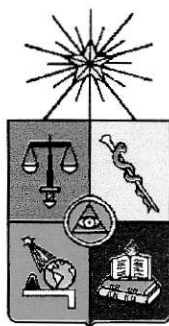


ZUCH-FC
Q. Ambiental
M491
C.1

**PROPUESTA PARA EL MANEJO DE LODOS PRODUCIDOS
EN LAS PISCINAS DE DECANTACIÓN DE RILES DE LA
FUNDICIÓN Y REFINERÍA VENTANAS**



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



Pablo Medina Alvarez

Director Seminario de Título: Sr. Alejandro Diez Valencia
Profesor Patrocinante: M.Sc. Sylvia Copaja Castillo

Enero 2002



A Mi Madre....

Agradecimientos

Quiero agradecer a Hugo Balocchi por la oportunidad que me dio de realizar éste trabajo en la ENAMI y por sus consejos, a Alejandro Diez por su ayuda, apoyo, paciencia y orientación dada, a Sylvia Copaja por su ayuda, dedicación y tiempo. Además quiero agradecer a todas las personas que me ayudaron en la Planta Vallenar y permitieron que mi estadía fuese agradable, en especial a Abel Rodríguez, Fermir Toro y Luis Guzmán.

No puedo dejar de agradecer a mi familia por el apoyo dado en el desarrollo de éste trabajo, a mi papá, a mis abuelos Luis y Carla, a mis tíos y tías, y a mi hermano.

Finalmente quiero agradecer a mi polola por su comprensión y apoyo, y a mis amigas Bernardita Araya, Cecilia Toro y Carla Calderón por su ayuda.



Indice de Materias



	Páginas
Capítulo I: Antecedentes Generales	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Metodología de Trabajo	4
1.4 Antecedentes de la ENAMI	5
1.5 Ubicación de la Fundición y Refinería Ventanas	8
Capítulo II: Residuos Sólidos: Antecedentes Generales	9
2.1 Definiciones	9
2.2 Identificación y Clasificación de un Residuo Sólido Peligroso	11
2.3 Exclusiones	11
2.4 Fuentes de Residuos Sólidos Peligrosos	12
2.5 Efectos de los Residuos Sólidos Peligrosos	13
2.6 Etapas de Manejo de Residuos Sólidos Peligrosos	15
Capítulo III: Descripción de Procesos	26
3.1 Descripción del Proceso de la Fundición y Refinería Ventanas	26
3.2 Descripción del Funcionamiento de las Piscinas de Decantación de Riles de la Fundición y Refinería Ventanas	37
3.3 Fuentes Generadoras de los Lodos	38
Capítulo IV: Legislación sobre Residuos Industriales Sólidos Peligrosos	39
4.1 Marco Jurídico General	39
Capítulo V: Caracterización Química y Física de los Lodos	46
5.1 Plan de Muestreo	46
5.2 Muestreo	49
5.3 Resultados	54



5.4 Análisis y Discusión de Resultados 59

Capítulo VI: Determinación de la Peligrosidad del Lodo 62

- 6.1 Identificación del Lodo por Categoría (Listado 333 Residuos) 62
- 6.2 Determinación de Peligrosidad según Rubro Especifico 63
- 6.3 Determinación de la Peligrosidad según Categorías del Reglamento 64
- 6.4 Clasificación del Lodo según NCh382.Of98 y NCh2120/1.Of98 a la NCh2120/9.Of98 66
- 6.5 Determinación de las Características de Peligrosidad del Lodo 67

Capítulo VII: Manipulación de Lodos 69

- 7.1 Etapa de Secado 71
- 7.2 Etapa de Recolección y Transporte Interno 73
- 7.3 Acopio Temporal 78
- 7.4 Limpieza de Maquinarias 83
- 7.5 Equipo de Protección Personal 84
- 7.6 Incompatibilidades 85
- 7.7 Señalización 86
- 7.8 Hoja de Seguridad 92
- 7.9 Implementación Etapa de Secado y Recolección 97

Capítulo VIII: Alternativas de Tratamiento y/o Disposición Final de Lodos 100

- 8.1 Primera Alternativa: Lixiviación Ácida 101
- 8.2 Segunda Alternativa: Mezcla con Polvos P.E.P.A. 111
- 8.3 Tercera Alternativa: Estabilización/ Solidificación 112
- 8.4 Cuarta Alternativa: Hidronor 117

Capítulo IX: Estudio de Alternativa 118

- 9.1 Justificación de Alternativa 118
- 9.2 Metodología Propuesta 119
- 9.3 Caracterización Química 119
- 9.4 Diseño Experimental de una Lixiviación Ácida por Agitación 120
- 9.5 Parte Experimental 127

9.6 Experimentos	133
9.7 Resultados	143
9.8 Análisis y Discusión de Resultados	153
Conclusiones	173
Bibliografía	176
Anexo A: Cálculos Parte Experimental	179



Indice de Tablas



	Páginas
Tabla 1: Otras Normas	45
Tabla 2: Tiempo de Conservación previo al Análisis	48
Tabla 3: Calendario de Muestreo	49
Tabla 4: Resultados de Metales Piscina 1	54
Tabla 5: Resultados de Metales Piscina 2	55
Tabla 6: Resultados de Metales Piscina Secado	55
Tabla 7: Resultados Test TCLP	56
Tabla 8: Resultados de Metales Piscina Secado	57
Tabla 9: Parámetros Físico-Químicos	58
Tabla 10: Determinación Masa Lodo	58
Tabla 11: Concentraciones promedio Piscina 1 y Piscina 2	59
Tabla 12: Comparación resultados Piscina 1 y Piscina Secado	60
Tabla 13: Concentración de otros Metales Analizados	60
Tabla 14: Comparación Muestreo N°2 y N°3	61
Tabla 15: Identificación del Lodo por Categoría	62
Tabla 16: Lista de Residuos Generados según CIHU	63
Tabla 17: Determinación Peligrosidad según Rubro Específico	64
Tabla 18: Peligrosidad del Lodo Categoría I	64
Tabla 19: Peligrosidad del Lodo Categoría II	65
Tabla 20: Categoría II	65
Tabla 21: Clasificación del Lodo según NCh382.0f98 y NCh2120/1.0f98 a la NCh2120/9.0f98	66
Tabla 22: Toxicidad Extrínseca	67
Tabla 23: Tabla de Incompatibilidades	86
Tabla 24: Especificaciones para Etiqueta y Rotulo Clase 6.1	88
Tabla 25: Especificaciones y Rotulo Clase 9	89
Tabla 26: Caracterización Química Lodos y polvos P.E.P.A.	120
Tabla 27: Características Físicas Lodos	123
Tabla 28: Datos Determinación Masa Sólido/Masa Líquido	124
Tabla 29: Datos Determinación Masa Acido	126
Tabla 30: Datos Experimento 1	133
Tabla 31: Condiciones Experimento 1	133
Tabla 32: Datos Experimento 2	134
Tabla 33: Condiciones Experimento 2	134
Tabla 34: Datos Experimento 3	135

Tabla 35: Condiciones Experimento 3	135
Tabla 36: Condiciones Experimento 4	136
Tabla 37: Parámetros del Polvo P.E.P.A.	136
Tabla 38: Datos Experimento 5	137
Tabla 39: Condiciones Experimento 5	137
Tabla 40: Datos Experimento 6	138
Tabla 41: Condiciones Experimento 6	138
Tabla 42: Datos Experimentos 7	139
Tabla 43: Condiciones Experimento 7	139
Tabla 44: Datos Experimento 8	140
Tabla 45: Condiciones Experimento 8	140
Tabla 46: Condiciones Experimento 9	141
Tabla 47: Datos Experimento 10	141
Tabla 48: Condiciones Experimento 10	142
Tabla 49: % Recuperación de Cobre (Experimento 2)	143
Tabla 50: % Recuperación de Cobre (Experimento 3)	144
Tabla 51: Distribución de los Metales (Experimento 4)	145
Tabla 52: % Recuperación de Cobre (Experimento 5)	146
Tabla 53: % Recuperación de Cobre (Experimento 6)	147
Tabla 54: % Recuperación de Cobre (Experimento 7)	148
Tabla 55: % Recuperación de Cobre (Experimento 8)	149
Tabla 56: Distribución de los Metales (Experimento 9)	150
Tabla 57: Distribución de los Metales (Experimento 10)	151
Tabla 58: % Acido Consumido y Generado	152
Tabla 59: Diferencias Fino Entrada y Fino Balance en el Lodo	157
Tabla 60: Distribución de los Metales en el Sólido y en el Líquido para el Lodo	158
Tabla 61: % Recuperación Cobre en los Lodos	160
Tabla 62: Diferencias Fino Entrada y Fino Balance en el Polvo P.E.P.A.	163
Tabla 63: Distribución de los Metales en el Sólido y en el Líquido para el Polvo P.E.P.A.	164
Tabla 64: % Recuperación Cobre Polvo P.E.P.A.	165
Tabla 65: Comparación % Recuperación de Cobre P.E.P.A. 30% con Pérdida de Masa	166
Tabla 66: Comparación Ley P.E.P.A. y Ley Ripio	167
Tabla 67: Diferencias Fino Entrada y Fino Balance en la Mezcla	169
Tabla 68: Distribución de los Metales en el Sólido y en el Líquido en la Mezcla	170
Tabla 69: % Recuperación Cobre en la Mezcla	171





Indice de Figuras



	Páginas
Figura 1: Ubicación Geográfica de la Fundición y Refinería Ventanas	8
Figura 2: Etapas de Manejo de Residuos Sólidos Peligrosos	16
Figura 3: Estrategia de Gestión de Residuos	17
Figura 4: Depósito de Seguridad	24
Figura 5: Diagrama del Proceso Productivo de la Fundición y Refinería Ventanas	27
Figura 6: Diagrama de la Planta de Acido	34
Figura 7 : Piscinas de Decantación de Riles	37
Figura 8: Distribución de los Puntos de Muestreo	50
Figura 9: Diagrama de Manipulación de Lodos	70
Figura 10: Piscina de Decantación de Riles	71
Figura 11: Piscina de Secado	72
Figura 12: Detalle de Piscina de Secado	73
Figura 13: Ensacado de Lodos	74
Figura 14: Vía de Circulación a sitio de Acopio Temporal	76
Figura 15: Depósito de Seguridad Ventanas	78
Figura 16: Mapa de Depósito de Seguridad	79
Figura 17: Equipo de Protección Personal	85
Figura 18: Area Símbolo	87
Figura 19: Clase 6.1	89
Figura 20: Clase 9	90
Figura 21: Letrero	91
Figura 22: Apariencia del Lodo luego de un Mes de Secado I	98
Figura 23: Apariencia de Lodo después de un mes de Secado II	98
Figura 24: Piscina Auxiliar	99
Figura 25: Esquema General de Alternativas para el Tratamiento de Lodos	100
Figura 26: Esquema General de Recuperación de Cobre por Extracción por Solvente desde los Lodos	104
Figura 27: Etapa de Extracción	105
Figura 28: Etapa de Retroextracción	106
Figura 29: Planta de Extracción por Solvente	107
Figura 30: Esquema de Alternativas de Residuo Sólido Generado	108
Figura 31: Esquema General de Recuperación de Cobre por Adición de Chatarra de Fierro desde los Lodos	110
Figura 32: Esquema General Estabilización / Solidificación Lodos	113

Figura 33: Equipo utilizado para la Lixiviación por Agitación	121
Figura 34: Proceso Industrial de una Lixiviación por Agitación	128
Figura 35 : Esquema del Procedimiento Experimental 1	129
Figura 36: Esquema del Procedimiento Experimental 2	131
Figura 37: % Recuperación Cobre Lodo 45% (60 min)	154
Figura 38: % Acido Consumido Lodo 45%	155
Figura 39: % Recuperación de Cobre Lodo 35% (90 min)	156
Figura 40: % Acido Consumido Lodo 35% (90 min)	156
Figura 41: Distribución de Metales en el Lodo	159
Figura 42: Comparación Cinéticas P.E.P.A 50%	161
Figura 43: Comparación % Acido Consumido P.E.P.A. 50 %	162
Figura 44: Distribución Metales Polvo P.E.P.A.	165
Figura 45: Comparación % Recuperación de Cobre P.E.P.A. 30% con Pérdida de Masa	167
Figura 46: Distribución de Metales en la Mezcla	170



Resumen

La Empresa Nacional de Minería (ENAMI) en su Fundición y Refinería Ventanas ubicada en la V región, deposita sus Riles en dos piscinas, de tamaño de 50 m * 50 m y una profundidad de 1,5 m, comunicadas entre sí por medio de un ducto. En dichas piscinas se produce la decantación de los sólidos sedimentables y en suspensión, llegando a alcanzar la parte sólida la altura máxima recomendada para éstas. Los lodos producidos son el objetivo de estudio de este trabajo.

En una primera etapa se lleva a cabo un análisis de los procesos involucrados en la Fundición y Refinería Ventanas, para posteriormente identificar las fuentes generadoras de los lodos.

Luego se realiza un plan de muestreo para la caracterización química y física del lodo. En base a los resultados obtenidos se determina su peligrosidad, donde se clasifica a éste en listas de residuos y según el compendio de normas chilenas sobre sustancias peligrosas. Además se realiza un estudio sobre la legislación existente sobre residuos peligrosos.

Se propone una forma de manipulación de los lodos debido a que éstos necesitan ser removidos de las piscinas, ésta se divide en diferentes etapas: secado, recolección y transporte interno, y acopio temporal pensando en un tratamiento y/o disposición final de éstos.

Posteriormente se proponen alternativas para el tratamiento y/o disposición final, para luego llevar a cabo un estudio preliminar de una de las alternativa de acuerdo a la realidad e interés de ENAMI a escala de laboratorio.

Capítulo I

Antecedentes Generales

1.1 Introducción

La minería es una actividad en que la producción de residuos sólidos es intensiva, no siendo la Empresa Nacional de Minería (ENAMI) la excepción, debido a que los minerales de cobre que son explotados tienen leyes de alrededor de 1%, eso quiere decir que por una tonelada de cobre se generan 99 toneladas de material sólido que quedan como residuo de diferentes características. Además a estos residuos se añaden diversos insumos, que se agregan al mineral inicial en alguna de las etapas de explotación.

En relación al proceso en las fundiciones del total de material ingresado más los insumos respectivos se alcanza a una captación del 27 % aproximadamente de cobre y una recuperación del 95 %, esto quiere decir que de cada 100 toneladas que se procesan, 27 toneladas corresponden a cobre y de estas toneladas se pierden 1,35 toneladas en las diferentes etapas del proceso. Por lo tanto de las 100 toneladas anteriores 74,35 toneladas corresponden a residuos.

En general los residuos sólidos que se pueden asociar a la actividad minera son: material estéril, ripios, relaves, polvos de fundición, lodos, escorias en un primer grupo, también se puede definir un segundo grupo donde están las chatarras, neumáticos, madera, escombros, cartones y papeles, tambores vacíos y llenos con residuos líquidos o semilíquidos, ladrillos refractarios, restos de muestra de laboratorio, sales perclóricas, plásticos, cables, gomas, fierro, cañerías de PVC, mallas, desechos orgánicos, vegetales, entre otros.

Definir el concepto de residuo en la actividad minera es una tarea difícil, la definición de este en el diccionario es: “un desperdicio que no se puede o no es fácil aprovechar o se deja de utilizar por descuido”. Sin embargo, un residuo sólido es cualquiera sustancia que se elimina,

estos se pueden clasificar como industriales o domésticos y los primeros como peligrosos o no peligrosos. Los residuos industriales son aquellos desechos que se botan de los procesos productivos, mientras que los domésticos se refieren a las sustancias eliminadas de las actividades diarias de un hogar. Los residuos industriales son el resultado secundario de la obtención de un producto que constituye el objetivo principal, estos pasan a ser peligrosos cuando presentan ciertas características de peligrosidad, las que son: Inflamabilidad, Corrosividad, Reactividad y Toxicidad.

Los residuos mineros presentan diferentes grados de peligrosidad, tanto para la salud humana como para el medio ambiente. Por lo tanto es importante distinguir entre la peligrosidad intrínseca del residuo y aquella que se deriva efectivamente de acuerdo a la forma en que es manejado y dispuesto finalmente en el medio ambiente, es decir, se trata de distinguir entre las características de peligrosidad de un elemento y los riesgos que ellas pueden presentar para la salud humana y ambiental.

En la Fundición y Refinería Ventanas, ubicada en la V región, existen dos piscinas, con un área de 250 m² y una profundidad de 1,5 m cada una, las cuales están conectadas entre sí por medio de un ducto, éstas en un inicio fueron construidas para coleccionar aguas lluvias, principalmente las ocasionadas en la época de invierno, sin embargo, con el tiempo además de recibir las aguas lluvias pasaron a recibir los efluentes industriales líquidos. El sedimento de los Rises arrastrados por las aguas lluvias y por los Riles produjo una decantación natural de sólidos, esto trae la eliminación de metales pesados que se descargan al efluente final, es decir a la bahía y la generación de lodo.

La Unidad Medio Ambiente Corporativo de la ENAMI en noviembre de 1998 realizó un análisis preliminar en las piscinas, donde estimó que los lodos depositados deberían ser removidos, ya que el tiempo de residencia es cada vez menor por lo que podría aumentar el nivel de contaminantes a la bahía y además se estimó realizar un procedimiento de manejo de ellos, para el retiro de los lodos.

Luego de una caracterización de los lodos se obtuvieron contenidos de cobre 7%, arsénico 9,48%, cadmio 1345 ppm y mercurio 5495 ppm. Con estos resultados, debido al contenido de cobre, se propuso procesarlos directamente al Convertidor Teniente, pero de esta forma se estaría reintroduciendo metales pesados al proceso, así como también hay que tener presente que parte de éstos irían a la atmósfera contaminando suelos y aguas en sectores aledaños.

El manejo que se le de a este residuo es importante de destacar por la peligrosidad que pueda presentar éste, tanto a la salud humana como al medio ambiente, y además debido a que éste debe ser tratado y/o dispuesto finalmente.

Además no debemos olvidar que el lodo es un residuo minero, el cual puede presentar una riqueza escondida, y es por esto que se debe partir de la base de “lo que hoy puede ser un residuo mañana puede ser un recurso”, recuperando elementos de interés, para generar una nueva fuente de ingreso para la Empresa.

Por lo anteriormente expuesto, en este trabajo se desarrollará, una “Propuesta para el Manejo de Lodos producidos en las Piscinas de Decantación de Riles de la Fundición y Refinería Ventanas”.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- Desarrollar una propuesta de manejo de los lodos residuales provenientes de las piscinas de decantación de Riles de la Fundición y Refinería Ventanas.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar los lodos depositados en las piscinas.
- Determinar características de peligrosidad.

- Buscar la forma mas adecuada de manipulación de los sólidos.
- Definir condiciones de acopio temporal de los lodos.
- Investigar y proponer un proceso para el tratamiento y/o disposición final de los lodos residuales
- Estudio de alternativa de tratamiento.

1.3 Metodología

- Una recopilación de información sobre los lodos, y datos disponibles de estos en ENAMI.
- Descripción del proceso para definir los puntos que generan los Riles que van a dar a las piscinas de decantación donde se producen los lodos.
- Visitar periódicamente la Fundición y Refinaría Ventanas.
- Analizar la legislación más destacada en relación a los residuos industriales sólidos peligrosos.
- La realización de una caracterización química, donde se incluye un plan de muestreo de estos y selección de análisis y parámetros físico-químicos, más adecuados para la caracterización de los lodos.
- Las características de peligrosidad de los lodos se pretenden determinar con los análisis, clasificando si está en algunas de las categorías del Plan de Manejo de Residuos Peligrosos y revisando diferente guías con respecto al tema de caracterización y normativa vigente sobre Clasificación de Materiales Peligrosos.
- Los requerimientos que implicará su manejo, tanto como para su manipulación y también para el acopio temporal, donde su manipulación va implicar su modo de recolección, transporte, envasado y etiquetado del residuo, además se considerará equipamiento, seguridad e higiene. En cuanto al acopio temporal investigar las diferentes consideraciones que se deben tomar en cuenta.
- Investigar formas alternativas de tratamiento para los lodos y/o disposición final de ellos, realizando un estudio de la alternativa más adecuada y concordante con la realidad e interés de ENAMI.

- Llevar a cabo un trabajo de laboratorio de la alternativa escogida en una forma preliminar, realizando el diseño experimental.

Este trabajo se desarrollará en:

- Instalaciones ENAMI de Santiago.
- Laboratorio Metalúrgico de ENAMI de Ventanas.
- Laboratorio Metalúrgico de ENAMI de Planta Vallenar.

1.4 Antecedentes de la ENAMI

La Empresa Nacional de Minería, ENAMI, fue creada en 1960 mediante la fusión de la Caja de Crédito y Fomento Minero, CACREMI, con su filial, la Empresa Nacional de Fundiciones, ENAF, alcanzando la vida legal a través del D.F.L N°153 del mismo año.

El rol de ENAMI es fomentar la explotación y beneficio de todo tipo de minerales, procesarlos y comercializarlos, así como desarrollar actividades relacionadas con la minería, proporcionando diversos servicios a este sector de la economía nacional.

La Empresa actúa como intermediaria entre los productores mineros y el mercado internacional. Las diversas actividades y servicios que proporciona permiten y facilitan el acceso a productores de pequeña y mediana escala a los mercados de metales refinados.

Se ha definido la misión de ENAMI en la minería chilena como “fomentar la actividad minera de pequeña y mediana escala, mejorando su competitividad a través de la prestación de servicios rentables en todas las etapas de la cadena de valor del negocio minero”.

En las fases de exploración y explotación del negocio, ENAMI participa prestando servicios bonificados parcialmente, que contribuyan a mejorar la productividad de las faenas de pequeña y mediana escala.

En la etapa de beneficio de minerales, la Empresa compra la producción del sector en condiciones que simulan o reflejan mercados eficientes, utilizando capacidades de tratamiento en sus plantas de beneficio Manuel Antonio Matta, Vallenar, El Salado y Taltal, así como su filial de Panulcillo, o bien en plantas de terceros. La labor se complementa en la Fundición Hernán Videla Lira y la Fundición y Refinería Ventanas.

En la fase de comercialización, ENAMI facilita al sector el acceso al mercado de metales de refinados y pone a su disposición instrumentos de cobertura de riesgo de precio y de estabilización.

En relación a su política ambiental, ENAMI en su desarrollo incluye consideraciones ambientales en todas sus actividades, donde la gestión ambiental es una prioridad de la Empresa como factor determinante para asegurar un desarrollo sustentable. Las políticas, programas y prácticas ambientales son elementos básicos de su administración y comprometen a todo su personal.

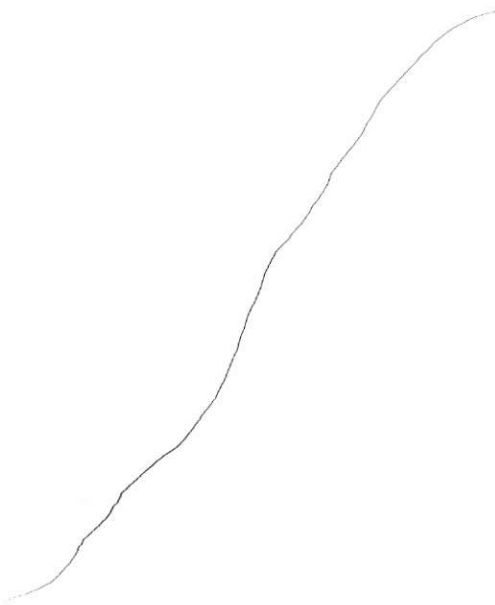
Debido a esto ENAMI tiene la siguiente política ambiental:

1. ENAMI es una empresa comprometida con el medio ambiente. Este compromiso es una expresión más de la responsabilidad que tiene con la minería y la comunidad nacional.
2. ENAMI desarrollará sus procesos industriales sin causar deterioro a la salud de sus trabajadores, a la calidad de vida de las comunidades cercanas y al entorno natural de sus procesos productivos.
3. ENAMI utilizará en sus procesos y proyectos de desarrollo tecnologías limpias que estén a su alcance y contará con un adecuado sistema de gestión ambiental, agregando eficiencia y competitividad a sus procesos y productos, en una estrategia global de mejoramiento continuo.

4. Como un aporte a la sustentabilidad del desarrollo del país y de la minería, ENAMI mantendrá una estrecha colaboración con organismos e instituciones del Estado en el desarrollo de procedimientos y estándares ambientales económicamente y científicamente sólidos, y cumplirá las normativas ambientales que le corresponderán.

5. ENAMI promoverá en su personal y en su entorno social los valores de la armonía con el medio ambiente y el compromiso con las futuras generaciones, desarrollando la cultura y la responsabilidad ambiental entre sus trabajadores, contratistas y proveedores, manteniendo una comunicación abierta y constructiva con la comunidad y la opinión pública en materias ambientales.

6. ENAMI, coherentemente con su rol de fomento hacia la Pequeña y Mediana Minería, impulsará el desarrollo ambientalmente sustentable de este sector productivo, promoviendo en él la gestión ambiental y el uso de tecnologías limpias.



