<0.01	<0.01	<0.01	<b>1</b>
<b>Cr</b>	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<b>5</b>
<b>Hg</b>	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<b>0.2</b>
<b>Pb</b>	<0.05	0.13	<0.05	<0.05	<0.05	0.05	<b>5</b>
<b>Ag</b>	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<b>5</b>
<b>Se</b>	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<b>1</b>
<b>Mn</b>	2.1	86	0.24	<0.05	1,4	<0,05	<b>No Normado</b>
<b>Fe</b>	0.10	0.42	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
<b>Mo</b>	<0.01	0.4	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	

15. En los resultados del test de lixiviación SPLP existe un conflicto especial en cuanto a que aquellos elementos no normados por la nueva legislación, como hierro, manganeso y molibdeno, los cuales presentan, en algunos casos, valores muy altos, sobre 100 mg/L como ocurre con el Hierro en Chuquicamata, El Soldado, y El Teniente. El problema es que estos elementos, al no estar normados, no se consideran al analizar el potencial contaminante de un residuo.

Si se comparan estos valores con los que se especifican en el Decreto 90, que se refiere a las Normas de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales, se obtiene que el valor mínimo para considerar que un establecimiento es emisor para el caso del hierro es 1 mg/ L, y por lo tanto, se estaría frente a una emisión contaminante de hierro en los tres casos anteriormente mencionados.

En el caso del Mn, el valor mínimo es de 0,3 mg/L, y según los resultados de todas las compañías mineras, sólo Collahuasi no sobrepasa este valor, por lo tanto, en todas los otros casos estaríamos frente a emisión de Mn. En cuanto al Mo, sólo el Teniente, Chuquicamata y Los Pelambres sobrepasan el valor de 0,07 mg/L con lo cual se presentarían como fuentes emisoras para el Mo, lo que no estaría considerado en la legislación propuesta, por lo que se hace necesario una mayor cantidad de estudios en este tema.

16. En cuanto al Potencial de generación de acidez definido mediante el procedimiento ABA, y en base a los resultados que se presentan en la tabla 9; se obtiene que Andina, Chuquicamata, El Teniente, Collahuasi y El Salvador presentan un potencial alto, mientras que Los Pelambres presenta un potencial marginal y El Soldado, no presenta generación de ácido.

**Tabla 9: Resultados Aplicación de Test ABA a muestras de Relaves**

IDENTIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS	S	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	S <sub>SO4</sub>	Kg CaCO <sub>3</sub> equiv/t de material			PN/PA
	%	%	%	PN	PA	PNN	
ANDINA	0.38	0.02	0.07	4.56	11.14	-6.59	0.41
SOLDADO	0.23	0.02	0.07	42.24	6.46	35.78	6.54
CHUQUICAMATA	1.18	0.06	0.18	1.24	35.0	-33.76	0.04
TENIENTE	0.75	0.04	0.13	13.66	22.08	-8.42	0.62
PELAMBRES	0.22	0.04	0.01	6.48	6.46	0.02	1.0
COLLAHUASI	1.03	0.12	0.04	4.16	30.94	-26.77	0.13
SALVADOR	2.97	2.03	0.68	15.26	43.52	-28.26	0.35

Esto podría atribuirse al tipo de minerales del cual fueron producidos y a sus procesos de concentración, ya que en algunas mineras adicionan cal durante la flotación, lo que aumentaría la reserva alcalina. Por ejemplo, puede decirse que El Soldado no produce ácido gracias a su alto contenido de carbonatos y otros minerales consumidores de ácido, potencial de neutralización PN alto, ya que en cuanto a su potencial de acidez PA, es similar al de Pelambres y éste último, al tener menos carbonatos, presenta un potencial marginal. Si se observan los valores del potencial neto de neutralización PNN, se tiene que las diferencias dentro de los que presentan alto potencial de generación de ácido son bastante altas, por ejemplo entre Collahuasi (-26,77 kg CaCO<sub>3</sub> equiv/ton) y Andina (-6,59 kg CaCO<sub>3</sub> equiv/ton) la diferencia indicaría que en el caso de Collahuasi la cantidad de minerales sulfurados susceptibles a la oxidación es mucho mayor, aún teniendo el mismo potencial de neutralización (~4 kg CaCO<sub>3</sub> equiv/ton).