1.5 Ubicación Geográfica de la Fundición y Refinería Ventanas

La Fundición y Refinería Ventanas propiedad de ENAMI se ubica en la V Región de Valparaíso, en la comuna de Puchuncaví. La siguiente figura muestra su ubicación:

Figura 1: Ubicación Geográfica de la Fundición y Refinería Ventanas



Capítulo II

Residuos Sólidos: Antecedentes Generales

2.1 Definiciones

2.1.1 Residuo

“Sustancia, elemento u objeto que el generador elimina, se propone eliminar o está obligado a eliminar¹”.

“Es cualquier sustancia, objeto o materia del cual su poseedor se desprenda o tenga la intención de desprenderse²”.

2.1.2 Residuo Sólido de Origen Industrial

El concepto de residuo sólido industrial ha sido definido por la normativa chilena 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 sólidos domésticos³”.

Por su parte, la Resolución N°5.081 dispone que “Desecho Sólido Industrial es todo desecho o residuo sólido o semisólido resultante de cualquier proceso u operación industrial que no vaya a ser reutilizado, recuperado o reciclado en el mismo establecimiento industrial. Se incluyen en esta definición los residuos o productos de descarte, sean éstos líquidos o gaseosos. El

¹ Borrador del Reglamento sobre Manejo Sanitario de Residuos Peligrosos, Julio del 2000.

² Manual de Manejo de Residuos Sólidos Industriales, Fernando Alliende Correa, 1996.

³ DS N°594/99 del Ministerio de Salud que establece el Reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales mínimas en los lugares de trabajo.

carácter de desecho sólido de los últimos lo aporta el contenedor o recipiente que los contiene.”

2.1.3 Residuo Sólido Peligroso

“Un residuo o una mezcla de residuos es peligrosa si de acuerdo a sus características de peligrosidad definidas en el presente reglamento o de su manejo actual o previsto, puede presentar riesgo para la salud pública y/o efectos adversos al medio ambiente”.

“ Las características de peligrosidad son:

- a) Toxicidad aguda.
- b) Toxicidad crónica.
- c) Toxicidad extrínseca.
- d) Inflamabilidad.
- e) Reactividad.
- f) Corrosividad.

Bastará la presencia de una de estas características en un residuo para que sea calificado como peligroso⁴.”

El decreto N°594, referido a las Condiciones Sanitarias Ambientales en los Lugares de Trabajo, también se refiere a los residuos peligrosos e incluye a estos en una tabla.

Otra definición que se debe tomar en consideración es la de sustancia peligrosa:

“Aquella que por su naturaleza, produce o puede producir daños momentáneos o permanentes a la salud humana, animal o vegetal y a los elementos materiales tales como instalaciones, maquinarias, edificios, etc⁵”.

⁴ Artículo 10 y 11, Borrador del Reglamento sobre Manejo Sanitario de Residuos Peligrosos. Julio del 2000.

2.2 Identificación y Clasificación de un Residuo Sólido Peligroso

Un residuo sólido se considera peligroso si exhibe o manifiesta las características de peligrosidad anteriormente mencionadas (definición residuo sólido peligroso).

Los residuos que estén contenidos en algunas de las categorías del borrador del Reglamento sobre Manejo Sanitario de Residuos Peligroso siempre se considerarán peligrosos a menos que su generador pueda demostrar ante la autoridad sanitaria que no presentan ninguna de las características de peligrosidad, además para la clasificación de estos existe el Catálogo de Residuos contenido en la "Guía Metodológica de Procesamiento para la Confección y Revisión de Planes de Manejo de Residuos Peligrosos".

2.3 Exclusiones

Se excluye de los residuos sólidos peligrosos a los residuos mineros masivos que provengan de las operaciones de extracción, beneficio o procesamiento de minerales siempre que su disposición final no se realice en conjunto con residuos sólidos domésticos u otros similares.

Estos residuos mineros masivos son:

- a) Los estériles.
- b) Los minerales de baja ley.
- c) Los residuos de minerales tratados por lixiviación.
- d) Los relaves.
- e) Las escorias.

No obstante la Autoridad Sanitaria podrá, en casos calificados, requerir de un generador la caracterización de sus residuos mineros masivos. Además la autoridad sanitaria podrá en todo

⁵ NCh382.Of98, Instituto Nacional de Normalización, 1998

caso muestrear, analizar y caracterizar la peligrosidad de dichos residuos toda vez que lo estime oportuno.

Para la caracterización de la toxicidad extrínseca de los residuos masivos mineros, se utilizará el método de “Lixiviación por Precipitación Sintética”.

2.4 Fuentes de Residuos Sólidos Peligrosos

La fuente principal de residuos sólidos peligrosos es el generador de los mismos. Otras fuentes son transportistas, procesadores de residuos y lugares de disposición final.

Los residuos sólidos peligrosos se producen como resultados de la satisfacción de necesidades y conveniencia humanas. Es por esto que el principal generador de residuos sólidos peligrosos es la industria. Sin embargo, diversas fuentes comerciales e institucionales son también generadoras de residuos sólidos peligrosos.

Entre las comerciales destacan tintorerías, estaciones de servicio, bombas de bencina. Las fuentes institucionales incluyen hospitales, laboratorios, instalaciones militares y otros.

Las industrias generadoras de residuos peligrosos abarcan una amplia gama de rubros y sustancias. Los principales rubros que generan residuos sólidos peligrosos son:

- Minería y Metalurgia.
- Pintura y Pigmentos.
- Pesticidas.
- Electricidad y Electrónica.
- Impresión y Reproducción.
- Galvanoplastia y terminación de metales.
- Manufacturas químicas.
- Explosivos.

- Goma y plásticos.
- Baterías.
- Farmacéuticos.
- Textiles.
- Petróleo y carbón.
- Celulosa y papel.
- Cueros.

2.5 Efectos de los Residuos Sólidos Peligrosos

Los residuos sólidos peligrosos dañan substancialmente al aire, agua y suelo. A menudo afectan a los seres humanos directa o indirectamente. Un deterioro del medio ambiente por residuo sólidos peligrosos es extensivo y frecuentemente irreversible, o reversible a un alto costo. Los daños ambientales se producen por residuos que se queman, corroen, reaccionan violentamente o son tóxicos.

Las trazas de productos químicos peligrosos, incluyendo cancerígenos, entran a la cadena alimenticia vía fuentes de aguas superficiales. Las personas están expuestas a estos a través del agua, aire y alimentos.

Los contaminantes tóxicos llegan, mediante su lixiviación o transporte, a las fuentes de aguas desde vertederos, depósitos de residuos, quema de desechos y combustibles, incineración, etc.

Los efectos de los residuos peligrosos varían considerablemente, tanto en la salud y seguridad humanas, en las propiedades y el medio ambiente dependiendo de las características de estos.

- **En la Salud**

Los residuos sólidos peligrosos pueden causar efectos en la salud al entrar al cuerpo humano por inhalación, absorción a la piel, ingestión o heridas. Pueden producir efectos agudos como mareos, dolor de cabeza y náuseas, efectos crónicos como cáncer, invalidez y muerte.

El impacto a la salud va a depender de la cantidad y duración de la exposición a los residuos peligrosos.

- **En la Seguridad**

En la protección del personal involucrado en la limpieza y en las actividades relacionadas con el manejo de residuos sólidos peligrosos, deben definirse los procedimientos de seguridad adecuados con el fin de proteger a los trabajadores y al público de los potenciales peligros.

- **En la Propiedad**

El daño a la propiedad privada y pública y al medio ambiente físico se produce en general como resultados de incendios y explosiones en lugares de disposición de residuos sólidos peligrosos. Esos accidentes, aparte de crear situaciones de peligro como efecto del intenso calor y humo, del fuego abierto y restos expulsados a la atmósfera, pueden también emitir sustancias peligrosas al medio ambiente.

- **En el Medio Ambiente**

Los posibles efectos adversos al aire, agua y suelo son tan variados como lo son los tipos de residuos sólidos peligrosos, un mal manejo de estos por lo tanto va a causar daños al ambiente.

2.6 Etapas de Manejo de Residuos Sólidos Peligrosos

Una definición para las Etapas de Manejo de Residuos Sólidos Peligrosos es aquella que considera:

“A todas las actividades vinculadas a la manipulación de los residuos sólidos, desde el punto de generación hasta su disposición final⁶”.

Se entiende por manejo a:

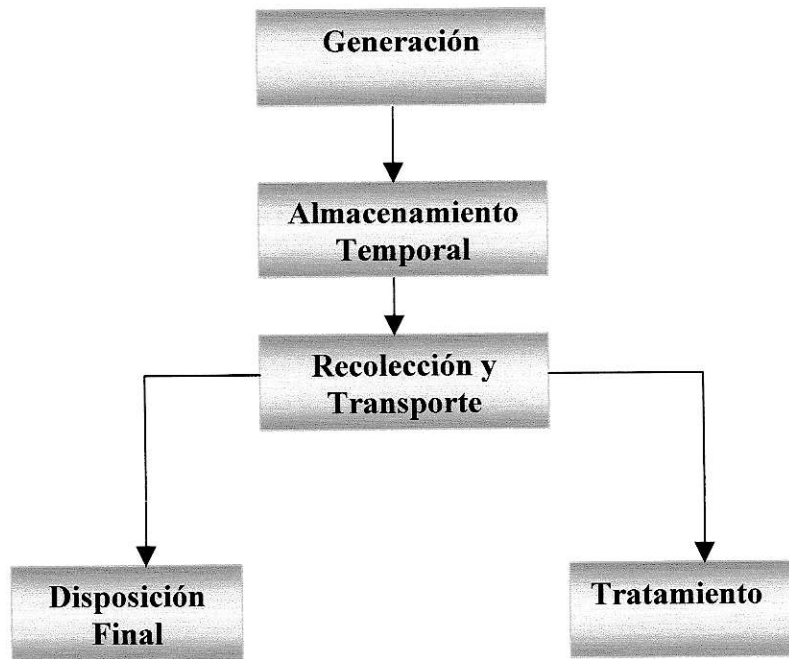
“Todas las operaciones que se somete un residuo desde su generación hasta su tratamiento y/o disposición final, de forma tal de resguardar la salud de las personas y minimizar los impactos al ambiente⁷”.

Las actividades vinculadas en la manipulación de los residuos peligrosos, desde el punto de generación hasta su disposición final, incluye etapas de almacenamiento, recolección, transporte y tratamiento previo a la disposición. En el siguiente esquema se muestra las etapas de manejo de residuos sólidos peligrosos:

⁶ Manual de Auditoria en Producción Limpia. Secretaria Ejecutiva de la Producción Limpia, 1998, Capítulo II.

⁷ Borrador del Reglamento sobre Manejo Sanitario de Residuos Peligrosos, Julio 2000.

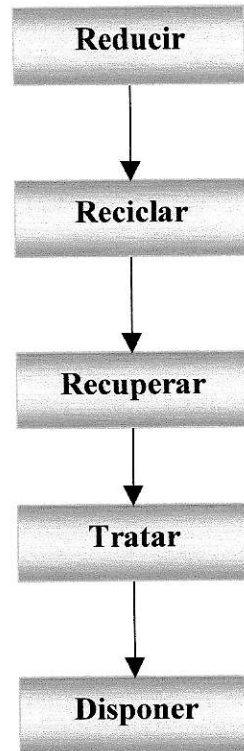
Figura 2: Etapas de Manejo de Residuos Sólidos Peligrosos



Los residuos pueden seguir la siguiente estrategia industrial de gestión antes de ser tratados o dispuestos finalmente:

- Reducir en el origen el volumen y peligrosidad de los residuos.
- Reciclar los residuos transformándolos en materias primas del mismo proceso.
- Recuperar los residuos para la obtención de recursos o producción de subproductos.
- Tratar los residuos que no hayan podido ser reducidos, reciclados ni recuperados.
- Disponer los residuos debidamente tratados, en lugares acondicionados para ese efecto.

Figura 3: Estrategia de Gestión de Residuos



2.6.1 Almacenamiento Temporal

Un almacenamiento temporal de residuos industriales al interior de la industria debe realizarse con ciertas precauciones de modo de evitar efectos directos o indirectos en la salud de las personas y el medio ambiente.

Para poder determinar el tipo de almacenamiento más adecuado para el residuo, es necesario determinar:

- Las características físico-químicas del residuo.
- La peligrosidad del residuo.
- Las características del entorno.

- Higiene y seguridad laboral.
- Tiempo máximo de almacenamiento de cada residuo.
- Calidad de recipientes empleados.
- Disponibilidad de espacio.
- Ventilación adecuada.
- Operatividad en la recolección.
- Tasa de generación de los residuos.
- Características de compatibilidad de residuos.
- Las áreas de almacenamiento y manejo deben contar con sistemas de seguridad de acceso restringido, a fin de impedir el ingreso intencional o accidental a terceros.

Se distinguen dos tipos de áreas de almacenamiento para residuos peligrosos: áreas de almacenamiento satélite y áreas de almacenamiento central. La primera corresponde a sitios ubicados en los puntos de generación, destinados al acopio de residuos peligrosos con baja tasa de producción (220 litros en 90 días) y lejanos a áreas de almacenamiento central. La segunda categoría se refiere a una estructura cerrada y autosoportante, diseñada y construida para almacenar temporalmente residuos peligrosos, previo su tratamiento y/o disposición final. Ambas áreas requieren una inspección regular de sus áreas de modo de prevenir y detectar fugas o derrames.

Además los recipientes y embalajes que contengan residuos peligrosos deben estar etiquetados según las normas del INN (Nch 2190 of 98).

2.6.2 Recolección y Transporte

Un sistema de recolección y transporte debe considerar parámetros como:

- Tipo de residuo a recolectar.
- Normativa asociada a su transporte.
- Volumen a recolectar.

- Frecuencia de recolección.
- Distancia entre el lugar de generación y sitio de disposición final.
- Maquinaria disponible.
- Etc.

La carga, transporte y descarga de los residuos peligrosos debe ser manejada por personal calificado, provisto de equipos de seguridad. En el transporte de los residuos se deben evitar derrames, filtraciones o descargas de los residuos al suelo, la atmósfera, a cursos de aguas superficiales y napas subterráneas.

2.6.3 Tratamiento

Los residuos los cuales no pueden ser evitados o reciclados, pueden ser tratados para su recuperación o disposición final en lugares adecuados. Se define como tratamiento a todo mecanismo o proceso empleado para reducir la cantidad o peligrosidad del residuo.

Dentro los principales métodos de tratamiento utilizados a nivel mundial se destacan:

a) Procesos de Recuperación

Estos procesos deben ser analizados previo a la aplicación de cualquier otro tratamiento, ya que permiten minimizar la cantidad de peligrosidad del residuo a tratar, y a la vez, recobrar materiales de valor. Para su aplicación a residuos sólidos, se requiere transformarlos a una fase líquida. Dentro de los cuales podemos destacar:

- Adsorción en carbón.
- Adsorción en resinas.
- Destilación.
- Intercambio iónico.
- Extracción por solventes.

- Ultrafiltración.
- Arrastre por aire.
- Arrastre por vapor.
- Centrifugación.
- Osmosis inversa.

b) Tratamiento Físico-Químico

Estos procesos comprenden un conjunto de tecnologías que pueden aplicarse en forma separada o como técnicas complementarias a métodos químicos o biológicos. Permiten la reducción del volumen, destoxificación y/o estabilización de los residuos. Dentro de los cuales podemos destacar:

- Sedimentación.
- Filtración.
- Evaporación.
- Precipitación química.
- Oxidación química.
- Reducción.

c) Tratamiento Biológico

Estos procesos utilizan microorganismos en la aplicación de técnicas de tratamiento a residuo industriales, ya que los microorganismos o sus productos permiten la degradación de muchos compuestos en el medio natural. Pueden ser procesos anaeróbicos, aeróbicos, de compostaje, tratamiento de tierra u otros.

Los microorganismos empleados han sido capaces de metabolizar una gran variedad de compuestos, a lo largo de su proceso de evolución orgánica. Ultimamente, ha habido un

creciente interés en el uso de ciertas cepas específicas para detoxificar o destruir materias orgánicas, especialmente residuos peligrosos recalcitrantes. Dentro de estos procesos destacan:

- Lodos activados.
- Filtros percoladores.
- Contactador biológico de rotación.
- Digestión anaeróbica.
- Landfarming.
- Compostaje.

d) Estabilización y Solidificación

Procesos que emplean la adición de diversos aditivos para reducir la movilidad de los residuos y así poder disponerlos adecuadamente. La estabilización considera aquellas técnicas que reducen el peligro potencial de un residuo, mediante el paso de sus elementos contaminantes a su forma de menor movilidad, solubilidad o toxicidad. En estos procesos destacan:

- Sorción.
- Microencapsulación.
- Macroencapsulación.
- Procesos que emplean cal y cenizas volantes puzolánicas.
- Procesos que emplean puzolanas y cemento portland.

e) Destrucción Térmica

Los tratamientos térmicos están diseñados para destruir residuos peligrosos, a través de procesos de combustión o pirólisis a altas temperaturas y generalmente, en un medio oxidante.

A su vez, estos procesos permiten reducir el volumen de los residuos y recuperar energía en forma de vapor o electricidad. Dentro de estos procesos destacan:

- Incinerador de inyección líquida.
- Horno rotativo.
- Horno de lecho fluidizado.
- Horno pirolítico.
- Horno cementero.
- Sistema de plasma.

2.6.4 Disposición Final

La aplicación de los tratamientos anteriormente descritos lleva a una disminución en la cantidad y nocividad de los residuos sólidos industriales, sin embargo, no elimina la necesidad de disposición final de éstos. A nivel mundial se emplean dos tipos de disposición para estos residuos:

- Subterránea.
- Superficial.

a) Disposición Subterránea

La alternativa de disposición subterránea es una técnica para disponer residuos industriales, principalmente residuos peligrosos.

Este método de disposición permite ocupar grandes volúmenes de espacio disponible a muy bajo costo, disminuyendo el riesgo de contaminación atmosférica o hídrica. Además, facilita la posibilidad de un reciclaje futuro, cuando se vayan implementando nuevos sistemas de tratamiento.

Generalmente, se realiza en espacios confinados al interior de antiguas minas abandonadas, que cumplen condiciones básicas de:

- Estanqueidad.
- Estabilidad estructural.
- Seguridad.
- Sistema de ventilación adecuado.

Ésta requiere la elaboración de planes de mantención y contingencia, así como un sistema de control, vigilancia y monitoreo periódico de las instalaciones, a fin de asegurar un almacenamiento adecuado de los residuos y detectar posibles derrames o accidentes ambientales. En algunos casos, es necesario neutralizar, estabilizar o encapsular los residuos.

Las minas más utilizadas para este propósito son la de extracción de sal, yeso y de granito, con profundidades que varían entre 16 a 1.000 metros.

Los residuos deben ser dispuestos en contenedores herméticos, no reactivo con el residuo almacenado, con el propósito de garantizar la seguridad al interior de la mina. Estos recipientes deben estar claramente etiquetados, a fin de permitir una fácil identificación del tipo de residuo contenido y su procedencia.

b) Disposición Superficial

La disposición superficial puede realizarse mediante la construcción de rellenos y/o depósitos de seguridad. Es un método de disposición que aplicando principios básicos de ingeniería para confinar residuos en un área lo más pequeña posible, no genera deterioro al medio ambiente y no causa peligro para la salud y seguridad pública.

Existen a nivel mundial tres tipos de rellenos para residuos industriales. Las principales diferencias radican en las exigencias técnicas aplicadas a cada relleno, en base a la peligrosidad del residuo a disponer.

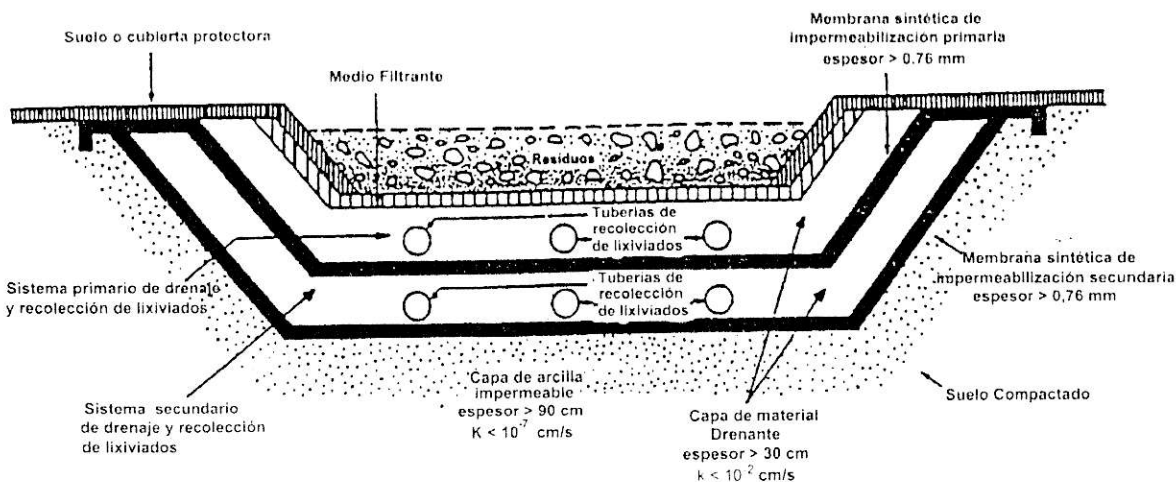
b.1) Relleno Estrictamente Controlado (o Depósito de Seguridad)

Un depósito de seguridad es un relleno destinado a la disposición final de determinados residuos industriales peligrosos, que cumple con estrictas exigencias técnicas que garantizan que las propiedades nocivas de los residuos no puedan afectar, en ningún caso, ni en el tiempo, al ambiente y a la salud humana.

El sitio debe cumplir con características geológicas, hidrológicas, topográficas y climáticas que aseguren la estabilidad y estanqueidad del vaso. La principal característica de este tipo de relleno es su estructura de impermeabilización.

Puede recibir un solo tipo de residuo (monovertido) o una variedad determinada de los mismos, adoptando criterios de compatibilidad. El desarrollo en paralelo de dos o tres celdas, independizadas por barreras verticales de arcillas y materiales poco reactivos, ofrece un sistema de operación que es económicamente interesante.

Figura 4: Depósito de Seguridad



b.2) Relleno Controlado

Este relleno permite la disposición de residuos industriales no peligrosos y inertes. En el caso de residuos industriales asimilables o domiciliarios. Existe la posibilidad de disponerlos en un relleno sanitario.

Las exigencias de impermeabilización son menores a un depósito de seguridad. Los residuos se disponen en celdas, con la correspondiente compactación, el recubrimiento diario y control de líquidos percolados. Los líquidos percolados son recolectados y reinyectados al relleno.

Adicionalmente, la operación de un relleno contempla programas de monitoreo de los líquidos percolados y de las napas subterráneas. Así mismo, debe contemplar un plan de contingencia y un procedimiento de control de acceso, mediante el cual se comprueba la calidad y cantidad de los residuos a recibir.

La operación debe ser diseñada de tal manera que reduzca al mínimo los impactos más relevantes. Estos son: la generación de olores, el desplazamiento de los residuos por la acción del viento y la proliferación de vectores. En el largo plazo, los aspectos a considerar son la protección a las napas subterráneas y la recuperación de suelos y paisajes.

b.3) Relleno de Inertes

Los residuos de inertes corresponden a aquellos que no reaccionan con otros materiales. Tampoco generan líquidos percolados en grandes cantidades. La composición de estos residuos es principalmente inorgánica, provenientes generalmente de escombros de la construcción. Luego, la correcta operación de un relleno de inertes no requiere de capas de revestimiento o sistemas de captación de líquidos.

Capítulo III

Descripción de Procesos

3.1 Descripción del Proceso de la Fundición y Refinería Ventanas

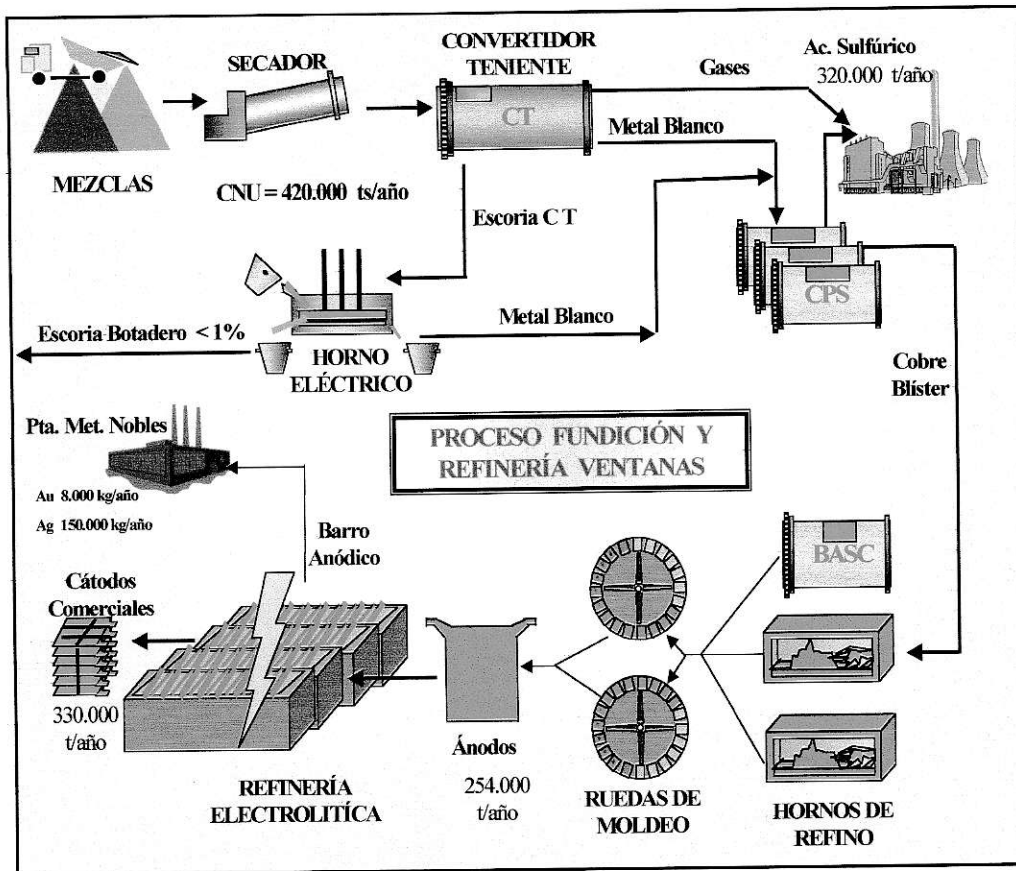
3.1.1 Descripción General

El objetivo principal de este complejo industrial es la fusión de concentrados sulfurados de cobre y la obtención de cátodos de cobre de calidad High Grade. Tiene una capacidad de fusión de orden de 420.000 ton/año de concentrados, y una producción de cobre electrolítico de 330.000 ton/año, incluyendo el abastecimiento de ánodos y blíster provenientes de otras fundiciones.

El proceso de producción de la Fundición y Refinería Ventanas se divide principalmente en las siguientes etapas : Fundición, Refinación a Fuego, Refinación Electrolítica y Planta de Metales Nobles, como apoyo para el desarrollo de este proceso productivo se cuenta con un área de Servicios Industriales, que abastece de vapor, agua, energía eléctrica, aire comprimido y oxígeno a las distintas etapas de producción.

Además del cátodo de cobre mediante estos procesos se obtienen metales nobles como son: plata, oro, concentrado de selenio, paladio-platino.

Figura 5: Diagrama del Proceso Productivo de la Fundición y Refinería Ventanas



3.1.2 Descripción Específica de las Etapas

3.1.2.1 Secador de Concentrados

El material es recepcionado en tolvas y mezclado para ingresar al secador. Este secador del concentrado es un equipo que consta de una cámara de combustión, donde se genera aire caliente para secar el concentrado; el secador que es un cilindro tiene como objetivo avanzar la carga húmeda, levantarla y disgregarla al máximo para así producir un intercambio de humedad entre el concentrado y el gas caliente; una zona de descarga, que se encuentra ubicada justo después del secador y cuyo objetivo es separar la corriente gaseosa del concentrado que posteriormente ingresa a la caja de descarga, donde existe un buzón de traspaso que permite evacuar el concentrado seco que es movido con aire comprimido e

inyectado al baño fundido de metal blanco donde es digerido (disuelto).

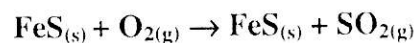
3.1.2.2 Convertidor Teniente

En el Convertidor Teniente se sopla aire con 32 a 36% de oxígeno, donde se genera calor por la reacción del oxígeno soplado con el hierro contenido en los sulfuros de cobre y hierro del concentrado, que genera un producto de alta ley llamado metal blanco con 72 a 76% de cobre, y una corriente continua de gases con sobre el 20% de SO₂ pero en la campana se mezcla con aire y baja a 8 a 12% de SO₂ y escoria.

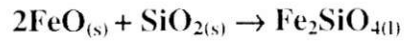
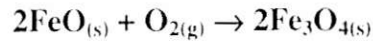
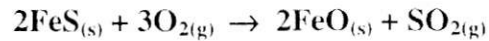
La separación entre el metal blanco o eje de alta ley y la escoria se produce por diferencias de densidad, siendo el metal blanco el más pesado y sedimentado. El metal blanco producido, es transferido periódicamente, mediante ollas, al Convertidor Pierce Smith, donde se efectúa la etapa final de conversión a cobre blister.

Las reacciones químicas que se producen dentro del Convertidor Teniente se pueden separar en dos etapas:

- Combustión del azufre pirítico, que representa la descomposición y combustión de todo el azufre sobre la solución de Cu₂S-FeS:



- Las reacciones de formación de escoria son:



Además en el proceso de escorificación se forman productos colaterales, que son contaminantes, como arsénico (As), óxidos de arsénico (As_2O_3), óxidos de estaño (Sb_2O_3), bismuto (Bi), óxidos de plomo (PbO) y óxidos de zinc (ZnO).

La escoria generada es evacuada por un pasaje de sangría ubicado en el extremo opuesto al punto de extracción del metal blanco y transferida a un Horno de Limpieza de Escoria, donde se lleva a cabo un proceso batch de reducción, sedimentación y recuperación de los contenidos de valor metálico, obteniéndose un producto final descartable, con un contenido de 0,6 a 1,0% de cobre.

Los gases generados por el reactor arrastran partículas arsénico, antimonio, plomo, zinc, entre otros metales, los cuales son enfriados y tratados en equipos recuperadores de polvos para luego ser enviados a la Planta de Ácido.

3.1.2.3 Horno de Limpieza de Escoria

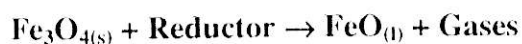
Es un reactor continuo de alimentación gravitacional, que permita la recuperación del cobre contenido en escorias de alta ley (6 a 10% de cobre), provenientes de los procesos de fusión-conversión, con capacidad para tratar la totalidad de la escoria generada en el Convertidor Teniente.

Básicamente la operación del Horno de Limpieza de Escoria (HLE) comprende cuatro etapas: carga de la escoria al horno, reducción de la magnetita contenida en la escoria alimentada, sedimentación de la mata o separación de las fases de metal y escoria y extracción de la

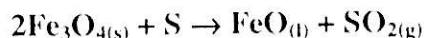
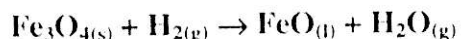
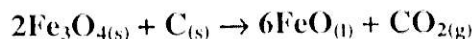
escoria final y mata de alta ley.

La carga de escoria fundida proveniente del Convertidor Teniente se realiza en forma continua. Las reacciones químicas de reducción son endotérmicas. Debido a esto, se requiere generar calor con un quemador, de modo de mantener la temperatura del baño y de esa manera favorecer las condiciones de viscosidad.

La reducción de la magnetita se representa como:



El reductor está compuesto principalmente de carbono, hidrogeno y algo de azufre y las reacciones son:



La ecuación para la formación de fayalita es la siguiente:



En la etapa de sedimentación, se deja en reposo la escoria reducida para permitir la decantación de las partículas con contenido metálico. La separación de fase se produce debido a la mayor densidad de las gotas de sulfuro metálico respecto de la escoria.

Los productos obtenidos, después de la sedimentación son una escoria descartable con un bajo contenido de cobre (0,6 a 1,0% de cobre) y un metal blanco obtenido con 72 a 76% de cobre,

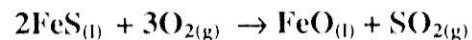
una vez cumplida la sedimentación se procede a extraer la escoria y el metal blanco. La escoria, por su bajo contenido de cobre es desechada a un botadero, mientras que el metal blanco es reincorporado al proceso de fundición, al Convertidor Pierce Smith.

3.1.2.4 Convertidor Pierce Smith.

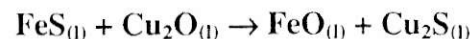
El metal blanco con un 72 a 76% de Cu producido en el Convertidor Teniente es transportado en ollas al Convertidor Pierce Smith (CPS) donde se termina de producir la fusión-conversión del concentrado.

El propósito de la conversión de ejes de cobre es eliminar el hierro, azufre y otras impurezas, mediante un proceso autógeno de oxidación selectiva a alta temperatura. El proceso global se realiza en dos etapas químicas y físicamente diferentes, donde se produce una fase metálica, o cobre blister, una fase de escoria y grandes cantidades de gases, principalmente SO_2 .

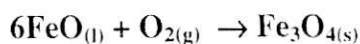
La primera etapa del Convertidor Pierce Smith es el soplado de aire. Las reacciones de oxidación que ocurren en esta etapa son:



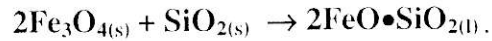
Dado que la atmósfera que se produce es fuertemente oxidante en los mecanismos de soplado es posible que se forme Cu_2O . Si esto llegase a ocurrir, en presencia de FeS, se produce la siguiente reacción:



Debido a la fuerte afinidad del hierro con oxígeno ocurre la siguiente reacción:

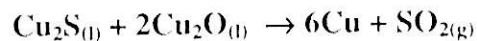
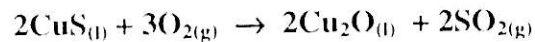
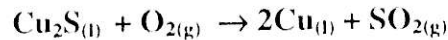


Para controlar la formación de magnetita es necesario agregar un fundente que permita complejar el FeO en una escoria ($\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$) y así controlar la formación de la magnetita:



Al final de la etapa de soplado en la escoria, se encuentran en equilibrio dos fases líquidas inmiscibles: escoria de fayalita, casi saturada de magnetita y una cierta cantidad de cobre disuelto químicamente (Cu_2O) o atrapado mecánicamente (Cu_2S); y una fase sulfurada rica en cobre denominada metal blanco.

En la etapa de soplado a cobre se elimina el azufre remanente, y esto lleva a la producción de cobre metálico, mediante las siguientes reacciones:



Una vez obtenido el cobre metálico o blister con un porcentaje de pureza sobre el 99% y separadas las fases por diferencias de densidad, quedando la escoria en la superficie y el cobre blister en el fondo del Convertidor Pierce Smith, el cobre pasa a la etapa de refinado y moldeo.

3.1.2.5 Refinación a Fuego (RAF)

Los objetivos principales de esta etapa productiva son: refinar o extraer el azufre y otras impurezas remanentes del cobre blister, proveniente tanto de la etapa de Fusión-Conversion (Blister líquido), como de proveedores externos (Blister sólido); fundir el cobre anódico residual de la Refinería Electrolítica (resto de ánodo o scrap), y moldear el cobre refinado en forma de ánodos, aptos para ser procesados en Refinería Electrolítica.

El cobre anódico proveniente desde los Hornos Reverberos y Basculantes a temperaturas superiores a 1150°C, fluye hacia las ruedas de moldeo a través de canaletas de material refractario y cucharas de trasvasije. Una vez llenado el molde, es enfriado a lo largo del trayecto de la rueda mediante lluvia de agua sobre la superficie, y así el baño es enfriado y moldeado en placas de ánodos. Luego son depositados por un extractor de ánodos mecánico – neumático, en piscinas de refrigeración para finalmente ser llevados a la Refinería Electrolítica para su posterior tratamiento de purificación.

3.1.2.6 Planta de Acido

La planta de ácido tiene como objetivo principal la producción de ácido sulfúrico a partir de los gases de la fundición, el proceso utilizado para la producción de este ácido es el contacto, el cual se basa en la oxidación del SO₂ a SO₃ por medio de un reactor de lecho fijo utilizando como catalizador V₂O₅, esto se lleva a cabo en fase gaseosa, ocurriendo la siguiente reacción:



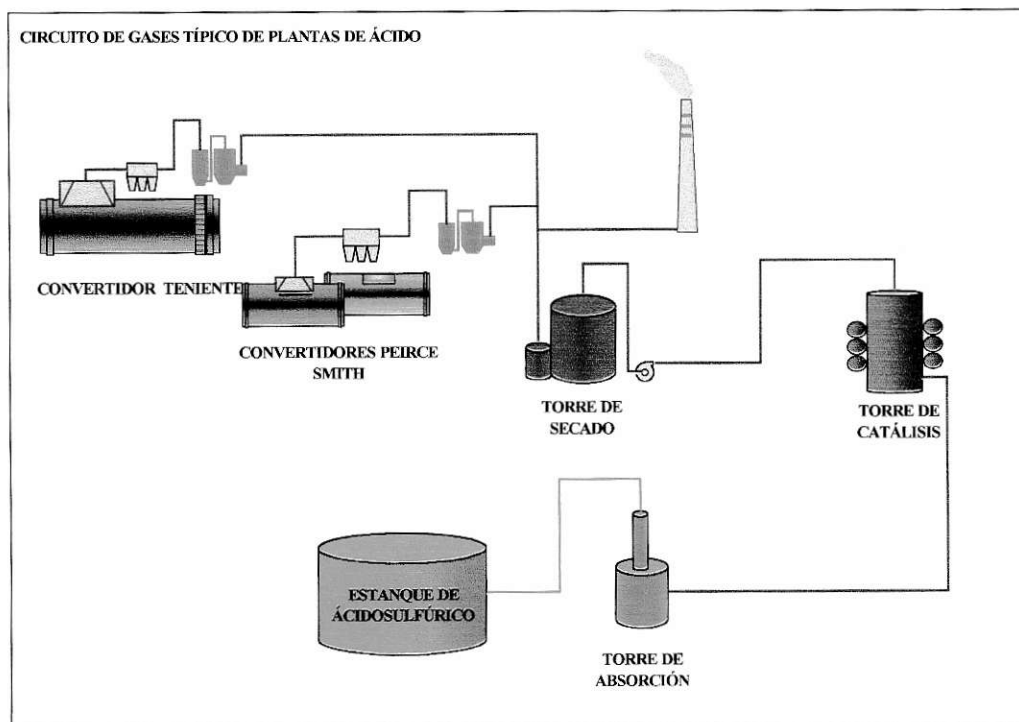
Los gases provenientes de la fundición desde el Convertidor Teniente y Convertidos Pierce Smith tienen una gran cantidad de impurezas sólidas y gaseosas éstos deben pasar previamente por una etapa de lavado de gases, para ello estos gases son atrapados en campanas de succión y eliminados de sus suspensiones sólidas gruesas por medio de ciclones, luego como aún contiene gran cantidad de impurezas el gas entra a una torre tipo spray, donde se lava con un ácido sulfúrico (3% en peso de ácido sulfúrico), en la que la mayoría de las partículas más pesadas son retiradas, enfriándose a su vez a unos 55°C. Para seguir eliminado las trazas de polvo se utiliza un precipitador electrostático donde la mayor parte de las partículas residuales se retiran. Luego el gas se seca por deshidratación con ácido sulfúrico al 93% a una temperatura de 40°C en una Torre de Secado.

El gas una vez seco se calienta a una temperatura apropiada de 410°C y para ello se hace pasar el gas por cuatro intercambiadores de calor en serie. Debido a que la reacción genera una gran

cantidad de calor los gases salientes de cada etapa debe ser enfriados para obtener una temperatura ideal a la entrada de cada etapa siguiente, este calor se aprovecha para calentar el gas a la llegada del reactor, luego el gas ingresa al reactor denominado Torre de Catálisis donde se produce la reacción de oxidación, ocurriendo enfriamientos intermedios en cada etapa. El SO_3 producido se encuentra a unos 200°C y a una presión de 10 cm de agua, por lo que debe ser combinado indirectamente disolviéndolo en H_2SO_4 concentrado.

El SO_3 reacciona en fase gaseosa con vapor de agua formándose ácido debido a la baja presión de saturación, bajo estas condiciones se une el agua con el ácido. Este proceso de absorción y concentración de los gases ocurre en la Torre de Absorción. El gas residual se envía a la atmósfera y el ácido sulfúrico obtenido es almacenado en el Estanque de Acido Sulfúrico para luego comercializar éste.

Figura 6: Diagrama de la Planta de Acido



3.1.2.7 Refinería Electrolítica

La función principal de la Refinería Electrolítica es la obtención de cátodos de cobre de alta pureza (99.9% Cu), a partir de la electrorefinación de los ánodos provenientes de Refino a Fuego.

El proceso de electrorefinación es la disolución de ánodo de cobre impuro proveniente de Refinería a Fuego y la posterior depositación del cobre puro en el cátodo mediante la inducción de corriente.

La Refinería produce cobre electrolítico, principalmente como cátodos grado A. El proceso genera barro anódico producto de la disolución del ánodo en el electrolito, desde donde se obtienen otros subproductos como selenio, telurio, plata y oro de alta pureza y un concentrado de platino-paladio.

La Refinería Electrolítica está formada por cinco sistemas operativos definidos según su función como:

- Preparación de Hoja madre.
- Producción de Cátodos comerciales.
- Recolección de barro anódico.
- Descubrización normal del electrolito.
- Purificación del electrolito.

3.1.2.8 Planta de Metales Nobles (PLAMEN)

El objetivo de la Planta de Metales Nobles es recuperar el Oro y la Plata que proviene de los barros anódicos producidos en la electrorefinación del cobre, para ello se desarrollan diversos procesos en esta planta.

La reacción global de electrólisis de cobre comprende la disolución del metal (ánodo de cobre) y su electrodeposición en el cátodo. Las impurezas contenidas en el ánodo pueden pasar como iones a la solución o precipitarse en el fondo de las celdas en forma de pulpa espesa, conocida como barro Anódico Crudo.

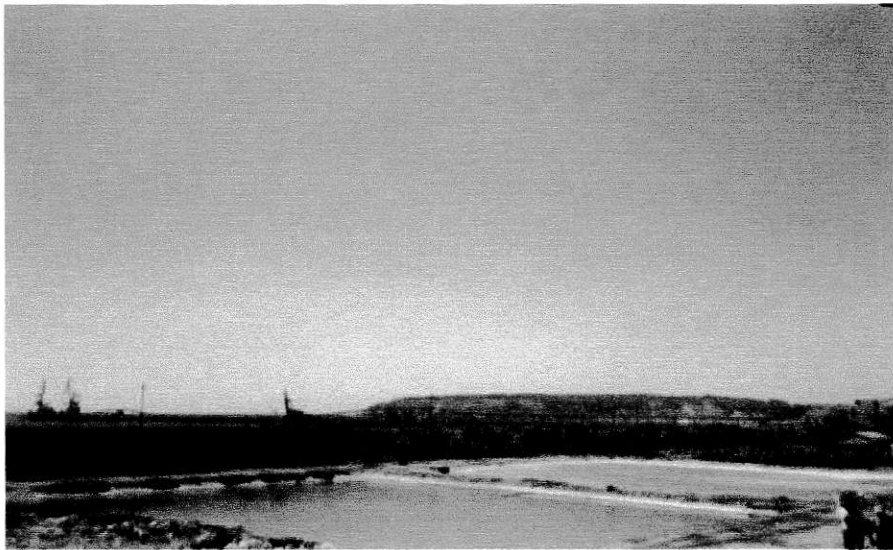
Los Metales Nobles (Au, Ag, Pt, Pd), que tienen un potencial de oxidación mucho más alto que el cobre, prácticamente no se disuelven en el electrolito, y caen desde los ánodos al fondo de las celdas constituyendo el barro anódico.

El barro anódico recepcionado (barro anódico crudo), ingresa al proceso de descubrización junto con electrolito, y sedimenta en varios estanques, mientras que el electrolito sobrenadante se filtra en un filtro prensa, el cual consta de placas y de telas filtrantes, para luego retornar a la Refinería Electrolítica. El barro decantado se envía a un estanque lixiviador, donde es tratado con ácido sulfúrico, oxígeno, aire y vapor de agua para así solubilizar el cobre contenido en él. A través de este proceso el cobre pasa a la solución obteniéndose un barro anódico descubrizado. También una parte importante del telurio presente en el barro original también se lixivia (aproximadamente el 50 %). La solución es tratada con cobre metálico, produciéndose la cementación de un barro de cobre-telurio, el cual es enviado a la planta de telurio para recuperar electrolíticamente dicho metal. La solución remanente, que principalmente es sulfato de cobre y ácido sulfúrico, es retornada a los estanques de recepción de pulpa en la Planta de Metales Nobles.

3.2 Descripción del Funcionamiento de las Piscinas de Decantación de Riles de la Fundición y Refinería Ventanas

Después de un tratamiento primario de los efluentes líquidos en su fuente, estos llegan a dos piscinas, las dimensiones de cada una son de 50 m * 50 m con una altura de 1,5 m las cuales están conectadas entre sí por medio de un ducto. El Ril puede ser descargado tanto a una piscina como a la otra. La siguiente figura muestra a ambas piscinas:

Figura 7: Piscinas de Decantación de Riles



Las piscinas generalmente operan en serie y actúan como estanques de homogenización ocurriendo la precipitación, floculación y sedimentación de los sólidos en suspensión remanentes, descargando un efluente final a la bahía y permitiendo la generación de lodos.

La intención de llevar a cabo estos procesos es tratar el Ril el cual contiene una variedad de metales pesados solubles y coloidales para que estos sean removidos y el efluente final pueda ser descargado a la bahía sin contaminarla.

La precipitación, floculación y sedimentación son procesos desarrollados para ser aplicados

como tratamiento a los residuos industriales líquidos que contienen partículas y metales pesados solubles. La precipitación remueve una sustancia en solución y la transporta dentro de una segunda fase, generalmente forma partículas sólidas, que en este caso son coloides. La floculación aglomera las partículas pequeñas en partículas más grandes para facilitar su remoción. La sedimentación remueve las partículas suspendidas desde el líquido.

El Ril normalmente fluctúa entre un pH 7 a un pH 8. La adición de floculante es realizada por la sección de tratamiento de agua de la empresa al Ril antes de llegar a las piscinas, la cantidad agregada es de 300 g/día de floculante Magna Flocc 351. El responsable de los lodos en la Fundición y Refinería Ventanas es el Jefe de Tratamiento de Aguas, Sr Mario Araya.

Los lodos que se generan por los procesos llevados a cabo en las piscinas, contienen metales pesados en la forma de partículas sólidas precipitadas formando sulfuros, hidróxidos o carbonatos de estos metales.

Los sedimentos generados constituyen la temática a estudiar en el presente trabajo, ya que se analizará la posibilidad de manejo, tratamiento y disposición final de éstos.

3.3 Fuentes Generadoras de los Lodos

Los lodos que se producen en las piscinas de decantación de Riles de acuerdo a los procesos anteriormente descritos en este capítulo, tienen 4 fuentes generadoras principales:

- Planta de Purificación de Electrolito.
- Planta de Metales Nobles.
- Planta de Ácido.
- Arrastre de sedimento y material particulado de lluvias.

Capítulo IV

Legislación sobre Residuos Industriales Sólidos Peligrosos

4.1 Marco Jurídico General

La normativa chilena aplicable a esta materia, atendiendo a su jerarquía, se puede clasificar en:

- Normas constitucionales.
- Normas legales.
- Normas reglamentarias.
- Otras normas.

Las principales normas constitucionales son las citadas a continuación:

- **Derecho a la Vida:** consagrado en el artículo 19 N°1. Garantiza a todos los habitantes del país, el derecho a la vida y a la integridad física y síquica de la persona. Corresponde a la autoridad, entonces, proteger la vida humana de la mejor forma posible, removiendo los factores que signifiquen un riesgo o amenaza de ésta.
- **Derecho a vivir en un Medio Ambiente libre de Contaminación:** artículo 19 N°8. La principal disposición constitucional que se refiere a la preservación del medio ambiente y que, por lo tanto, se vincula directamente con la necesidad de manejar y disponer adecuadamente los residuos, es esta garantía que impone dos mandatos constitucionales. Por una parte, reconoce a todas las personas “el derecho a vivir en un medio ambiente libre de contaminación”, y por otra, señala que “es deber del Estado velar para que este derecho no sea afectado y tutelar la preservación de la naturaleza”. Este segundo mandato constitucional es de gran importancia, para establecer regulaciones especiales en materia de residuos peligrosos y señala que “la ley podrá establecer restricciones específicas al ejercicio de determinados derechos o libertades para proteger el medio ambiente”. Esto

significa que una ley puede afectar determinados derechos (también garantizados constitucionalmente) a fin de proteger el medio ambiente.