## BIBLIOGRAFÍA

- BEAK International Incorporated (Prepared by). STANDARD ACID ROCK DRAINAGE (ARD) TESTING PROCEDURES FOR ASSESSMENT OF METAL LEACHING AT MINNESITES. Prepared for Billiton I.S. Ontario, Canada. January 29, 2001.
- Coudurier, L y Wilkomirsky. 1971. FUNDAMENTOS DE LOS PROCESOS METALÚRGICOS. Serie de Metalurgia Extractiva, Universidad de Concepción.
- Ediciones Editec Ltda. "COMPENDIO DE LA MINERÍA CHILENA 2000" Revista Minería Chilena.
- Janssen, L.P.B.M., J. Prins, A.C. Hoffman, R.J. De Meijer, and A.W.L. Veen, MODELING THE MIGRATION OF CONTAMINANTS IN SOIL, Chem. Engr. Communications 89: 37-47 (1990)
- Muller,G; Dorey,R & Willow,M. MANAGEMENT OF RESIDUAL PYRITE IN TAILINGS. Tailings and Mine Waste '98. *Proceedings of the Fifth International Conference on Tailings and Mine Waste*. Fort Collins, Colorado, USA, 26-28 January 1998.
- República De Chile. DECRETO 1172-9, Ministerio De Obras Publicas, Santiago, 5 de diciembre de 1997: Modifica El Decreto N°351, 1992,
- República De Chile. DECRETO 351, MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS; Santiago, 26 Noviembre 1992.: Aprueba Reglamento Para Neutralización Y Depuración De Los Residuos Líquidos Industriales.
- República De Chile. DECRETO 594, Ministerio De Salud, Santiago, 29 abril 2000: Aprueba Reglamento sobre las condiciones Sanitarias y Ambientales Básicas en los Lugares de Trabajo.
- República De Chile. DECRETO 745, Ministerio De Salud, Santiago, 8 de junio 1993: Sobre las condiciones Sanitarias y Ambientales Básicas en los Lugares de Trabajo.
- República de Chile. DECRETO N° 90, Santiago, 30 de mayo de 2000. Establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales.

República De Chile; PROYECTO: REGLAMENTO SOBRE MANEJO SANITARIO DE RESIDUOS PELIGROSOS. Documento en consulta, Noviembre 1999. Ministerio De Salud; División Salud Ambiental; Depto. Programas Sobre El Ambiente.

Santos, E.M.R; Pereira, G.S.P. EVALUATION OF POTENTIAL AMD GENERATION FROM A DEPOSIT OF COOPER ORE USING STATIC TESTS. *SME Annual Meeting, March 1-3, 1993, Denver, Colorado, USA*  
School of Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY 12180

Scharer J.M., Bolduc L., Petit C.M. LIMITATIONS OF ACID-BASE ACCOUNTING FOR PREDICTING ACID ROCK DRAINAGE. Proceedings from the Fifth International Conference on Acid Rock Drainage. ICARD 2000. Published by the Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc.

SME, MINERAL PROCESSING HANDBOOK. Society of Mining Engineers of AIME, American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Inc. Norman L.Weiss, Editor-in-Chief. New York. 1985.

U.S. Environmental Protection Agency, Environmental Engineering Committee. WASTE LEACHABILITY: The need for a Review of Current Agency Procedures. February 1999.  
Report EPA-SAB-EEC-COM-99-002-

U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste. ACID MINE DRAINAGE PREDICTION, Technical Document. December 1994.  
Report EPA 530-R-94-036.

U.S. Environmental Protection Agency, PUBLIC MEETING ON WASTE LEACHING. EPA Leaching Meetings Proceedings. July 1999

van der Sloot, H.A.; Heasman, L.; Quevauviller, Ph; HARMONIZATION OF LEACHING/EXTRACTION TESTS , 1997. *Studies in Environmental Science*, Volume 70. Eds; Elsevier Science; Amsterdam; 292 pp

## SITIOS WEB

<http://www.epa.gov/epaoswer/hazwaste/test/1311.pdf> "Toxicity Characteristic Leaching Procedure"

<http://www.epa.gov/epaoswer/hazwaste/test/1312.pdf> "Synthetic Precipitation Leaching Procedure"

<http://www.leaching.net> "Leaching European Network for Harmonization of Leaching/Extraction Test" Netherlands Energy Research Foundation ECN, P.O. Box 1, 1755 ZG Petten, The Netherlands.

<http://www.phaseonline.com> "Environmental Laboratories for Soil and Water Testing"

[http://hna.ffh.vic.gov.au/phb/hprot/env\\_hlth/tailings](http://hna.ffh.vic.gov.au/phb/hprot/env_hlth/tailings) "Arsenic in Mine Tailings, Questions and Answers" Public Health Division, Department of Human Services, Melbourne, Australia.