- **Derecho a la Protección de la Salud:** artículo 19 N°9 asegura a todas las personas “el derecho a la protección de la salud”. En este sentido corresponde a las autoridades estatales, especialmente a las que tienen competencia en materia sanitaria y ambiental, establecer todas las regulaciones necesarias para dar una adecuada protección a este derecho, tanto en lo relativo a la salud individual (a que se refieren los demás incisos de esta norma) como en lo relativo a la protección de la salud pública.
- **Derecho a Desarrollar cualquier Actividad Económica:** artículo 19 N°21. Este derecho, es uno de los más importantes en materia de libertad económica, no es absoluto por cuanto reconoce algunos límites: la moral, el orden público, la seguridad nacional y las normas legales que regulan dicha actividad económica. Este último límite puede servir de fundamento para sujetar ciertas actividades económicas a regulaciones especiales, con el objeto de controlar la generación de los residuos, especialmente los residuos sólidos industriales peligrosos.
- **Derecho a la Propiedad:** artículo 19 N°24. Este derecho reconoce como una de sus limitaciones que derivan de su función social a la “conservación del patrimonio ambiental”. Esto significa, que este derecho puede ser limitado socialmente solo por ley en cuanto a sus facultades de usar, gozar y disponer, a objeto de conservar el patrimonio ambiental. Por tanto, se pueden establecer limitaciones al controlar la producción, generación, acopio, tratamiento y disposición final de los residuos peligrosos, ubicados o situados en los establecimientos industriales, con independencia de quien sea su titular, poseedor o dueño.
- **Deber del Estado de respetar y promover los Derechos esenciales del hombre garantizados por la Constitución y los Tratados Internacionales Vigentes:** artículo 5, inciso segundo. Esta norma tiene especial importancia por los tratados internacionales

vigentes en Chile que tienen relación con los residuos sólidos industriales, los que deben ser respetados como leyes nacionales.

En relación a la normativa de residuos peligrosos aplicable actualmente, cabe destacar principalmente:

a) Legislación Penal

- **El Código Penal:** contiene algunas normas que hacen referencia o podrían eventualmente aplicarse a los residuos peligrosos. Por ejemplo, se pueden citar las siguientes figuras penales: propagación de elementos peligrosos para la salud animal o vegetal; expendio de sustancias peligrosas para la salud; envenenamiento o infección de aguas.
- **La Ley de Seguridad Interior del Estado, Ley N°12.927** establece en su artículo 6 que cometen delito contra el orden público “los que inciten, promuevan o fomenten, o de hecho, envenenen alimentos, aguas o fluidos destinados al uso o consumo públicos” y “los que introduzcan al país, fabriquen, almacenen, transporten, distribuyan, vendan, faciliten o entreguen a cualquier título, o sin previa autorización escrita de la autoridad competente... explosivos, gases asfixiantes, venenosos o lacrimógenos...”.
- **La Ley N°18.892 General de Pesca y Acuicultura** establece una figura penal que puede relacionarse con el manejo de residuos peligrosos al sancionar penalmente la introducción de agentes contaminantes químicos, biológicos o físicos en el mar, ríos, lagos o cualquier otro cuerpo de agua, que causen daños a los recursos hidrobiológicos, sin que previamente hayan sido neutralizados para evitar tales daños

b) Código Sanitario

El Párrafo II, del Título IV, del Libro Tercero contiene normas específicas sobre sustancias tóxicas o peligrosas para la salud.

- **Reglamentación:** “el reglamento fijará las condiciones en que podrá realizarse la producción, importación, expendio, tenencia, transporte, distribución, utilización y eliminación de las sustancias y productos peligrosos de carácter corrosivo o irritante, inflamable, explosivos de uso pirotécnico y demás sustancias que signifiquen un riesgo para la salud, la seguridad o el bienestar de los seres humanos y animales” (artículo 90, inciso primero).
- **Importación o Fabricación:** el artículo 90, en su inciso segundo señala que los productos señalados en el inciso anterior no podrán ser importados o fabricados en el país, sin autorización previa del Servicio de Salud respectivo.
- **Control y Prohibición de Expendio:** el inciso tercero del mismo artículo faculta a los Servicios de Salud para controlar y prohibir en casos calificados el expendio de tales sustancias y productos, cuyo uso indiscriminado pueda dar origen a accidentes o intoxicaciones, así como para decomisarlos si las circunstancias lo requieren.

c) **D.F.L N°1 del Ministerio de Salud**

Señala que requieren autorización sanitaria expresa las siguientes materias relacionadas con la gestión de los residuos peligrosos: la importación y/o fabricación de sustancias químicas peligrosas para la salud; la acumulación y disposición final de residuos dentro del predio industrial, local o lugar de trabajo, cuando los residuos sean inflamables, explosivos o compuestos señalados en el artículo 20 del D.S N°594/99.

d) **Reglamento sobre Condiciones Sanitarias y Ambientales en los Lugares de Trabajo (D.S N°594/99).**

En cuanto al manejo de residuos peligrosos dispone que las empresas, sea que el tratamiento o la disposición se efectúe dentro o fuera del predio, directamente o a través de terceros, están obligadas a presentar previamente a la autoridad sanitaria una declaración en que conste la

cantidad y calidad de los residuos industriales, diferenciando claramente los residuos industriales peligrosos. Para efectos del Reglamento, se establece cuáles son los residuos peligrosos, mediante un listado, sin perjuicio que la autoridad sanitaria pueda calificar a otros como tales.

e) Ley N°3.133 de 1916, sobre Neutralización de Residuos Industriales y su Reglamento

Aunque esta ley no se refiere específicamente a los residuos peligrosos, establece la prohibición de vaciar los residuos líquidos en acueductos, cauces, lagos, etc., y hace referencia a que los residuos contengan “sustancias nocivas” a la bebida o al riego, que es una de las características que definen a los residuos peligrosos (la “nocividad”). El Reglamento, por su parte, contiene además una norma que se refiere a los lodos resultantes de los procesos de tratamiento de aguas, que son considerados residuos peligrosos, señalando que no pueden vaciarse en las aguas ni ser depositados en zonas donde se pueda contaminar las napas subterráneas. Sólo permite almacenarlos en sitios autorizados por el Servicio de Salud respectivo.

f) D.L N°2.222 sustituye Ley de Navegación (1978) y Reglamento para el Control de la Contaminación Acuática(1992)

La Ley de Navegación prohíbe absolutamente arrojar lastre, escombros o basuras y derramar petróleo o sus derivados o residuos, aguas de minerales u otras materias nocivas o peligrosas, de cualquier especie, que ocasionen daños o perjuicios en las aguas sometidas a la jurisdicción nacional, y en puertos, ríos y lagos. El Reglamento, a su vez, contiene algunas normas que establecen algunas prohibiciones de introducir en las aguas elementos peligrosos, nocivos o tóxicos (características propias de los residuos peligrosos) o exige autorizaciones y establece obligaciones para quienes realizan tales actividades.

g) D.L N°3063, Ley de Rentas Municipales

Se puede concluir de sus normas que esta ley habilita a las Municipalidades para cobrar tarifas especiales para los casos de extracción de residuos peligrosos, teniendo el productor de los mismos la posibilidad de ejecutar esta obligación por si mismo o encargándosela a un tercero.

h) Ley N°19.300

Establece que ciertos proyectos que se refieren a aspectos relacionados con el manejo de residuos peligrosos deben ingresar al SEIA. Por ejemplo, el artículo 10, letra ñ, incluye la producción, almacenamiento, transporte, disposición o reutilización habituales de sustancias tóxicas, explosivas, radioactivas, inflamables, corrosivas o reactivas. A su vez, establece las normas de calidad ambiental y las normas de emisión que pueden constituir valiosos instrumentos para regular ciertos aspectos del manejo de los residuos peligrosos.

i) Reglamento sobre el Transporte de Cargas Peligrosas por Calles y Caminos (D.S N°298/94 del Ministerio de Transportes)

Este reglamento establece las condiciones, normas y procedimientos aplicables al transporte de carga, por calles y caminos, de sustancias o productos que por sus características sean peligrosas o representen riesgos para la salud de las personas, para la seguridad pública o el medio ambiente. Se consideran sustancias peligrosas aquellas que se definen en las normas chilenas oficiales que se indican. Además establece la obligación de cumplir normas técnicas para los vehículos que transportan cargas peligrosas; condiciones de carga y manipulación; normas sobre circulación y estacionamiento; y una serie de obligaciones y responsabilidades para el transportista.

También son de importancia las Normas Oficiales Chilenas sobre la materia confeccionadas por el Instituto de Normalización. Algunas de ellas se pueden apreciar en el siguiente cuadro:

Tabla 1: Otras Normas

NORMA	MATERIA
NCH385.Of.55	Medidas de Seguridad en el Transporte de Materiales Inflamables y Explosivos.
NCH391.Of60	Medidas Adicionales de Seguridad en el Transporte de Explosivos y de Materias Inflamables.
NCH382.Of89	Sustancias Peligrosas- Terminología y Clasificación General.
NCH2120/1	Sustancias Peligrosas- Parte 1: Clase 1- Sustancias y objetos explosivos.
NCH2120/2	Sustancias Peligrosas- Parte 2: Clase 2- Gases comprimidos, licuados, disueltos a presión o criogénicos.
NCH2120/3	Sustancias Peligrosas- Parte 3: Clase 3- Líquidos inflamables.
NCH2120/4	Sustancias Peligrosas- Parte 4: Clase 4- Sólidos inflamables, sustancias que presentan riesgos de combustión espontánea, sustancias que en contacto con el agua desprenden gases inflamables.
NCH2120/5	Sustancias Peligrosas- Parte 5: Clase 5- Sustancias comburentes- Peróxidos orgánicos.
NCH2120/6	Sustancias Peligrosas- Parte 6: Clase 6- Sustancias venenosas tóxicas y sustancias infecciosas.
NCH2120/7	Sustancias Peligrosas- Parte 7: Clase 7- Sustancias radiactivas.
NCH2120/8	Sustancias Peligrosas- Parte 8: Clase 8- Sustancias corrosivas.
NCH2120/9	Sustancias Peligrosas- Parte 9: Clase 9- Sustancias varias.
NCH2190.Of.93	Sustancias Peligrosas- Marcas para la información de riesgos.

Capítulo V

Caracterización Química y Física de los Lodos

5.1 Plan de Muestreo

Se realiza un plan de muestreo para evaluar las características químicas y para la determinación de parámetros de interés de los lodos que vienen de las piscinas de decantación de Riles.

Para ello se desarrolla una metodología, considerando los puntos de muestreo y equipos para llevar a cabo la toma de muestra.

Los objetivos de desarrollar un plan de muestreo son:

- Cada muestra debe ser representativa en lo posible del total del lodo en el punto de muestreo.
- Debe minimizarse la posibilidad de contaminación de la muestra.
- La selección de la metodología debe ser segura, conveniente y eficiente.

Los procedimientos de muestreo más usados son:

1. Muestreo aleatorio simple: En este procedimiento se identifican todas las ubicaciones del residuo en análisis y se selecciona al azar la cantidad adecuada de muestras. Este procedimiento es recomendado cuando se conoce poco o nada acerca de la distribución de contaminantes en el residuo.
2. Muestreo aleatorio estratificado: En este caso el universo a muestrear es estratificado para aislar la fuente no aleatorio de distribución, muestrándose luego cada estrato por separado mediante un muestreo aleatorio simple.

3. Muestreo aleatorio sistemático: Aquí la primera unidad se muestra aleatoriamente y las demás se seleccionan a intervalos.

Otra opción consiste en realizar un compósito:

4. Compósito: Es cuando un gran número de individuales muestras son coleccionadas y luego son combinadas como una sola muestra para su posterior análisis, es ocupada cuando se quiere estimar un promedio de concentración. La ventaja es que reduce los costos analíticos y la desventaja es que la información acerca de los rangos de concentración no es determinada.

a) Colección de Muestra

Al coleccionar muestras es importante mantener su integridad, es debido a esto que hay que considerar:

- El material del contenedor de la muestra.
- La preparación del contenedor de la muestra.
- Preservación de la muestra.
- El tiempo en que se va a estar guardada ésta previa al análisis.

b) Contenedor de Muestra

El material que se escoge como contenedor en el caso de los metales es plástico. Es necesario la preparación del contenedor para evitar la contaminación de la muestra, es por esto que deben ser lavados con detergente, enjuagados con agua potable, agua destilada y secados al aire. Se recomienda para la preparación de los contenedores los cuales van a recibir muestras con metales que se laven y enjuaguen como se describió anteriormente.

c) Preservación de la Muestra

En general todas las muestras deben ser preservadas a 4°C, en el caso de metales se recomienda además que estos sean preservadas con ácido nítrico concentrado a pH<2.

d) Tiempo de Conservación previo al Análisis

El tiempo de conservación de las muestras se indica a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 2: Tiempo de Conservación previo al Análisis

PARAMETROS	MATERIAL CONTENEDOR	PRESERVACION	MAXIMO TIEMPO GUARDADO	MINIMO VOLUMEN DE MUESTRA
Mercurio	Plástico	HNO ₃ a pH<2	28 días	500 mL
Metales excepto Hg	Plástico	HNO ₃ a pH <2	6 meses	1000 mL

e) Empacado de las Muestras

Los contenedores que contengan las muestras deben ser protegidos y así de este modo reducir el riesgo de derrame, éstos deben estar aislados en una nevera con hielo para poder mantener la temperatura de la muestra a 4°C y así transportarlos. Las muestras que se reciben en forma de pulpa es necesario secarlas al aire.

5.2 Muestreo

El calendario y lugar de muestreo realizado se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 3: Calendario de Muestreo

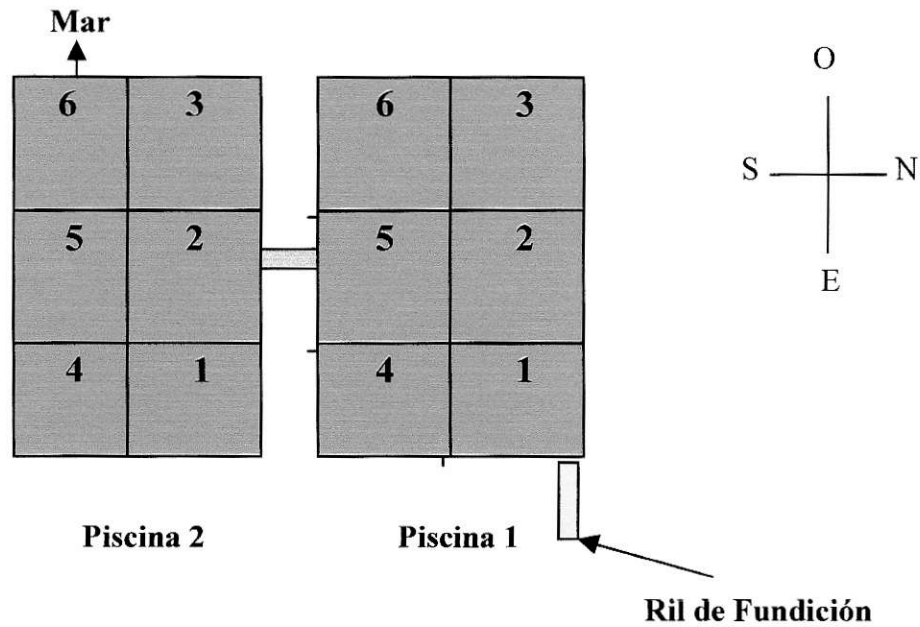
Nº MUESTREO	FECHA	UBICACIÓN
1	5-12-2000	Piscina Norte y Piscina Sur
2	15-3-2001	Piscina Secado
3	12-4-2001	Piscina Secado

5.2.1 Descripción del Muestreo N°1

El muestreo que se realizó en las piscinas decantación de la Fundición y Refinería Ventanas de ENAMI (piscinas norte y sur), fue llevado a cabo por personal de la Empresa, donde se seleccionaron seis sectores de toma de muestra para cada piscina. De los seis sectores se obtuvo una cantidad determinada de lodo. Con esta división se pretende obtener muestras que son representativas, muestras bien mezcladas y además muestras del lodo de diferentes puntos de la piscina.

La siguiente figura muestra lo anteriormente descrito:

Figura 8: Distribución de los Puntos de Muestreo



El equipo utilizado para llevar a cabo la toma de muestra consistió en un tubo donde en uno de sus extremos tiene un recipiente de plástico amarrado. En el transporte al interior de la piscina se utilizó un bote con remos.

La muestra del lodo representó la fracción sólida/líquida lo mejor posible ya que algunos contaminantes están asociados a la parte sólida, especialmente metales precipitados, y otros están más asociados con la fracción líquida.

Durante el muestreo se consideró:

- Todo el equipo de muestreo fuera lavado después de cada toma de muestra para evitar la contaminación de estas.
- Las muestras tomadas fueron guardadas en 12 botellas de plástico boca ancha, preservándolas con ácido nítrico a $\text{pH} < 2$.

- Las muestras se identificaron de acuerdo a la distribución mostrada en la figura anterior de la siguiente manera:

a) M- 1 A, M- 2 A, M- 3 A, M- 4 A, M- 5 A, M- 6 A, para la piscina 1.

b) M- 1 B, M- 2 B, M- 3 B, M- 4 B, M- 5 B, M- 6 B, para la piscina 2.

Las muestras una vez coleccionadas fueron entregadas al Laboratorio Químico de Ventanas, el cual se encargó del tratamiento de la muestra y de su análisis químico, de acuerdo a los procedimientos para sólidos propios de la ENAMI.

En los análisis que se realizaron en los lodos se determinó el contenido total de metales. Los metales analizados fueron los siguientes: Cu, Au, Ag, Fe, As, Sb, Pb, Ni, Cd, Hg.

5.2.2 Descripción del Muestreo N°2

La piscina de secado corresponde a una piscina 3 construida durante la etapa de secado (está será descrita en el capítulo de "Manipulación de los Lodos), ésta tiene el lodo contenido anteriormente en la piscina 1. Debido a eso la piscina se considera que es un compuesto de la piscina 1 donde una gran cantidad de muestras individuales son coleccionadas y luego combinadas.

Las muestra una vez coleccionada y homogenizada fue entregada al Laboratorio Químico de Ventanas.

Los metales analizados fueron: Cu, Au, Ag, Fe, As, Sb, Pb, Ni, Cd, Hg, Zn, Se, Te. Además se analiza el contenido de cobre soluble.

La muestra homogeneizada también fue enviada al Centro de Investigaciones Metalúrgicas (CIMM) para la realización del Test TCLP.

El Test TCLP (Procedimiento de Lixiviación para las Características de Toxicidad), está

diseñado para simular la lixiviación a que podría estar expuesto un residuo que se dispone en un botadero. El procedimiento básicamente consiste en la lixiviación de la muestra con una solución apropiada de ácido acético, por espacio de aproximadamente 18 horas a temperatura y agitación controlada. El extracto obtenido después de la lixiviación es analizado para determinar si presenta cualquiera de los elementos considerados como peligrosos, en concentraciones superiores a las máximas permisibles. Los elementos inorgánicos que se regulan son: As, Ba, Cd, Cr, Pb, Hg, Se y Ag.

El líquido obtenido del test TCLP se mezcla con el filtrado preservado y se analiza mediante el ICP.

5.2.3 Descripción del Muestreo N°3

Este muestreo fue realizado en la piscina de secado bajo los mismos procedimientos del muestreo N°2. La muestra una vez coleccionada y homogeneizada fue entregada al Laboratorio Químico de Ventanas.

Los metales analizados fueron: Cu (total), Cu (soluble), Au, Ag, Fe, As, Pb, Cd, Hg, Sb, Se.

Esta muestra homogeneizada también fue enviada al Laboratorio Metalúrgico Planta Vallenar para la determinación de parámetros físicoquímicos de interés. Estos parámetros fueron: densidad aparente, peso específico, consumo de ácido sulfúrico y pH.

a) Densidad aparente

La densidad aparente del lodo es la relación de la masa al volumen macroscópico ocupado por las partículas del lodo junto con el espacio poroso, determinando la masa por pesado de la muestra desecada a 105°C. La determinación se efectúa en muestras cilíndricas sin alterar el suelo, pesando un volumen conocido del mismo, y llevado a la sequedad en su estado natural. Este valor se expresa en gramos por centímetro cúbico del suelo o lodo. Este parámetro

adquiere importancia ya que me va indicar la porosidad que presente el lodo mientras menor sea el valor me indica que éste es más poroso y mientras mayor me va indicar que está más compactado, por lo tanto si éste es depositado temporalmente vamos a saber su grado de infiltración.

b) Peso Específico

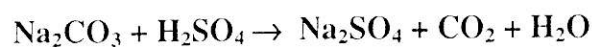
La propiedad física peso específico, es decir, la relación peso a volumen, tiene importancia en los sólidos. El peso específico se utiliza en el sistema de unidades cegesimal, al elegir el peso de un centímetro cúbico de agua como unidad de peso, es en realidad un peso específico relativo y, por consiguiente, viene representado por el mismo número que su densidad. Esto explica que corrientemente se conozca entre los industriales con el nombre de densidad, que tiene para ellos un mayor significado, aunque físicamente, el concepto de peso específico, relación de peso a volumen, es completamente diferente al de densidad, relación de masa a volumen.

Por definición :

$$\text{Peso Específico} = \text{Peso} / \text{Volumen}$$

c) Consumo de Acido Sulfúrico

Este método consiste en lixiviar mineral con una cantidad determinada de H_2SO_4 , donde se atacan los carbonatos y otros componentes de la muestra quedando un remanente de ácido, el cual se valora con una solución de Na_2CO_3 . Por diferencia se calcula el ácido consumido en el ataque y se expresa en relación a la cantidad de cobre disuelto en las mismas condiciones. La reacción es la siguiente



d) pH

El pH de un sólido se mide potenciométricamente en el sobrenadante de una suspensión de una mezcla sólido: líquido en la proporción de 1 : 2,5. El líquido puede ser agua (pH-H₂O), KCL 1M (pH-KCL) o CaCL₂ 0,01 M (pH- CaCL₂).

5.3 Resultados

5.3.1 Resultados Muestreo N°1

- Metales

Los resultados de la caracterización de metales de la piscina 1 y piscina 2 realizada por el Laboratorio Químico de Ventanas se indican a continuación:

Tabla 4: Resultados de Metales Piscina 1

ELEMENTO	M-1"	M-2A	M-3A	M-4A	M-5A	M-6A	PROMEDIO
Cu %	4,9	5,9	5,6	6,1	4,5	3,7	5,1
Au g/ton	3,0	2,6	3,0	1,2	7,0	3,0	3,3
Ag g/ton	95	85	70	33	120	55	76
Fe %	5,0	4,6	4,0	4,0	5,0	4,7	4,6
As %	9,08	11,96	7,68	14,00	12,02	10,07	10,80
Sb %	0,024	0,022	0,021	0,028	0,047	0,032	0,029
Pb %	0,71	0,66	0,44	0,67	0,60	0,47	0,59
Ni %	0,97	0,27	0,41	0,13	0,28	0,25	0,39
Cd ppm	1342	1848	1222	3930	2265	1634	2040
Hg ppm	1783	1092	717	997	1151	934	1112

Tabla 5: Resultados de Metales Piscina 2

ELEMENTO	M-1B	M-2B	M-3B	M-4B	M-5B	M-6B	PROMEDIO
Cu %	2,5	3,3	3,0	2,5	2,8	3,5	2,9
Au g/ton	4,4	3,6	4,4	4,0	4,4	4,0	4,1
Ag g/ton	105	55	70	73	72	80	76
Fe %	6,1	2,5	2,3	4,8	3,8	4,2	4,0
As %	3,5	7,27	6,06	3,02	5,36	6,47	5,28
Sb %	0,011	0,0020	0,014	0,008	0,010	0,015	0,010
Pb %	0,61	0,21	0,16	0,26	0,20	0,31	0,29
Ni %	0,31	1,28	1,12	0,37	1,04	1,19	0,89
Cd ppm	344	674	534	290	502	612	493
Hg ppm	2095	1145	1303	1135	1454	1612	1457

5.3.2 Resultados Muestreo N°2

- **Metales**

Los resultados de la caracterización de metales de la piscina de secado realizada por el Laboratorio Químico de Ventanas se indican a continuación

Tabla 6: Resultados de Metales Piscina Secado

ELEMENTO	CONCENTRACIÓN
Cu total %	5,0
Cu soluble %	4,0
Au g/ton	4,0
Ag g/ton	95
Fe %	4,7

As %	6,28
Sb %	0,03
Pb %	0,11
Ni %	0,19
Cd ppm	1770
Hg ppm	2643
Zn %	5,34
Se %	0,084
Te ppm	184

- **Test TCLP**

Los resultados de la evaluación de la toxicidad de la muestra de lodo a través del TCLP, se muestran a continuación:

Tabla 7: Resultados Test TCLP

ELEMENTOS	CONCENTRACIÓN	VALOR REGULADO EPA
As mg/L	499	5,0
Ba mg/L	<0,5	100
Cd mg/L	13	1,0
Cr mg/L	<0,05	5,0
Hg mg/L	-----	0,2
Pb mg/L	<0,2	5,0
Ag mg/L	<0,02	5,0
Se mg/L	-----	1,0

5.3.3 Resultados Muestreo N°3

- Metales

Los resultados de la caracterización de metales de la piscina de secado realizada por el Laboratorio Químico de Ventanas se indican a continuación

Tabla 8: Resultados de Metales Piscina Secado

ELEMENTO	CONTENIDO
Cu Total %	4,8
Cu soluble %	3,85
Au g/ton	2,2
Ag g/ton	50
Fe %	4,36
As %	9,27
Pb %	0,74
Cd ppm	1603
Hg ppm	2536
Sb %	0,038
Se %	0,074

- **Parámetros Físico-Químicos**

En la siguiente tabla se muestran los parámetros determinados en los lodos:

Tabla 9: Parámetros Físico-Químicos

PARÁMETRO	CONTENIDO
pH (H ₂ O)	7,8
Peso específico	3,63 g/mL
Consumo de ácido	7,62 Kg de ácido/ Kg de cobre
Densidad aparente	0,81 g/mL
Masa Lodo Calculada	2430 ton

La masa del lodo se calcula para la piscina 1, donde ésta tiene dimensiones de 50m * 50m con una altura de 1,2 m al ducto de conexión. La siguiente tabla muestra el cálculo para la estimación de la masa del lodo:

Tabla 10: Determinación Masa Lodo

	DENSIDAD APARENTE (TON/ M ³)	VOLUMEN ESTIMADO (M ³)	MASA CALCULADA (TON)
PISCINA 1	0,81	3000	2430

5.4 Análisis y Discusión de Resultados

1. La caracterización química de los metales pesados en el lodo en los diferentes puntos escogidos en el muestreo N°1 no indica una tendencia definida, donde no destaca la acumulación de metales por alguna zona en especial, de acuerdo a esto es conveniente trabajar con concentraciones promedios.
2. La concentración promedio de cobre en el lodo arrojó un resultado para la piscina 1 de 5% y de 2,9%, debido a esto el lodo presenta un valor agregado por lo que resulta interesante una recuperación del cobre de éste.
3. Las concentraciones de metales pesados que más destacan en promedio para cada piscina son:

Tabla 11: Concentraciones promedio Piscina 1 y Piscina 2

ELEMENTO	PISCINA 1	PISCINA 2
Au g/ton	3,3	4,1
Ag g/ton	76	76
Fe %	4,6	4,0
As %	10,8	5,28
Cd ppm	2040	493
Hg ppm	1112	1457

4. El muestreo N°2 realizado en la piscina de secado se llevó a cabo mediante un compósito para estimar concentraciones promedio de metales pesados y tiene como finalidad evaluar los cambios de concentración que puede experimentar el lodo en el tiempo, para tener otro patrón de referencia, para evaluar otros metales pesados de interés y además para evaluar la peligrosidad de los lodos. Los lodos presentes en la piscina de secado corresponden a

un vaciado de la piscina 1 que será descrito en el capítulo de manipulación de lodos. Al comparar las concentraciones de ambos muestreos se observa cambios en la composición de éstos en el tiempo donde destacan principalmente:

Tabla 12: Comparación resultados Piscina 1 y Piscina Secado

ELEMENTO	PISCINA 1	PISCINA SECADO
Au g/ton	3,3	4,0
Ag g/ton	76	95
As %	10,8	6,28
Cd ppm	2040	1770
Hg ppm	1112	2643

- Además en este análisis se agregaron otros metales de interés en el lodo como zinc, selenio y telurio arrojando concentraciones de:

Tabla 13: Concentración de otros Metales Analizados

ELEMENTO	CONTENIDO
Zn %	5,34
Se %	0,084
Te ppm	184

- El análisis de cobre soluble dio un resultado de 4,00%, esto indica que comparándolo con el cobre total, que cerca del 80% del cobre presente en el lodo podría ser recuperado en una eventual lixiviación ácida de éste.
- La evaluación de la peligrosidad de los lodos, realizada mediante el Test TCLP indica un alto riesgo de lixiviación del arsénico y cadmio ambos sobrepasando las concentraciones máximas permisibles.

8. La caracterización química del muestreo N°3 tiene como finalidad ser ocupada como cabeza para un trabajo de laboratorio efectuado en la última etapa de trabajo (ver capítulo “Estudio de Alternativa”). Al comparar el muestreo N°2 y N°3 que fueron realizados en la misma piscina se observan las principales diferencias en los siguientes metales:

Tabla 14: Comparación Muestreo N°2 y N°3

ELEMENTO	MUESTREO N°2	MUESTREO N°3
Au g/ton	4,0	2,2
Ag g/ton	95	50
As %	6,28	9,27

9. Los parámetros estudiados servirán como base para la última parte de este trabajo (ver capítulo “Estudio de Alternativa”). Mediante la densidad aparente se estima la masa de lodo para la piscina I dando un valor de 2430 toneladas.
10. Finalmente de acuerdo a los resultados obtenidos podemos decir que a pesar del valor agregado que presenta el lodo, éste también es un residuo peligroso, por lo que puede causar daños tanto a la salud humana como al ambiente.

Capítulo VI

Determinación de la Peligrosidad del Lodo

6.1 Identificación del Lodo por Categoría (Listado 333 Residuos)

La identificación del lodo por categoría se basa en las categorías de residuos utilizada por el Servicio de Salud del Ambiente de la Región Metropolitana (SESMA) y en la lista de los 333 residuos, esta última es un estudio denominado “Diagnostico e Identificación de Tecnologías y Estrategias para el Manejo de Residuos Industriales Sólidos” encargado por CONAMA RM, con el objeto de mejorar el sistema de declaración y seguimiento de los Rises dispuesto por la Resolución N°5081/93, del SESMA. El listado denomina y codifica con números, los distintos tipos o clases de residuos según su composición química, constituyentes, fuentes de origen (procesos o rubros industriales) o simplemente según su nombre más común usado por industriales y fiscalizadores. Permite uniformar las denominaciones dadas a los residuos o tipos de residuos, para su fácil manejo y facilita su sistematización, al contar con códigos numéricos.

La siguiente tabla muestra el código en que puede ser clasificado el lodo:

Tabla 15: Identificación del Lodo por Categoría

NOMENCLATURA	CATEGORÍA DE RESIDUOS	CODIGOS DE RESIDUOS PELIGROSOS	DESCRIPCIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS
C-3	Lodo inorgánico	222	Lodo tóxico secado o desaguado

6.2 Determinación de Peligrosidad según Rubro Especifico

En la determinación de la peligrosidad según rubro específico se utiliza el Catálogo de Residuos contenido en la “Guía Metodológica de Procesamiento para la Confección y Revisión de Planes de Manejo de Residuos Peligrosos”, la cual indica los residuos de más posible generación en las actividades industriales, identificadas según su Código Industrial Internacional Uniforme (CIU). Posteriormente la tabla implica la peligrosidad de cada residuo, de acuerdo a la normativa norteamericana (EPA), el Convenio de Basilea, la norma de la Unión Europea. Por último, considerando las normas antes mencionadas y el tipo de actividad en que se generan los residuos, se concluye si estos son peligrosos o no, o si es necesario realizar un análisis más detallado, para determinar su peligrosidad.

En el caso de la Fundición y Refinería Ventanas, ésta se clasifica según su rubro como una industria básica del cobre, donde el CIU que le corresponde es el N°3721. Los residuos sólidos que potencialmente pueden generar no están incluidos y por lo tanto no se hace una clasificación en cuanto a la peligrosidad de sus Reses.

Utilizando el código del residuo en el que se identificó al lodo (ver tabla N°15) y ocupando estos en otros rubros se determina que los lodos generados por la Fundición y Refinería Ventanas cae en la siguiente clasificación ocupando el catálogo:

Tabla 16: Lista de Residuos Generados según CIU

CODIGO CIU	DESCRIPCIÓN RUBRO	CODIGO RIS	EPA. LISTA F Y K	BASILEA	NORMATIVA EUROPEA	COMENTARIO
3721	Industria básica del cobre	222	N/E	N/E	N/E	-

Siguiendo la clasificación del catálogo que determina si el residuo es peligroso o no, en el caso del lodo:

Tabla 17: Determinación Peligrosidad según Rubro Específico

CÓDIGO RIS	DESCRIPCIÓN RIS	¿PELIGROSO?
222	Lodo tóxico desaguado	Si

6.3 Determinación de la Peligrosidad según Categorías del Reglamento

6.3.1 Categoría I

De acuerdo al borrador del “Reglamento de Manejo de Residuos Peligrosos” del Ministerio de Salud, en la Categoría I el lodo presenta la siguiente peligrosidad:

Tabla 18: Peligrosidad del Lodo Categoría I

TIPO DE RIS	CANTIDAD	PELIGROSIDAD SEGÚN REGLAMENTO
Lodo	2430 Ton.	Y18

La peligrosidad que corresponde a Y18, son residuos resultantes de las operaciones de eliminación o tratamiento de residuos tales como lodos, filtros, polvos, etc.

6.3.2 Categoría II

En la Categoría II del mismo borrador del reglamento, se cuenta con residuos los cuales tienen como constituyentes diferentes metales donde el lodo de acuerdo a la caracterización química presenta los siguientes:

Tabla 19: Peligrosidad del Lodo Categoría II

TIPO DE RIS	CANTIDAD	PELIGROSIDAD SEGÚN REGLAMENTO
Lodo	2430 Ton.	Y22- Y23- Y24- Y25- Y26- Y27- Y28- Y29- Y30- Y 31.

La peligrosidad asignada corresponde a los siguientes constituyentes:

Tabla 20: Categoría II

CATEGORÍA II	RESIDUOS QUE TENGAN COMO CONSTITUYENTES
Y 22	Compuestos de Cobre
Y 23	Compuestos de Zinc
Y 24	Compuestos de Arsénico
Y 25	Compuestos de Selenio
Y 26	Compuestos de Cadmio
Y 27	Compuestos de Antimonio
Y 28	Compuestos de Telurio
Y 29	Compuestos de Mercurio
Y 31	Compuestos de Plomo

6.4 Clasificación del Lodo según NCh382.Of98 y NCh2120/1.Of98 a la NCh2120/9.Of98

El lodo se clasifica de acuerdo a esta legislación que se refiere a sustancias peligrosas como:

Tabla 21: Clasificación del Lodo según NCh382.Of98 y NCh2120/1.Of98 a la NCh2120/9.Of98

SUSTANCIA U OBJETO		RIESGO	NÚMEROS		
NÚMERO N.U (A.1)	NOMBRE Y DESCRIPCIÓN (A2)	CLASE O DIVISIÓN (B1)	D.O.T (D1)	GRENA (D2)	I.M.D.G (D3)
3288	Sólido Tóxico inorgánico	6.1	53	151	6270-6
3077	Sustancia sólida potencialmente peligrosa para el medio ambiente	9	31	171	9029

- **Clase 6, División 6.1**

Sustancias venenosas (tóxicas): Sustancias que pueden causar la muerte o lesiones graves o que pueden ser nocivas para la salud humana y/o animal si se ingieren o inhalan o si entran en contacto con la piel.

- **Clase 9**

Sustancias que presentan un riesgo distinto a los correspondientes a las demás clases.

6.5 Determinación de las Características de Peligrosidad del Lodo

Las características de peligrosidad que presenta el lodo de acuerdo a su caracterización química y la determinación de su peligrosidad es la característica de toxicidad la cual según el borrador del “Reglamento de Manejo de Residuos Sólidos Peligrosos” se divide en: toxicidad extrínseca, toxicidad aguda y toxicidad crónica.

6.5.1 Toxicidad Extrínseca

La toxicidad extrínseca del lodo quedó determinada por el Test TCLP (ver Capítulo “Caracterización Química y Física de los Lodos”), donde la peligrosidad de los lodos, indica un alto riesgo de lixiviación del arsénico y cadmio ambos sobrepasando las concentraciones máximas permisibles.

Tabla 22: Toxicidad Extrínseca

ELEMENTOS	CONCENTRACIÓN	VALOR REGULADO EPA
As mg/L	499	5,0
Cd mg/L	13	1,0

6.5.2 Toxicidad Aguda y Toxicidad Crónica

La magnitud de los efectos que puede presentar una sustancia tóxica depende, de la cantidad de la sustancia absorbida, inhalada e ingerida y de la respuesta que presente una población, y de este modo se puede estimar la toxicidad de la sustancia. La respuesta tóxica y su magnitud además van a depender de muchos otros factores como son:

- El sexo.
- La edad.

- El peso.
- La predisposición genética.
- Las exposiciones previas a las mismas u otras sustancias.
- El estado de salud.
- La dieta.
- Los factores ambientales (por ejemplo la densidad de la población).
- El efecto sinérgico de varios metales sobre los cromosomas.

Los efectos tóxicos pueden ser clasificados como agudos o crónicos, donde la toxicidad aguda se refiere a una respuesta observable inmediata del organismo a una sustancia tóxica. Generalmente la toxicidad aguda resulta de una corta exposición a relativamente altas concentraciones de sustancias. La toxicidad crónica es aquella que se manifiesta después de largos periodos de tiempo. Pueden tener un periodo de latencia de varias décadas en seres humanos. Los efectos crónicos son difíciles de estudiar, ya que su manifestación es sobrepuesta por enfermedades normales. Resultan de exposiciones a concentraciones bajas por largos periodos de tiempo.

El lodo no fue sometido a estudios de toxicidad aguda y toxicidad crónica pero se entiende que puede presentar estas toxicidades debido a sus características.

Capítulo VII

Manipulación de Lodos

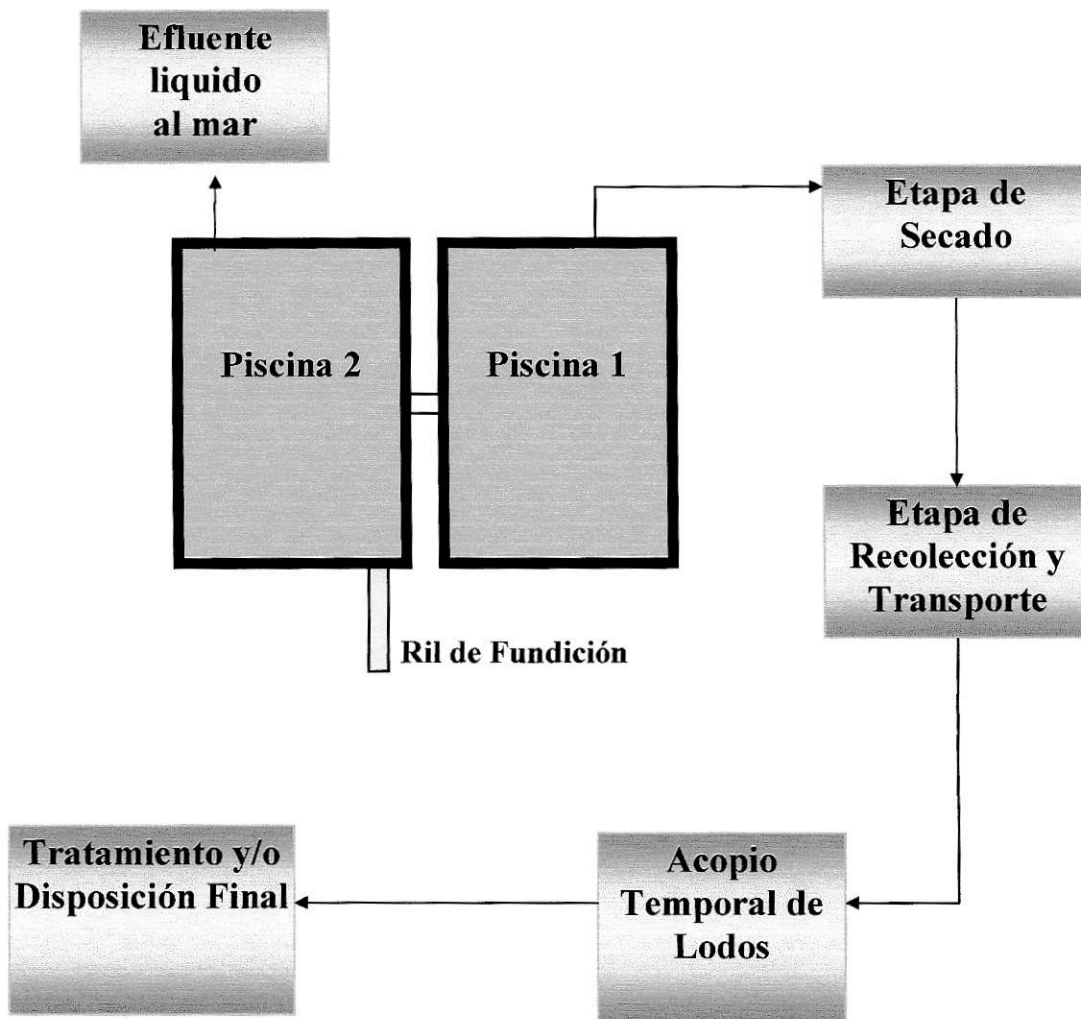
Los requerimientos que implica la manipulación de los lodos, considera su modo de secado, recolección, transporte, envasado, etiquetado, el equipamiento, seguridad y higiene y acopio temporal.

La manipulación de los lodos se dividió en:

- Etapa de Secado.
- Etapa de Recolección y Transporte Interno de Lodos.
- Acopio Temporal.
- Tratamiento y Disposición final.

El siguiente esquema muestra estas etapas:

Figura 9: Diagrama de Manipulación de Lodos



Las zonas donde se realicen las actividades de manipulación deben:

- Estar debidamente señalizadas.
- Mantener los pisos de la zona de manipulación de los lodos libres de obstáculos que impidan un fácil y seguro desplazamiento de los operarios involucrados en estas tareas.
- Contar con el espacio suficiente para la manipulación de los lodos de acuerdo al volumen a manipular.

- No interferir en ningún caso u oportunidad, con el resto de las tareas habituales, tanto de los procesos productivos, como de las áreas administradas del recinto industrial.

7.1 Etapa de Secado

La etapa de secado consideró la piscina 1, ya que es la que presenta mayores dificultades por la cantidad de lodo presente en ella. En una inspección visual realizada se observa que estos se encuentran ocupando toda la superficie de la piscina.

La siguiente figura muestra a la piscina 1:

Figura 10: Piscina de Decantación de Riles



En el secado del lodo en la piscina 1 se recomienda en una primera etapa considerar los siguientes pasos:

- Desviar el conducto de Riles hacia la piscina 2.
- Cerrar el conducto de unión de ambas piscinas.
- Una vez seca la piscina 1, realizar operaciones de carga y descarga (éstas se señalan más adelante).

- Conectar luego ambas piscinas y seguir con su funcionamiento normal.

Estas labores deben efectuarse durante el verano de modo de ocupar la energía solar para desaguar el lodo y que la piscina actúe como “laguna de secado”. Antes de comenzar a realizar esta primera etapa se debe considerar:

- Durante el secado de la piscina 1, el ducto de Riles quedará conectado a la piscina 2 la cual va directamente al mar, y esta posiblemente estará operando a su máxima capacidad, y donde la eficiencia de los procesos de precipitación, floculación y sedimentación van a disminuir, ya que el tiempo de residencia va a ser menor, y por lo tanto la cantidad de contaminantes al mar, podría aumentar.
- Un control del pH de los Riles que llegaría a la piscina 2.
- En caso de producirse un evento de emergencia realizar una neutralización in-situ.

En una segunda etapa de secado para volver al normal funcionamiento de las piscinas, se deberá remover el lodo de la piscina 1 y trasladarlo a una piscina auxiliar (o piscina 3).

A modo de ejemplo se muestra la celda de acopio temporal utilizada por la Fundición y Refinería Ventanas para otro residuo, el polvo P.E.P.A.

Figura 11: Piscina de Secado

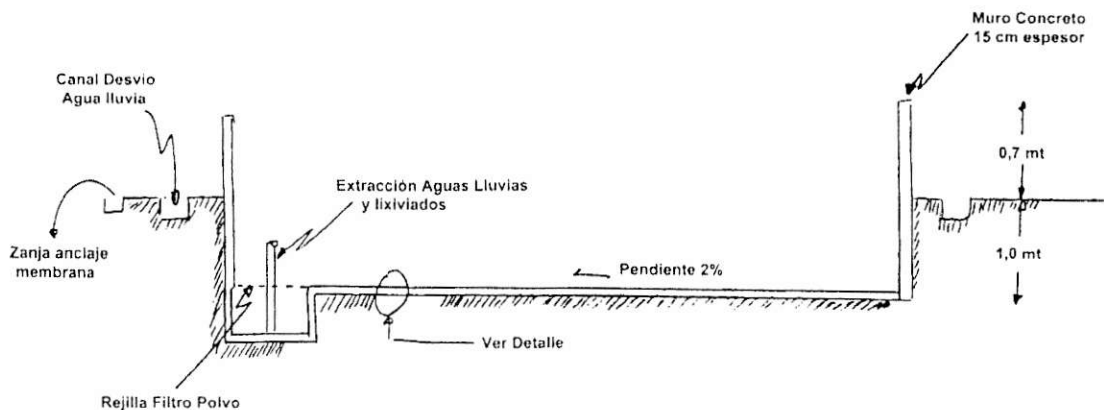
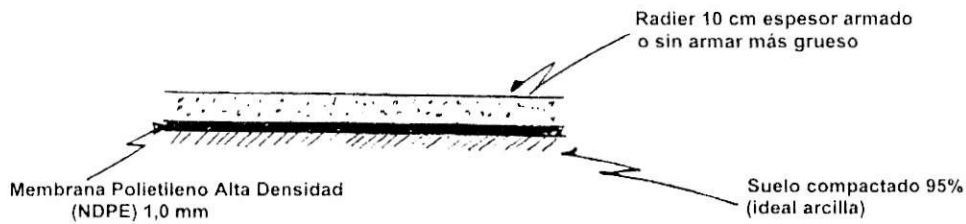


Figura 12: Detalle de Piscina de Secado



Esta contempla un radier de almacenamiento excavado de 1 m con una profundidad total de 1,7 m. Esta celda se encuentra aislada por medio de una carpeta impermeable de polietileno de alta densidad de 1 mm de espesor y una capacidad de almacenamiento de 450 toneladas. Los lixiviados generados se recolectan mediante un pozo de recolección y son bombeados en forma automática a un estanque.

El secado de lodos posiblemente va a requerir un largo tiempo, por lo tanto se recomienda que en periodos de lluvia la piscina auxiliar sea tapada por una carpeta impermeable de nylon recubierta con PVC.

7.2 Recolección y Transporte Interno

7.2.1 Recolección Lodos

Luego del secado de lodo de la piscina 1 en la primera etapa, se propone para la recolección y traslado del lodo a la piscina auxiliar utilizar:

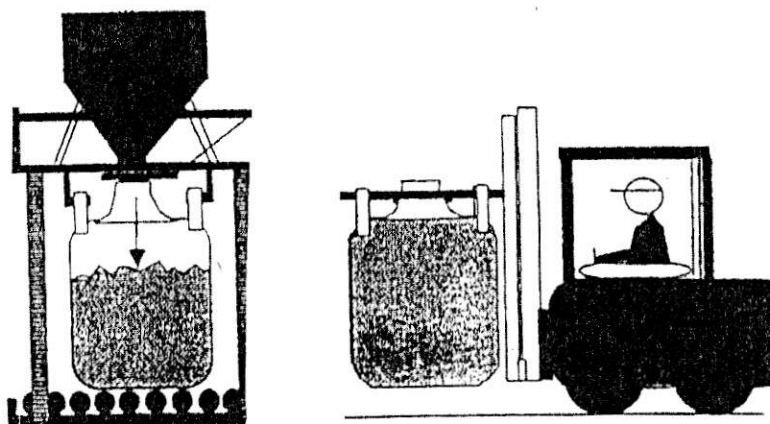
- Una pala cargadora.
- Una bomba para lodos.
- Posibilidad de ocupar pala y carretilla.

Los lodos una vez secos en la piscina auxiliar deben ser trasladados a su punto de acopio temporal, para realizar esta operación se recomienda que sean ensacados en bolsas maxibags, con doble cubierta, las cuales son de polietileno y permiten:

- Controlar la fuga de posibles lixiviados.
- Controlar la emisión de polvo al ambiente.
- Permite el traslado hermético de los lodos.

La forma de ensacar los lodos se muestra en la siguiente figura:

Figura 13: Ensacado de Lodos



a) Condiciones Mínimas Generales de Recolección

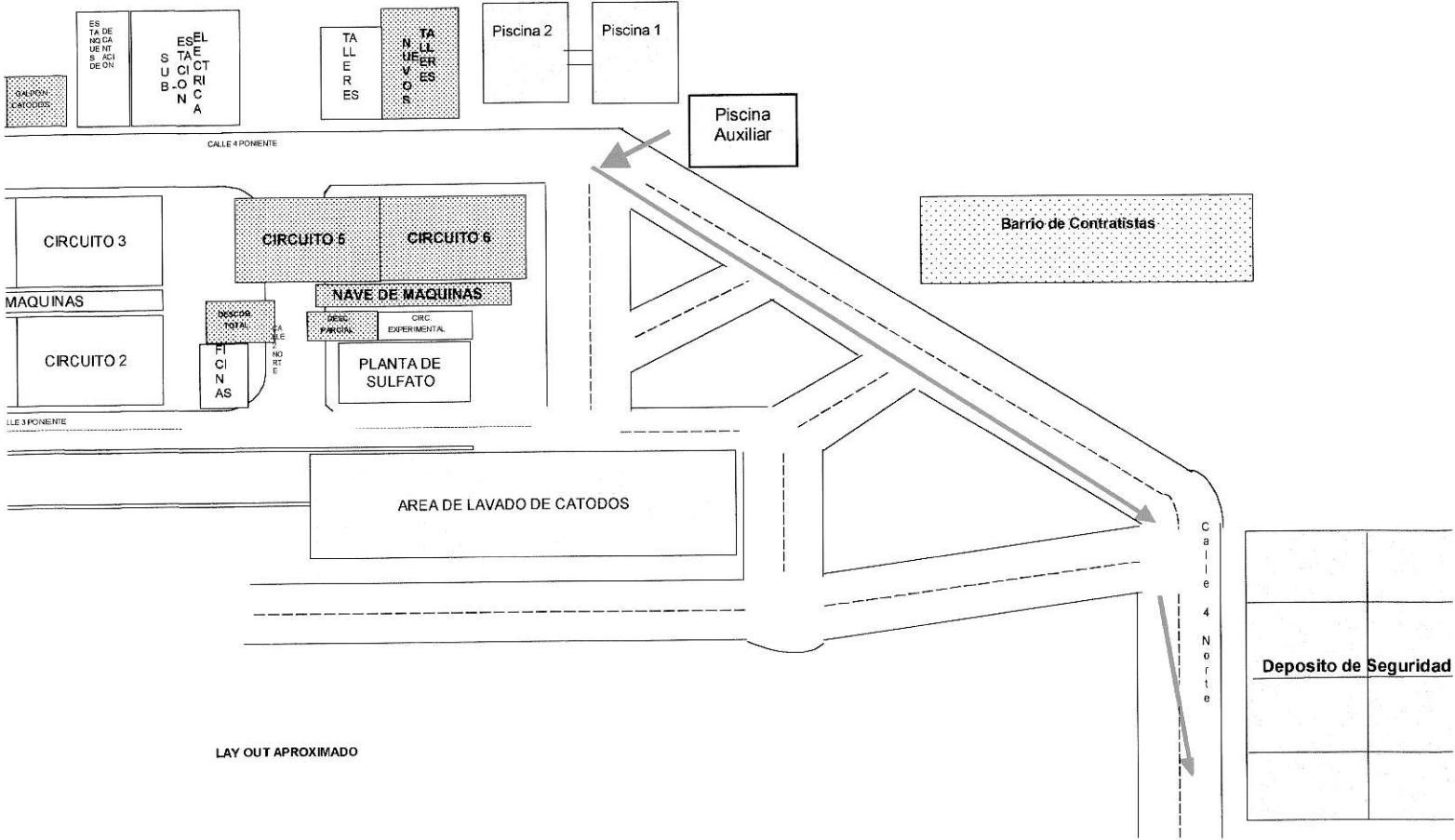
- Dar a conocer al personal involucrado los riesgos asociados a su labor debido a la naturaleza del residuo y el nivel de toxicidad de estos.
- Etiquetar las bolsas maxibags por ambos lados y verificar que estos queden correctamente etiquetados.
- Verificar los cierres, calidad e integridad de las bolsas maxibags. El contenido de las bolsas no debe exceder el 95% de su capacidad máxima.

- Debe evitarse que las bolsas maxibags estén sometidas a esfuerzos mecánicos.
- El personal autorizado debe utilizar equipo de seguridad, ropa de seguridad y equipo de protección adecuado.
- Las operaciones deben realizarse en condición de ventilación adecuada.
- Las faenas, así como el estado final de la carga antes y después de su traslado, deben ser supervisados por personal calificado.
- Las áreas de transferencia, carga y descarga, manipulación y tráfico deben tener espacio suficiente para evitar riesgos y estar debidamente señalizados.
- Prohibición de fumar en el área de faena e ingerir alimentos.
- Contar con un sistema de limpieza in-situ, para la ropa utilizada durante las faenas (agua).

7.2.2 Transporte Interno

El transporte interno de los lodos se recomienda realizarlo en camiones tolvas. Las vías de circulación se eligen de acuerdo aquella que presenta el menor riesgo, la siguiente figura muestra la vía de circulación hacia el sitio de acopio temporal:

Figura 14: Vía de Circulación a sitio de Acopio Temporal



Las vías de circulación deberían contar con los siguientes requisitos:

- Los pavimentos y revestimientos de los pisos deben ser sólidos y no resbaladizos, además se exige que estos sean resistentes a la corrosión, impermeables y no porosos, de forma que se facilite su limpieza rápida y frecuente.
- Estos deben estar en buen estado de limpieza y conservación, con pinturas lavables, de preferencia de color claro.
- El transporte debe ser exclusivo del residuo a transportar para evitar problemas de incompatibilidad.
- Las vías de acceso para el transporte interno deben estar debidamente señalizadas.
- Las zonas de acceso por las que se transite con los lodos, deberán mantenerse libres de obstáculos que impidan un fácil y seguro desplazamiento.
- Las actividades de transporte interno no deben interferir en ningún caso u oportunidad, con el resto de las tareas habituales, tanto de los procesos productivos, como de las áreas administradas del recinto industrial.

a) Condiciones Mínimas Generales de Transporte Interno

- Verificar que los embalajes estén debidamente etiquetados y verificar los cierres, calidad e integridad de las bolsas maxibags.
- Asegurar las bolsas maxibags firmemente en el vehículo de transporte, evitando la fricción entre ellos y verificando la estabilidad de la carga.
- Evitar el transporte de residuos incompatibles en el mismo vehículo.
- El chofer y el personal auxiliar deben abstenerse de fumar y e ingerir alimentos. Deben contar, si fuese necesario, con los equipos de protección personal adecuados.
- Verificar que el vehículo de transporte este en buenas condiciones, tanto mecánicas como de la carrocería de carga.

7.3 Acopio Temporal

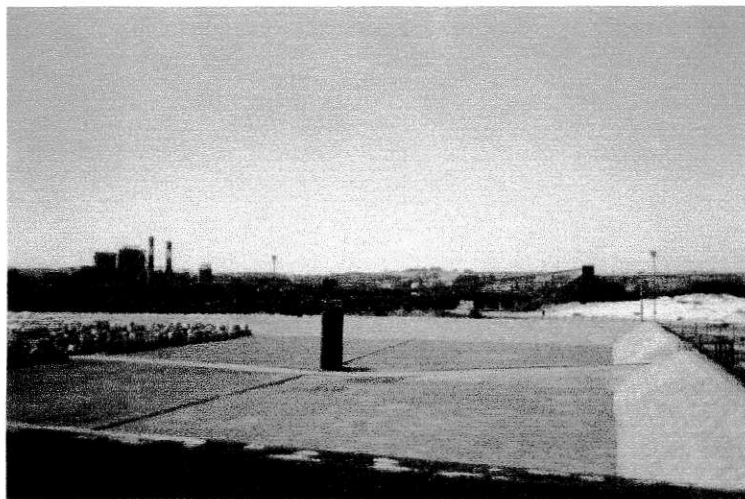
Un acopio temporal consiste en acumular cantidades suficientes del residuo, en este caso el lodo, relativamente cerca de su lugar de generación, además de proveer una capacidad de acumulación para que este residuo sea tratado o dispuesto finalmente.

El acopio temporal del lodo se propone realizarlo en el depósito de seguridad de ENAMI para residuos peligrosos, el cual para su construcción se basó en los reglamentos correspondientes a la EPA:

- 40 CFR 421
- 40 CFR 257
- 40 CFR 261
- 40 CFR 264
- 40 CFR 265

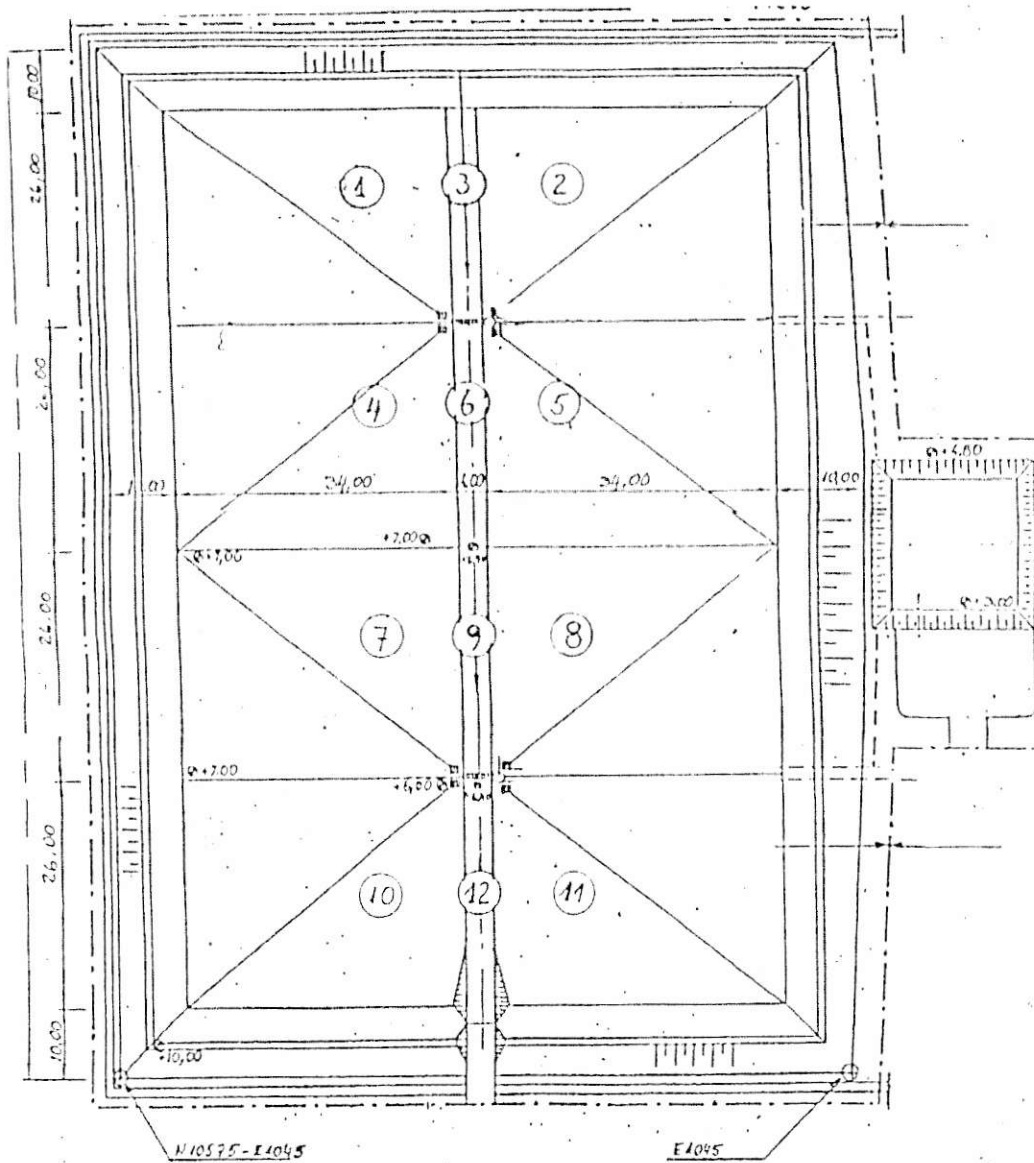
La siguiente figura muestra el depósito de seguridad:

Figura 15: Depósito de Seguridad Ventanas



Este depósito tiene un volumen de 25.000 m³ y está dividido en ocho áreas individuales. Cada una de estas ocho áreas dispone de un camino de acceso, a ambos lados, de 5 m de ancho. Entre las áreas individuales se dispone de un espacio de 1,0 m de ancho para el paso de personas, con el fin de controlar el lado exterior de la pila, así como la cubierta. La división del depósito de seguridad se muestra en la siguiente figura:

Figura 16: Mapa de Depósito de Seguridad



Las superficies para el depósito de residuos están elevadas con respecto a las superficies de tránsito periféricas y separadas de ellas por un cordón de vereda. Las superficies de cada una de las áreas de depósito se cubren con un empedrado de hormigón sobre una cama de arena, sobre el cual se pueden depositar bolsas con residuos. Este empedrado tiene una pendiente hacia el camino de acceso de 2% y paralela a él de 3%. La pendiente máxima resultante alcanza 3,4%. La superficie del empedrado está ubicada 5 cm por debajo del borde superior del cordón de la vereda periférica. De esta manera se evita que cuando haya aguaceros o chaparrones, las aguas de precipitación contaminadas se desborden sobre el borde superior del cordón. Las canaletas de desagüe en el lado inferior del área, lado interior de los cordones, sirven al mismo objetivo. Estas colectan las aguas de precipitación sobre las superficies del depósito y las conducen hacia un pozo colector, de donde las aguas eventualmente contaminadas fluyen por los canales previstos hacia el depósito de reserva.

Para evitar que las aguas de precipitación eventualmente contaminadas se filtren a capas subterráneas y con ello a las napas freáticas, se impermeabiliza cada área de pilas con una lámina HPDE. Esta lámina está elevada por el lado interior del cordón de tal modo que forma un recipiente cerrado, el cual tiene únicamente, dos aberturas de desagüe en el área del pozo colector. Una de las aberturas está siempre cerrada, de forma tal que las aguas de precipitación que fluyen pueden desaguar, únicamente, ya sea al sistema de aguas limpias y por él al emisario, o al sistema de aguas sucias y por el al depósito de reserva.

El agua que pueda filtrar a través de las juntas del empedrado o a través de otros lugares permeables fluye por encima de la superficie de la lámina sobre un tejido de drenaje, que sirve asimismo de protección, también al pozo colector y de allí al depósito de reserva. Para evitar que la lámina sea dañada por piedras más grandes en la capa portante, se colocará por debajo de la lámina una capa fina de arena. Además se cuenta con tres pozos de control fuera del terreno de depósitos, uno al este y dos al oeste de él. Para ello se supone que la corriente de aguas subterráneas fluye hacia la costa.

• **Condiciones Mínimas Generales Acopio Temporal**

Las condiciones de acopio temporal de los lodos son las mismas que en el caso de la etapa de recolección. Las bolsas maxibags al ser dispuestas en el depósito deben considerar las distancias y altura máxima por pilas es decir:

- Altura máxima por pilas en sacos 2 pellet y separados a una distancia de 2,4 m de cualquier producto peligrosos y una distancia de 1,2 m de cualquier otro producto no peligroso. Es por esto que para su acopio debe determinarse una zona exclusiva para ellos, dentro de las ocho áreas que se divide el depósito de modo almacenarlos en forma ordenada, con una disposición clara y fácil de abarcar a la vista, no cercanos a las vías de evacuación. Además para así asegurar que estos no cambien su composición, de manera de no perder su potencial uso, reciclaje o disposición.

En el área de acopio temporal se cuenta con un carro de horquillas para descargar las bolsas en forma directa el cual cuenta con un sistema de desplazamiento y tiene establecida una carga máxima total.

Los elementos esenciales que se deben considerar durante la realización de un acopio temporal son:

a) Seguridad de las Instalaciones

Las instalaciones deben mantener una adecuada seguridad para prevenir el acceso no autorizado al lugar. Existen tres razones para mantener la seguridad. Primero, para prevenir que la gente u otros seres vivos entren al lugar y puedan sufrir un daño por contacto con los residuos o los equipos. Segundo, para proteger los equipos de posibles daños. Tercero, evitar la extracción de materiales peligrosos por parte de personal no autorizado. La seguridad se puede mantener por medio de rejas, barreras naturales, o guardias.

b) Inspección y Mantenimiento de Equipos

La instalación debe establecer un programa de inspección que debe chequear las condiciones de los equipos de proceso, estanques de almacenamiento y contenedores, sistemas de control, equipos de emergencias, y otros equipos necesarios para la operación. La lista de inspección y la frecuencia dependen de factores tales como la velocidad de deterioro, la sensibilidad y lo factible de accidente que pueden ser los equipos.

c) Capacitación del Personal

En la instalación de acopio temporal debe existir una persona responsable con una calificación y capacitación específica en el área de trabajo, la cual tenga una supervisión directa en el trabajo a efectuar, además debe poseer conocimiento de cursos de primeros auxilios, medidas de seguridad y emergencia para el resto del personal.

Los operadores que manipulen los residuos peligrosos deben ser capacitados en los siguientes temas:

- Definición y conceptos básicos.
- Almacenamiento, prácticas de recolección y transporte de residuos peligrosos.
- Tratamiento y disposición final.
- Incompatibilidades de residuos sólidos peligrosos.
- Posibilidad de conocimiento de legislación básica de residuos industriales.

d) Archivos de Operación

Los archivos de la operación de las instalaciones deben documentar lo que ha hecho la instalación y reflejar el estado actual de la misma. Como ejemplos de lo que debe aparecer en estos archivos son: datos de control de procesos, tipos y cantidades de residuos, localización de residuos, y datos de monitoreo ambiental. Se debe mantener archivos actualizados y

exactos de los residuos recibidos, los procesos de tratamiento y la planificación de la instalación.

Al respecto en la recepción de los lodos al sitio de acopio temporal debe realizarse un control en:

- El peso de las bolsas maxibags.
- Verificar la identificación del lodo con la señalización pertinente así como la integridad de las bolsas maxibags.
- Realizar inspecciones visuales.

e) Prevención para Emergencias

Los residuos peligrosos presentan riesgos que pueden causar incidentes tales como fugas, incendios, intoxicación y explosiones. Identificando estos peligros y preparándose para los incidentes que pueden producirse, se puede prevenir que ocurran muchos accidentes y minimizar los efectos de estos.

Los lodos presentan una hoja de seguridad donde aparecen medidas en caso de intoxicación y medidas en caso de derrames o incendios las cuales deben ser puestas en conocimiento al momento de la manipulación de ellos.

7.4 Limpieza de Maquinarias

Luego de efectuar la recolección, transporte interno y acopio temporal debe realizarse la limpieza de la maquinaria utilizada durante estas operaciones.

El lugar donde se realice esta operación, debe ser exclusivo, cubierto, debe contar con un sistema de recolección de los residuos como canaletas, de modo que una vez removidas las impurezas a alta presión con agua, estas vayan a un lugar donde no entren en contacto con

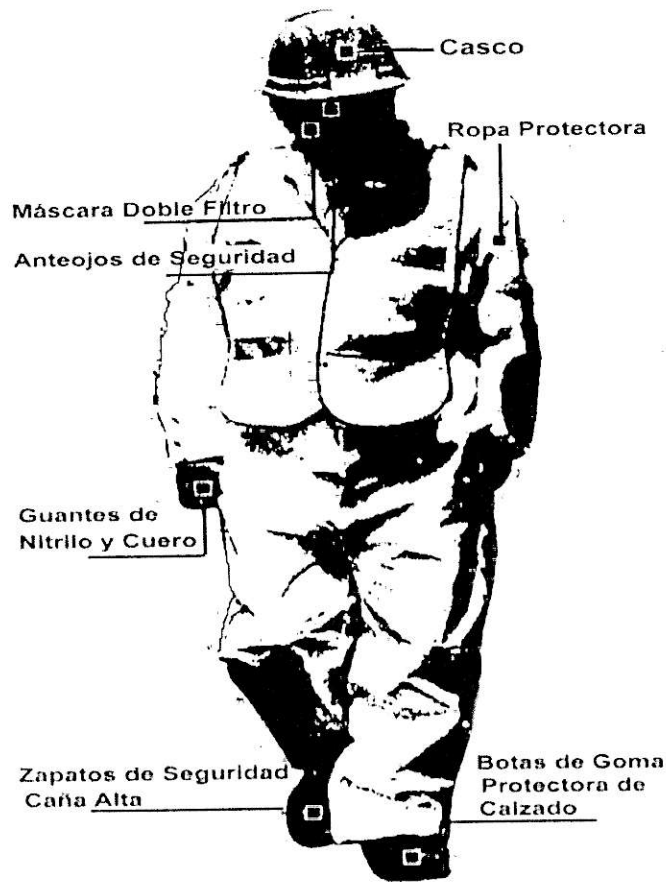
aguas superficiales o subterráneas y suelos. Hay que considerar que en esta limpieza habrá restos de petróleo los cuales también serán removidos, por ejemplo en ruedas y estructura en general de maquinarias.

La limpieza de la maquinaria implica un riesgo para la salud de los trabajadores que estén efectuando la labor de limpieza, por lo tanto estos deben contar con equipo de protección. El equipo se recomienda que sea el mismo empleado durante la manipulación del lodo.

7.5 Equipo de Protección Personal

- a) Casco protector.
- b) Lentes de seguridad o anteojos de seguridad.
- c) Máscaras para polvo.
- d) Guardapolvo o traje de trabajo.
- e) Guantes de goma o plásticos.
- f) Delantal plástico o de goma.
- g) Zapatos o botas de seguridad.

Figura 17: Equipo de Protección Personal



7.6 Incompatibilidades

El borrador del reglamento de manejo sanitario de residuos peligrosos presenta en su artículo 85 la Tabla de Incompatibilidades. El todo de acuerdo a su composición presenta las siguientes incompatibilidades:

Tabla 23: Tabla de Incompatibilidades

GRUPO A-2	GRUPO B-2
<ul style="list-style-type: none">• Residuos de berilio• Otras sustancias tóxicas	<ul style="list-style-type: none">• Solventes de limpieza de componentes electrónicos• Explosivos obsoletos• Residuos de petróleo• Residuos de refinerías• Solventes en general• Residuos de aceite y otros residuos inflamables y explosivos

7.6.1 Efectos de la Mezcla de Residuos de los Grupos

- Grupo A-2 con Grupo B-2: emisión de sustancias tóxicas en caso de fuego o explosión.
- Disolución de elementos tóxicos.

7.7 Señalización

7.7.1 Distintivo de seguridad (basado en la NCh2190.Of93 - Marca para información de riesgos)

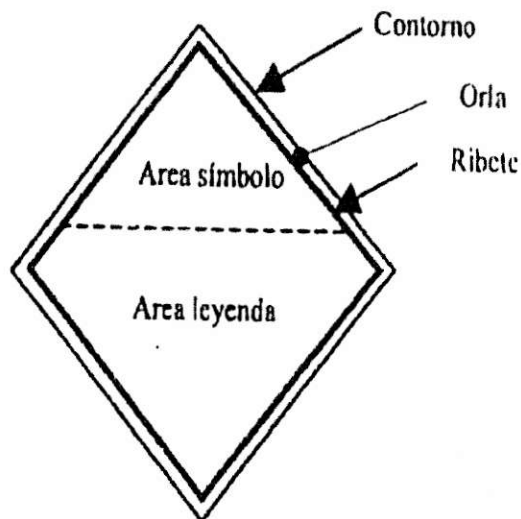
Los distintivos de seguridad son las marcas, etiquetas, rótulos que se establecen en NCh2190.Of93 - Marca para información de riesgos, las cuales están destinadas a ser colocadas sobre las mercancías o sobre los envases, embalajes o bultos que contienen estas sustancias y sobre los medios de transporte en que se trasladan estas sustancias.

El distintivo va indicar el riesgo inherente del residuo peligroso, en este caso este va a indicar el riesgo inherente del lodo.

Las consideraciones que se deben tomar para el distintivo son:

- Estos distintivos deben ser fácilmente reconocibles a distancia, por el aspecto general (símbolo, color, forma) de sus etiquetas o rótulos, deben ser resistentes a la acción del tiempo, sin deteriorarse y sin perder su legibilidad por la exposición a diferentes condiciones que, razonablemente, se espera puedan encontrarse durante el transporte y manipulación.
- Debe considerarse una inspección permanente del estado del distintivo, y cuando ocurra deterioro debe ser reparado o reemplazado.
- Las letras y números que se usen en los distintivos deben ser de superficie llena, en colores que permitan dar una primera orientación de lo que se desea expresar.
- Las leyendas que se incluyen en las marcas o etiquetas deben ser escritas en español.

Figura 18: Area Símbolo



a) Especificaciones Clase 6.1

A continuación se indica las especificaciones que hay que considerar para el lodo, Clase 6.1:

Tabla 24: Especificaciones para Etiqueta y Rotulo Clase 6.1

Dimensiones en milímetros

ESPECIFICACIONES PARA ETIQUETA Y ROTULO	ETIQUETA	ROTULO
Lado del cuadrado	≥ 100	≥ 250
Ribete, ancho	1	3
Orla	3	5 - 10
Letras, altura	20	54
Número(s), altura	18	49
Colores:		
• campo y orla	Blanco	Blanco
• ribete	Negro	Negro
• símbolo	Negro	Negro
• letras	Negro	Negro
• números	Negro	Negro

Figura 19: Clase 6.1



b) Especificaciones Clase 9

A continuación se indica las especificaciones que hay que considerar para el fodo, Clase (9):

Tabla 25: Especificaciones y Rotulo Clase 9

ESPECIFICACIONES PARA	RÓTULO
Lado del cuadrado	≥ 250
Ribete, ancho	3
Orla	12
Letras, altura	30
Números(s), altura	-----
Colores <ul style="list-style-type: none"> • campo y orla • ribete 	Anaranjado Negro

<ul style="list-style-type: none"> • símbolo • letras • número 	<p>-----</p> <p>Negro</p> <p>-----</p>
---	--

Figura 20: Clase 9



7.7.2 Identificación para el Almacenamiento Interno de Embalajes de la Fundición y Refinería Ventanas

Almacenamiento interno, Colores:

- Verde No peligroso comercializable
- Celeste No peligroso no comercializable
- Amarillo Peligroso comercializable

- Rojo Peligroso no comercializable

En base a esta identificación se recomienda embalar los lodos con una distintivo amarillo el cual corresponde a un residuo comercializable.

7.7.3 Letreros

Los letreros dan información referente a la forma y los sitios donde se deben almacenar los residuos, en este caso los lodos, debe ser entregada en forma visible, de fácil interpretación y a través de leyendas y figuras que sean entendidas por todas aquellas personas que operan en el área industrial. El objetivo de la señalización con letreros es indicar la ubicación del punto de acopio temporal, en el caso del lodo se recomienda el siguiente diseño:

Figura 21: Letrero



7.8 Hoja de Seguridad

El borrador del Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos en su artículo 25 indica que un Plan de Manejo de Residuos Peligrosos debe contemplar Hojas de Seguridad para el residuo peligroso. En base a esto para el lodo se tiene que:

- **Identificación del Residuo**

Tipo de Residuo: Lodo tóxico desaguado.

Origen: Piscinas de Precipitación, Flocculación, Sedimentación de la Fundición y Refinería Ventanas.

Composición: Hidróxidos, carbonatos, sulfuros de metales pesados.

Estado Físico: Semisólido

Peligrosidad: Tóxico.

Clasificación de peligrosidad según borrador de Reglamento Sanitario de Residuos

Peligrosos: Y18- Y22- Y23- Y24- Y25- Y26- Y27- Y28- Y29- Y 30- Y 31

Cantidad: 2430 Ton.

- **Riesgos y Medidas de Seguridad**

Incompatibilidades

No mezclar con sustancias del grupo B-2 de tabla de incompatibilidades de residuos.

Medidas en caso de Intoxicación

A la salud

- Altamente tóxico, puede ser fatal si se inhala, se ingiere o por absorción cutánea.
- Evitar cualquier contacto con la piel y ojos.
- Los efectos de contacto o inhalación se pueden presentar en forma retardada.
- El fuego puede producir gases irritantes, corrosivos y/o tóxicos.
- Las fugas resultantes del control del incendio o la dilución con agua, pueden ser corrosivas y/o tóxicas y causar contaminación

Primeros Auxilios

- Evaluar riesgo existente para rescatista.
- Mueva a la víctima donde se respire aire fresco.
- Llamar o colocarse en contacto con servicios médicos.
- Aplicar respiración artificial si la víctima no respira.
- No usar el método de respiración de boca a boca si la víctima ingirió o inhaló la sustancia, proporcione la respiración artificial con la ayuda de una máscara de bolsillo con una válvula de una sola vía u otro dispositivo médico de respiración.
- Suministrar oxígeno si respira con dificultad.
- Quitar y aislar la ropa el calzado contaminados.
- En caso de contacto con la sustancia, enjuagar inmediatamente la piel o los ojos con agua corriente por lo menos durante 20 minutos.
- En el caso de contacto menor con la piel, evite esparcir el material sobre la piel que no está afectada.
- Mantener a la víctima en reposo y con temperatura corporal normal.
- Los efectos de exposición a la sustancia por (inhalación, ingestión o contacto con la piel) se pueden presentar en forma retardada.

- Asegúrese o informe al personal médico sobre el conocimiento de los materiales involucrados y de este modo pueda tomar precauciones para protegerse a sí mismos.

Medidas en caso de Incendio o Derrames

Incendio o Explosión

- Las sustancias no combustibles no encienden por sí mismas, pero se pueden descomponer al calentarse y producir vapores corrosivos y/o tóxicos.
- Los contenedores pueden explotar cuando se calientan.
- La fuga resultante o derrame puede contaminar suelos y napas subterráneas.

Seguridad Pública

- Llamar primero a los números de teléfono de respuesta en caso de emergencia con que cuente ENAMI.
- Aísle el área del derrame o fuga inmediatamente o por lo menos 25 o 50 metros (80 a 160 pies) a la redonda.
- Mantener alejado al personal no autorizado.
- Permanecer en dirección del viento.

Evacuación

- Derrame: Aísle el área del derrame o fuga inmediatamente o por lo menos 25 o 50 metros (80 a 160 pies) a la redonda, aumentar esta si es necesario.
- Incendio: Si un tanque o contenedor está involucrado en un incendio, aísle a la redonda a lo menos 800 metros (1/2 millas), también considere la evacuación inicial a la redonda a 800 metros (1/2 milla), aumentar estas distancias si se considera necesario.

Respuestas de Emergencia

Fuego

Incendios Pequeños

- Polvos químicos secos CO₂ o rocío de agua.

Incendios Grandes

- Use rocío de agua, niebla o espuma regular.
- Mueva los contenedores del área de fuego si lo puede hacer sin ningún riesgo.
- No disperse el material derramado con chorros de agua.
- Hacer un dique de contención para el agua que controla el fuego para su desecho posterior, no desparrame el material.
- No usar chorros rectos.

Incendio que involucra Tanques, Vagones o Remolques y sus Cargas

- Combata el incendio desde una distancia máxima o utilice soportes fijos para mangueras o chiflones reguladores.
- No introducir agua en los contenedores.
- Enfríe los contenedores con chorros de agua hasta mucho después de que el fuego se haya extinguido.
- Retírese inmediatamente si sale un sonido creciente de los mecanismos de seguridad de las ventilas, o si el tanque se empieza a decolorar.
- Siempre mantenerse alejado de los extremos de los tanques o contenedores.
- Para incendio masivo, utilizar los soportes fijos para mangueras o los chiflones reguladores; si esto es imposible retirarse del área y dejar que arda.

Derrame o Fugas

- No tocar los contenedores dañados o material derramado, a menos que este usando la ropa protectora adecuada.
- Detenga la fuga, en caso de poder hacerlo sin riesgo.
- Prevenga la entrada del material hacía suelos, napas subterráneas y cursos de agua en general.
- Construir un dique más adelante del derrame material para su desecho posterior, si fuese necesario.
- Prevenga la nube de polvo.
- Cubra con una hoja de plástico para prevenir su propagación.
- Absorber con tierra seca, arena u otro material absorbente no combustible y transferirlo a contenedores.
- No introducir agua a los contenedores.

Derrames Secos Pequeños

- Con una pala limpia, colocar el material en un contenedor limpio y seco y cubrir holgadamente; quitar los contenedores del área de derrame.

7.9 Implementación Etapa Secado y Recolección

Durante la época de verano del 2001, se procedió a efectuar las dos etapas de secado y recolección y traslado del lodo a una piscina auxiliar. Durante esta etapa la Fundición y Refinería Ventanas adoptó las siguientes medidas:

- a) Las unidades generadoras de Riles extremaron sus controles en relación a la calidad de sus vertidos, para evitar cualquier episodio de contaminación. Para esto se deberá efectuar un control de pH de los operadores de los procesos cada media hora, llevando un registro.
- b) De llegar a producirse una emergencia o evento de contaminación de los efluentes de alguno de los procesos, se deberá llevar a cabo su inmediata neutralización in situ y dar aviso al Jefe de Turno Central Térmica.
- c) Control de Calidad contratará dos muestreadores por turno, los cuales leerán cada media hora la información de cada uno de los monitores Sigma, llevando a cabo un registro, de fallar los equipos, harán la medición en forma manual. Esta información será comunicada al Jefe de Turno respectivo, quien deberá actuar en consecuencia para mantener controlados los niveles de pH a lo menos sobre 6. Los valores del emisario serán comunicados al Jefe de Turno de Central Térmica, en caso de mantenerse el valor bajo 6, deberá proceder a aislar la piscina. Para esto, hará colocar sacos de arena con el mismo personal de los muestreadores, apoyados por el personal de Seguridad Industrial de ser necesario.
- d) Durante el periodo que dure el secado, Control de Calidad deberá informar diariamente a los integrantes del equipo de aguas los resultados de las mediciones, pH de salida de piscina y emisario final.

El secado del lodo en la piscina 1 duró aproximadamente un mes, formándose una especie de gel, luego este fue trasladado a una piscina auxiliar construida durante esta etapa. Las

siguientes figuras muestran la apariencia del lodo después de un mes de secado y a la piscina auxiliar:

Figura 22: Apariencia del Lodo luego de un Mes de Secado I



Figura 23: Apariencia de Lodo después de un mes de Secado II



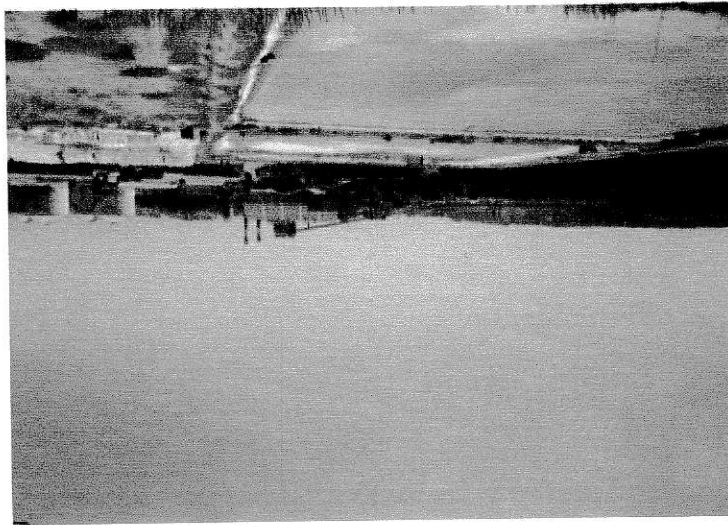


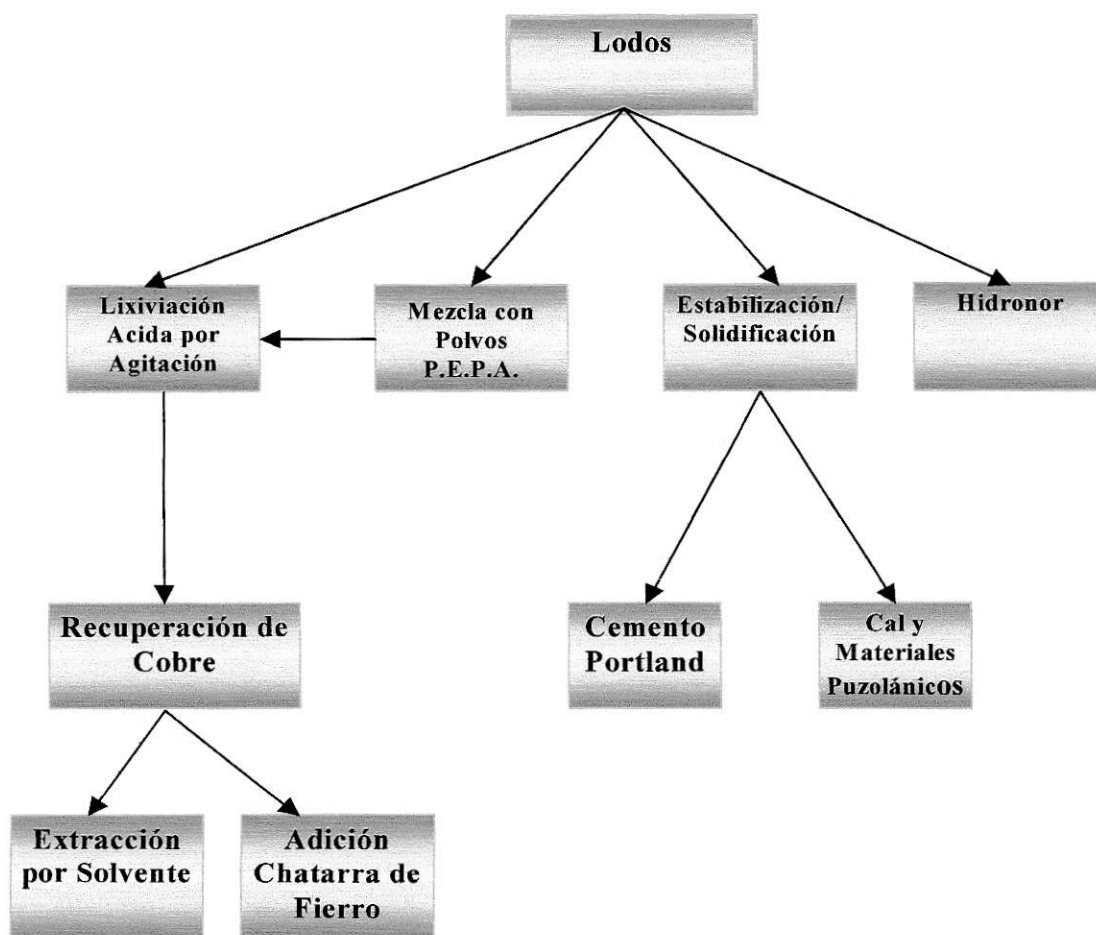
Figura 24: Piscina Auxiliar

Capítulo VIII

Alternativas de Tratamiento y/o Disposición Final

Las alternativas de tratamiento y/o disposición final que se proponen en este trabajo para los lodos, se muestran a continuación en el siguiente esquema:

Figura 25: Esquema General de Alternativas para el Tratamiento de Lodos



8.1 Primera Alternativa: Lixiviación Ácida

De los análisis realizados se desprende que el contenido de cobre del lodo, 5% de cobre total y de 4% de cobre soluble, tiene un valor agregado, por lo tanto se propone la alternativa de lixiviación ácida para la recuperación de este, aun cuando otros metales están presentes en los lodos.

8.1.1 Lixiviación Ácida por Agitación

La lixiviación ácida es un tratamiento utilizado para tratar minerales de óxidos de cobre y también para tratar residuos que contienen metales que son solubles en un ácido. Este proceso ha sido utilizado para recuperar metales como mercurio, cobre, níquel, plata y cadmio desde residuos inorgánicos generados desde diversas industrias.

La lixiviación ácida es más efectiva con residuos que tienen grandes niveles (sobre 1000 ppm) de constituyentes metálicos. Los residuos que contienen bajos niveles de constituyentes metálicos son más difíciles de tratar ya que requieren de mayor tiempo de contacto.

El principio básico de operación de la lixiviación ácida consiste en las solubilidades de varios metales en soluciones ácidas, para de este modo removerlo desde un residuo. El proceso concentra los constituyentes lixiviados en la solución ácida, estos constituyentes pueden luego ser filtrados y neutralizados para precipitar sólidos que contiene grandes concentraciones de los constituyentes de interés, los cuales luego son recuperados, alternativamente las soluciones ácidas pueden someterse a electrólisis para recuperar metales puros. Un sistema de lixiviación ácida usualmente consiste de una unidad de contacto líquido/sólido seguida de un separador líquido/sólido. Los ácidos más usados son el ácido sulfúrico, ácido clorhídrico y ácido nítrico, aunque teóricamente es posible usar cualquier ácido que produzca un cambio de pH.

La lixiviación ácida por agitación se practica en estanques, donde el residuo y el ácido son mezclados, permitiendo que ambos entren en contacto formando una pulpa y manteniendo a

las partículas en suspensión en el seno del lixivante mismo. Luego la pulpa es trasladada para ser separado el líquido y el sólido resultante por procesos de filtración y/o centrifugación.

Las características que son importantes de considerar en una lixiviación son el tamaño de la partícula sólida del residuo, la alcalinidad del residuo, las solubilidades de los constituyentes metálicos del residuo en el ácido y la concentración de los metales a lixiviar.

- Las partículas de pequeño tamaño, tienen un tiempo de lixiviación rápido porque estas presentan una gran área de superficie para que entren en contacto con el ácido.
- La capacidad de neutralización o alcalinidad del residuo sólido afecta la cantidad de ácido que debe agregarse al residuo, para mantener un pH deseado durante la lixiviación.
- El ácido que es elegido para llevar a cabo la lixiviación debe permitir que se solubilizcen los metales de interés.
- La cantidad de metales lixiviados es una medida de la máxima fracción del residuo que se espera lixivie durante el proceso de lixiviación ácida. Una concentración baja de los metales a lixiviar implica que algunos metales que deberían lixiviar queden en el residuo.

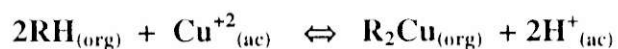
8.1.2 Recuperación de Cobre

Luego de llevar a cabo la lixiviación ácida por agitación se proponen dos formas para recuperar el cobre desde el líquido resultante, éstas son:

- Extracción por solvente.
- Adición chatarra de fierro.

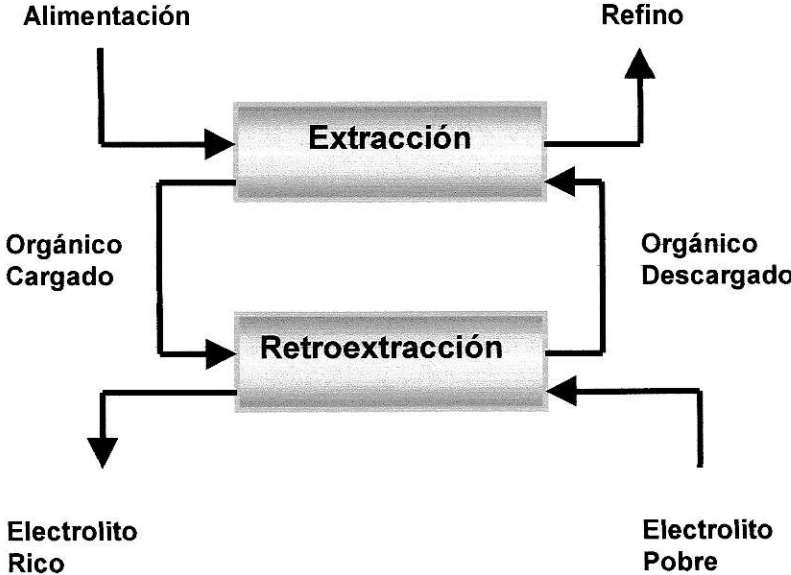
8.1.2.1 Extracción por Solvente

La extracción por solvente consiste en ocupar un solvente específico para la recuperación del cobre. La ecuación que describe la extracción por solvente para la recuperación de cobre es la siguiente, cuando se utilizan extractantes ácidos, del tipo quelato o intercambiadores de cationes:



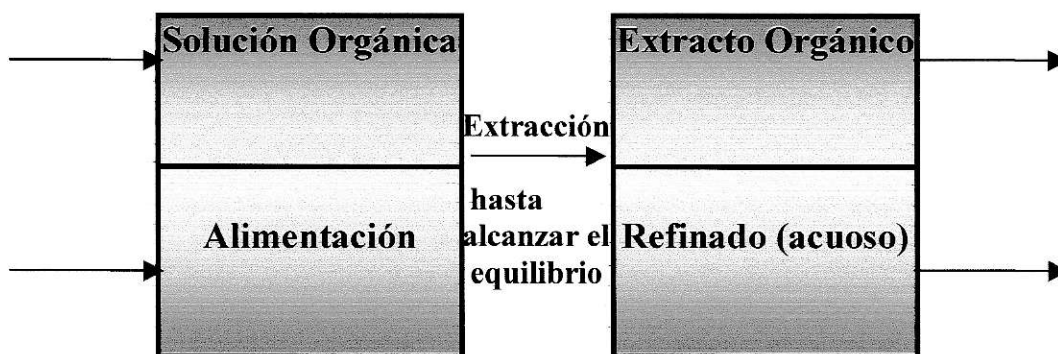
El siguiente esquema muestra los pasos necesarios para llevar a cabo la lixiviación ácida y posterior recuperación de cobre por extracción por solventes:

Figura 26: Esquema General de Recuperación de Cobre por Extracción por Solvente desde los Lodos



El proceso de extracción por solvente consiste en que luego de lixiviar el residuo la fase acuosa la cual contiene el cobre se pone en contacto con la solución extractante, para luego poder distinguir dos fases el extracto y refinado, donde el extracto contiene el cobre (II) acomplejado con el extractante y el refinado que corresponde a la fase acuosa que resulta después de la extracción, esta etapa se denomina de extracción. El siguiente esquema detalla lo anteriormente descrito:

Figura 27: Etapa de Extracción



Donde:

- Solución Orgánica: Corresponde al extractante orgánico disuelto en un diluyente orgánico.
- Alimentación: Solución acuosa ácida rica en contenido de Cu^{+2}
- Extracto Orgánico: Complejo $\text{R}_2\text{Cu}_{(\text{org})}$.
- Refinado (acuoso): Solución pobre, con bajo o ningún contenido de Cu^{+2} .

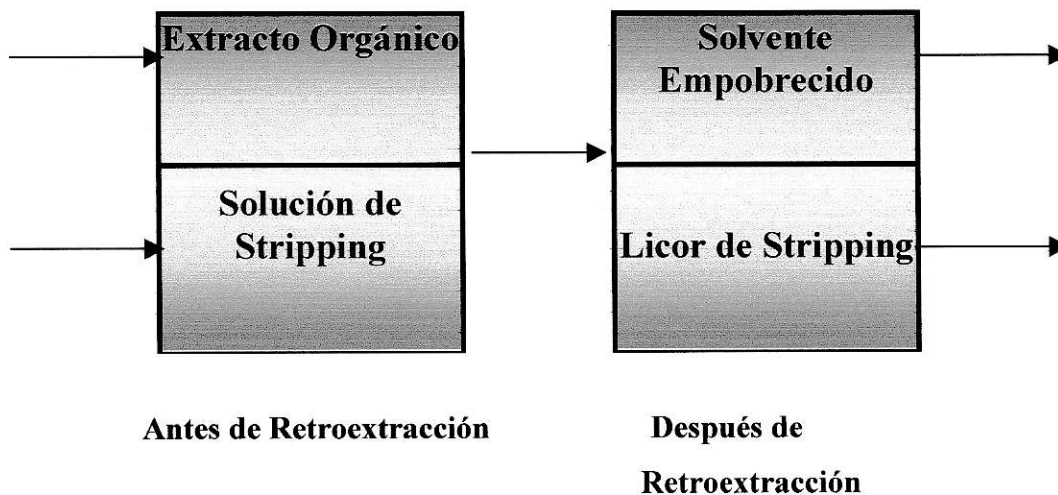
Luego el orgánico cargado puede ser limpiado con una fase acuosa apropiada para remover las impurezas coextraídas en la primera etapa, esto se denomina “Scrubbing”.

Después la fase orgánica ahora libre de impurezas pasa la etapa denominada “Stripping”, en que el ion metálico pasa nuevamente a la fase acuosa, produciéndose una solución concentrada en cobre, recuperando además el solvente empleado. La solución de “Stripping” normalmente utilizada es ácido sulfúrico, la cual provoca la ruptura del complejo $\text{R}_2\text{Cu}_{(\text{org})}$, formándose dos

fases una acuosa y una orgánica, denominadas respectivamente licor de “Stripping” y solvente empobrecido o despojado.

El licor de “Stripping” corresponde a la fase acuosa resultante de la retroextracción, consistente en una solución ácida cargada con el cobre proveniente del complejo presente en el extracto. El solvente empobrecido esta constituido por la solución orgánica en la cual queda liberado el solvente y apto para ser reutilizado, es decir, LIX. También queda el complejo no retroextraído durante el proceso de “Stripping”. En la siguiente figura se representa lo descrito anteriormente:

Figura 28: Etapa de Retroextracción

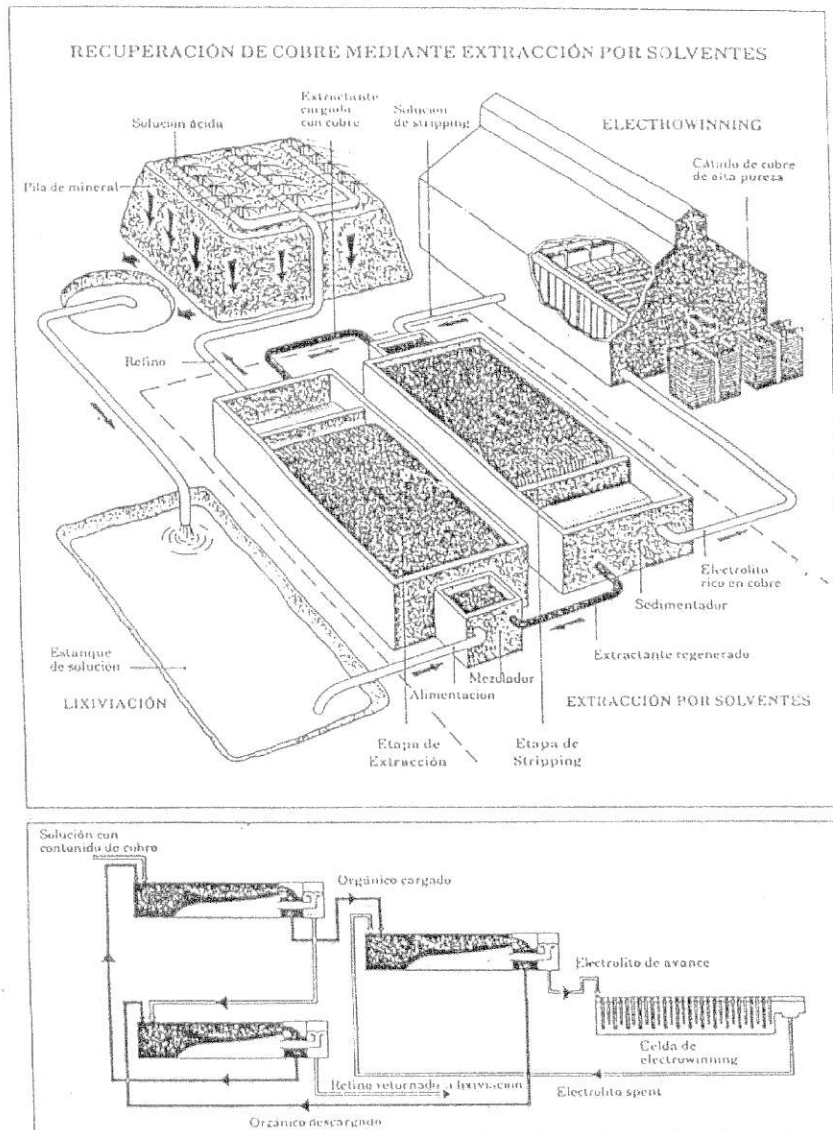


Donde:

- Extracto Orgánico: Complejo $R_2Cu_{(org)}$.
- Solución de Stripping: Solución acuosa fuertemente ácida.
- Solvente Empobrecido: Solvente orgánico con bajo contenido de Cu^{+2} .
- Licor de Stripping: Solución acuosa ácida con alto contenido de Cu^{+2} .

A continuación se muestra en la figura una planta por extracción por solventes:

Figura 29: Planta de Extracción por Solvente



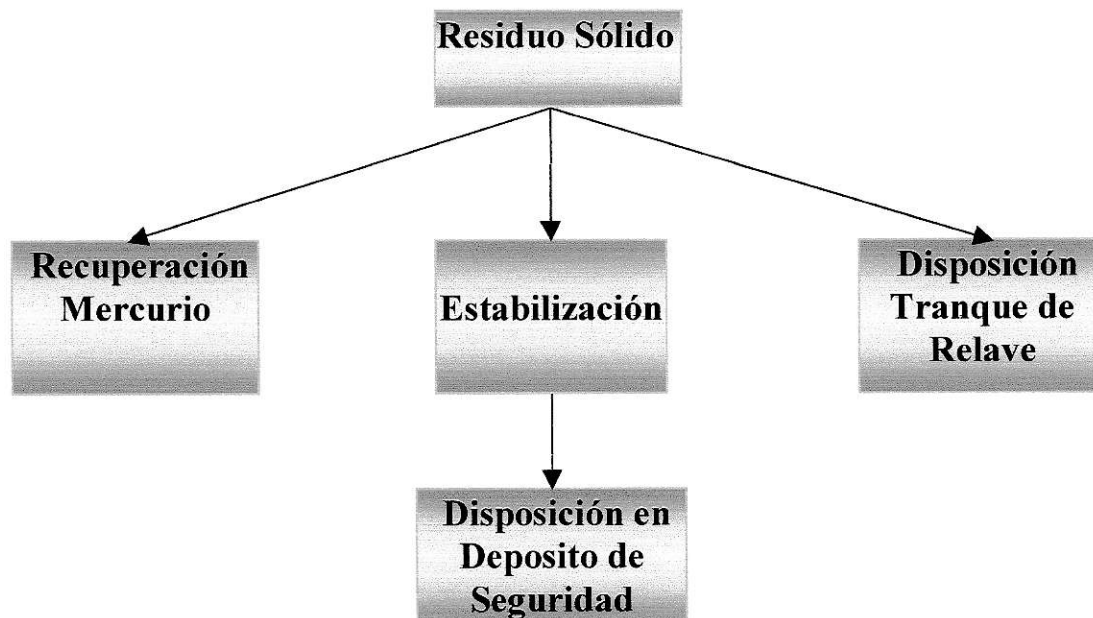
8.1.2.1.1 Destino de Residuos Generados

a) Residuo Sólido Generado (Relave)

- Recuperación de mercurio por medio de una Retorta.
- Estabilizar y disponer en un depósito de seguridad.

- Disponer directamente el residuo sólido en un tranque de relave exclusivo para residuos peligrosos tratados por lixiviación ácida.

Figura 30: Esquema de Alternativas de Residuo Sólido Generado

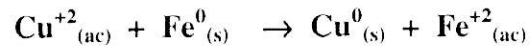


b) Residuo Líquido Generado (Líquido Residual)

- El líquido residual devolverlo al sistema.
- Remoción de arsénico como Arsenato de Calcio ($\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$), está es usada en la Fundición Tamano Mitsui Mining and Smelting Co. o remoción de Arsénico como Sulfuro de Arsénico (As_2S_3), utilizada en las fundiciones Saganoseki de la Nipon Kogyo y fundición Toyo de la Sumitomo Metal Mining Co.
- Disponer el líquido residual en un tranque de relave exclusivo para residuos peligrosos tratados por lixiviación ácida.
- Incluirlo en los tratamientos de efluentes de características similares, de alguna Planta o Fundición y Refinería de la ENAMI.

8.1.2.2 Adición Chatarra de Fierro

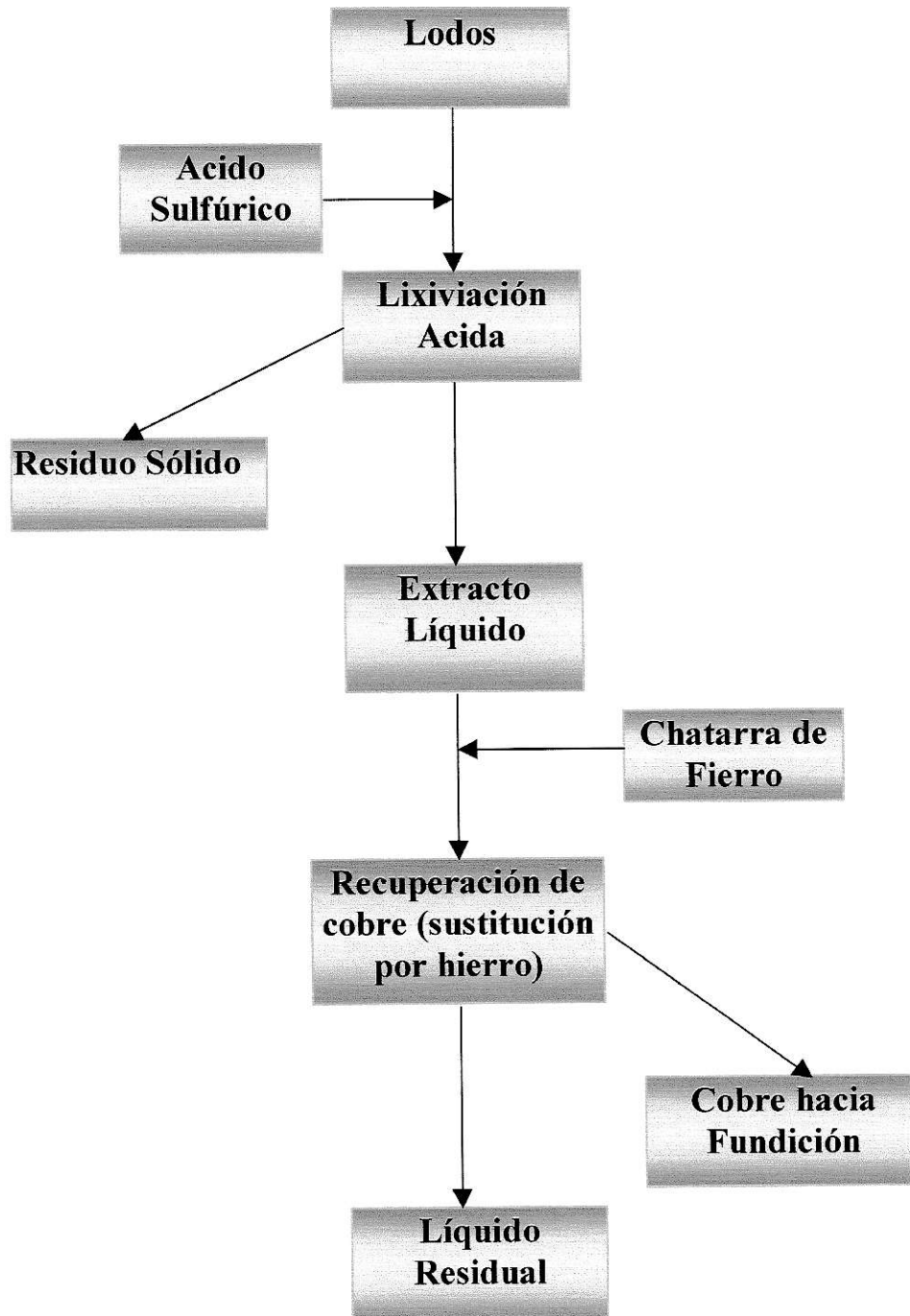
La recuperación de cobre mediante la adición de chatarra de fierro es empleada por ENAMI en su proceso de recuperación de cobre normal, está se basa en la siguiente ecuación:



Donde las soluciones concentradas de cobre provenientes de la lixiviación, se ponen en contacto con el fierro para lograr la reacción antes mencionada, para estos se necesita de recipientes para que ocurra la precipitación esto puede realizarse en estanques estáticos, agitadores mecánicos o tambores rotatorios.

A continuación se muestra un esquema general para llevar a cabo la lixiviación ácida y posterior recuperación de cobre por adición de chatarra de fierro:

Figura 31:Esquema General de Recuperación de Cobre por Adición de Chatarra de Hierro desde los Lodos



8.1.2.2.1 Destino de Residuos Generados

a) Residuo Sólido Generado (Relave)

- Recuperación de mercurio por medio de una Retorta.
- Estabilizar y disponer en un depósito de seguridad.
- Disponer directamente el residuo sólido en un tranque de relave exclusivo para residuos peligrosos tratados por lixiviación ácida.

b) Residuo Líquido Generado (Líquido Residual)

- Remoción de arsénico como Arsenato de Calcio ($\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$), esta es usada en la Fundición Tamano Mitsui Mining and Smelting Co. o remoción de Arsénico como Sulfuro de Arsénico (As_2S_3), utilizada en las fundiciones Saganoseki de la Nipon Kogyo y fundición Toyo de la Sumitomo Metal Mining Co.
- Disponer el líquido residual en un tranque de relave exclusivo para residuos peligrosos tratados por lixiviación ácida.
- Incluirlo en los tratamientos de efluentes de características similares, de alguna Planta o Fundición y Refinería de la ENAMI.

8.2 Segunda Alternativa: Mezcla con Polvos P.E.P.A.

Los polvos P.E.P.A. (Polvos Electrofiltro Planta de Acido), son generados en el proceso de fusión primaria de la Fundición Ventanas, los gases provenientes de la fundición desde el Convertidor Teniente y Convertidos Pierce Smith tienen una gran cantidad de impurezas sólidas y gaseosas donde luego de pasar por una etapa de lavado son atrapados en campanas de succión y eliminados por medio de ciclones para finalmente quedar retenidos estos polvos en un precipitador electrostático y luego ser retirados.

Estos polvos no son reprocesados en la Fundición. Históricamente se han almacenado en canchas de acopio y la disminución de las existencias ha sido a través de ventas a particulares para su tratamiento independiente, estos contienen oro, plata, cobre y también contienen impurezas como arsénico y plomo.

La alternativa propuesta es mezclar el lodo con el polvo P.E.P.A para una recuperación de cobre por lixiviación ácida por agitación para luego seguir el mismo esquema propuesto para el lodo, es decir una recuperación de cobre por extracción por solventes y adición de chatarra de fierro.

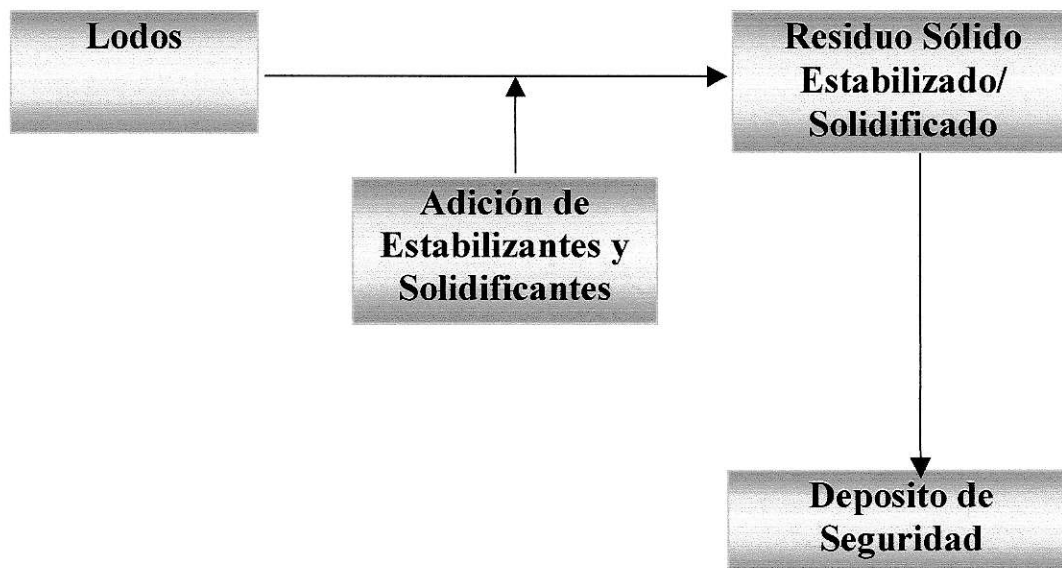
8.3 Tercera Alternativa: Estabilización/ Solidificación

La tercera alternativa es estabilizar/ solidificar el lodo directamente y llevarlo a disposición final, ya que no hay que olvidar que aunque este tenga un valor agregado, es también un residuo peligroso. La disposición final debe realizarse en un depósito de seguridad.

La estabilización/ solidificación como se indicó en la primera alternativa, también se propone realizarla para el residuo sólido generado luego de la lixiviación.

A continuación se indica el esquema para estabilizar/solidificar los lodos:

Figura 32: Esquema General Estabilización / Solidificación Lodos



La estabilización/solidificación es un tratamiento que usa aditivos los cuales cumplen la función de reducir la movilidad de los contaminantes, haciendo que este pueda ser dispuesto en forma segura.

En la solidificación se obtiene un bloque monolítico de residuo tratado por una integridad estructural muy alta y la estabilización describe procesos que limitan la solubilidad o desintoxican al contaminante; las características pueden o no mejorarse o modificarse.

Se proponen dos formas para estabilizar/solidificar el lodo:

- Utilizando Cemento Portland.
- Utilizando cal y materiales puzolánicos

8.3.1 Cemento Portland

Las técnicas basadas en la cementación para tratar residuos peligrosos generalmente utilizan cemento Portland (CP), con aditivos para mejorar las características físicas y reducir el lixiviado proveniente del residuo solidificado resultante.

El proceso trata en que los residuos peligrosos se mezclan con una suspensión con agua y polvo de cemento anhidro. El mecanismo de estabilización es la formación de productos de hidratación a partir de compuestos de silicatos y agua, produciéndose un gel de silicato de calcio hidratado que va creciendo y forma la matriz de cemento compuesta de fibras de silicato entrelazadas y productos de hidratación.

Los compuestos que pueden interferir con los procesos de solidificación son sales solubles de manganeso, estaño, cobre y plomo, produciendo un aumento en los tiempos de fraguado y reducir de una forma considerable las fuerzas físicas, también la materia orgánica, sedimentos y algunas arcillas pueden ocasionar un retraso considerable en el fraguado. Las variaciones en el proceso pueden afectar o mejorar las características físicas químicas del residuo.

Un problema que se puede producir en la cementación del residuo ácido generado después del lixiviado es que el cemento como es alcalino, limpiará la acidez libre antes de cambiar el pH a 11, por esto, la adición del cemento Portland a dichos residuos es inútil debiéndose agregar cal o ceniza finas para espesar el residuo e incrementar el pH a uno mayor que 7.

Las dosis de cemento que se requieren normalmente es un mínimo aproximado de 10% de cemento sobre una base peso/ peso para producir una fuerza mecánica necesaria.

Una combinación de cemento Portland con material puzolánico presenta las siguientes características:

- Los productos puzolánicos adicionados al cemento Portland reaccionan con hidróxido de calcio libre para aumentar la resistencia química de los productos solidificados.
- Existen varios tipos de cemento Portland que se pueden seleccionar para una reacción específica. El cemento Portland tipo I ha sido el más utilizado.
- Se han adicionado una gran variedad de materiales (por ejemplo silicato soluble, geles de sílica hidratada y arcillas) para incrementar o cambiar el funcionamiento deseado. En algunos casos, se requiere el uso de sorbentes selectivos para así poder ayudar a que el contaminante quede atrapado en la matriz sólida. Los aditivos más comunes son:
 1. Silicatos solubles, como es silicato de sodio o el silicato de potasio. Estos agentes generalmente se colocan instantáneamente al cemento Portland, lo que produce un concreto de baja resistencia. Este tipo de materiales ayudan para la reducción de interferencia proveniente de los iones metálicos contenidos en la solución residual.
 2. Arcillas seleccionadas especialmente para absorber líquido y enlazar aniones o cationes específicos.
 3. Emulsificantes y surfactantes que permiten la incorporación de líquidos orgánicos inmiscibles.
 4. Adsorbentes patentados que enlazan residuos específicos selectivamente. Este tipo de materiales incluye carbón, silicatos, materiales zeolíticos, así como sorbentes celulósicos, estos tienen constituyentes tóxicos y se encapsulan con el residuo.
 5. Cal, se puede emplear para aumentar el pH y la temperatura de reacción y para mejorar las características de fijación.
- Los procesos basados en el cemento son más versátiles que los procesos con ceniza y cal, se pueden formular para una resistencia excepcional y además retienen efectivamente los contaminantes específicos.

- Ciertos componentes residuales pueden interferir con la fijación y estabilidad de los procesos que se basan en el cemento.

8.3.2 Cal y Materiales Pozolánicos

La cal y los materiales puzolánicos en combinación producen matrices cementosas que atrapan el residuo física y químicamente.

Las puzolanas son materiales que no producen cementación por si mismos, contienen constituyentes que en combinación con cal a temperatura normal y en presencia de agua forman compuestos insolubles estables. Este proceso produce una cementación de baja resistencia.

En el proceso se requiere que:

- El residuo se mezcle con materiales puzolánicos hasta tener una consistencia pastosa. También se necesita agua libre para las reacciones.
- La cal se adiciona a la mezcla residuo-ceniza. El porcentaje de cal requerido es de un 20% a 30% para obtener una resistencia aceptable, dependiendo además del tipo de ceniza utilizada.
- La unión depende de la formación de silicato de calcio.
- Las reacciones puzolánicas principales implican la formación de nuevos compuestos hidratados, llamados silicatos tricálcicos hidratados como en la hidratación del cemento.
- El sistema es altamente alcalino. Con ciertos residuos puede causar la liberación de lixiviados indeseables.
- Un exceso de agua también es indeseable.
- Sin aditivos especiales o pretratamiento del residuo, los residuos peligrosos tratados con la mezcla cal- ceniza probablemente se clasifiquen nuevamente como peligrosos de acuerdo al TCLP.
- El sistema tiene bajo costo.

- La desventaja es que la unión ceniza-cal y residuo no sea tan durable o no tenga un control del lixiviado como lo es el cemento Portland.

8.3.3 Posibles Pruebas a realizar al Material Estabilizado/Solidificado

- Pruebas de tensión compresiva confinada y no confinada.
- Humedad y secado.
- Pruebas de durabilidad de congelado y deshielado.
- Otros procedimientos que permiten comprobar la integridad y durabilidad estructural.

8.4 Cuarta Alternativa: Hidronor

Hidronor se considera como alternativa debido a que esta es una Empresa la cual recibe residuos peligrosos. Está alternativa requiere un costo para la empresa. De está forma ENAMI elimina los lodos directamente y se asegura que estos sean tratados por una empresa externa.

Capítulo IX

Estudio de Alternativa

9.1 Justificación de Alternativa

La alternativa escogida para estudiar fue la lixiviación ácida por agitación para el lodo y para una mezcla con polvos P.E.P.A.. La elección de esta se realiza debido a:

- La posibilidad de recuperación de cobre.
- Requiere un mayor estudio.
- Se realiza ya con otros minerales.
- La posibilidad de estudio del comportamiento de otros metales de interés a través del proceso.
- Una posible reducción del volumen del sólido.
- Interés de la empresa de tratar sus residuos.

Para llevar a cabo este estudio se realizaron pruebas de laboratorio en el Laboratorio Metalúrgico de Planta Vallenar de ENAMI, con una duración de 4 semanas, mediante ellas se pretendió simular la lixiviación ácida por agitación. Las variables que se escogen en las diferentes pruebas son las que se consideran más relevantes, y se basan en los procesos normales de recuperación de cobre y en el estudio de bibliografía. Se entiende que podrían considerarse muchas variables más de estudio en el trabajo de laboratorio, pero el objetivo es probar este proceso como alternativa para el tratamiento de los lodos y la posibilidad de una eventual mezcla con los polvos P.E.P.A. en una forma preliminar.

9.2 Metodología Propuesta

Los resultados que se pretenden obtener son:

- Porcentaje de recuperación de cobre desde los lodos.
- Concentración de los diferentes metales a través del proceso con sus balances de masas correspondiente.

Además por medio de los diferentes experimentos que se realizarán se estudiará:

- Volumen de ácido sulfúrico.
- Porcentaje de sólidos en la agitación.
- Tiempo lixiviación.
- Consumo óptimo de ácido sulfúrico.

Se realizaron 10 experiencias en el laboratorio, estas fueron:

- 3 Cinéticas de agitación para el lodo.
- 4 Cinéticas de agitación para el polvo P.E.P.A.
- 1 Lixiviación por agitación para el lodo.
- 1 Lixiviación por agitación para el polvo P.E.P.A.
- 1 Lixiviación por agitación para una mezcla de ambos residuos.

9.3 Caracterización Química

Las pruebas que se efectuaron fueron con dos tipos de residuos el lodo y polvo P.E.P.A., para esto se viajó a la Fundición y Refinería Ventanas para la recolección de muestra.

La muestra que fue recolectada fue tomada en la Piscina Auxiliar en el caso del lodo y el polvo P.E.P.A desde un acopio, ésta luego fue homogeneizada siguiendo el protocolo de la

Empresa, de modo de entregar un testigo de cada residuo al Laboratorio Metalúrgico de Ventanas para su análisis y posterior empleo de los resultados como cabeza para los cálculos de las experiencias en el Laboratorio Metalúrgico de Planta Vallenar.

Los resultados de los análisis se muestran a continuación:

Tabla 26: Caracterización Química Lodos y polvos P.E.P.A.

	P.E.P.A	LODO
Cu Total %	6,2	4,8
Cu soluble %	5,05	3,85
Au g/ton	3,0	2,2
Ag g/ton	70	50
Fe %	0,66	4,36
As %	11,18	9,27
Pb %	16,32	0,74
Cd ppm	4813	1603
Hg ppm	106	2536
Sb %	0,2	0,038
Se %	0,01	0,074

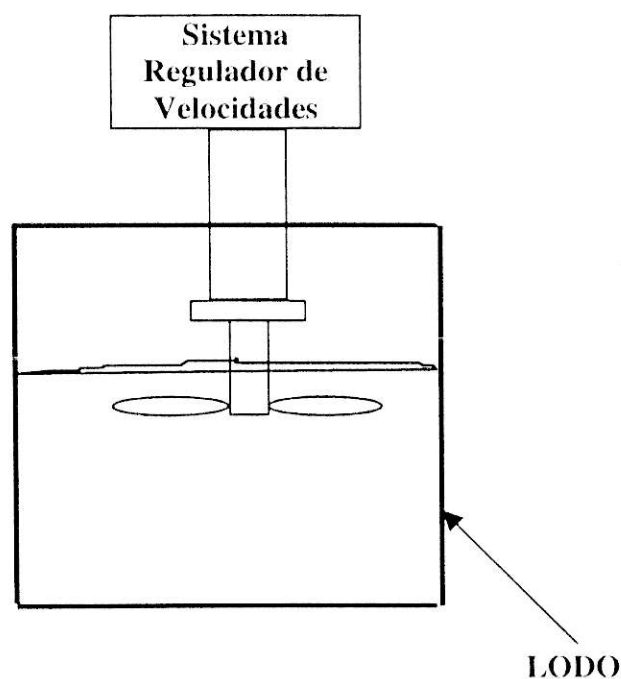
La caracterización química que se va a efectuar en el líquido y en el sólido resultante del proceso de lixiviación van a ser los mismos metales caracterizados como cabeza.

9.4 Diseño Experimental de una Lixiviación Ácida por Agitación

En la realización de esta experiencia se ocupó un reactor de un material resistente al ácido, en el cual se va a realizar el experimento, en él se agitó el lodo y la solución lixiviante.

El reactor ocupado es un estanque cilíndrico con fondo plano, provisto de cuatros deflectores adosados en el interior de la parte cilíndrica de la unidad. La agitación se realiza mediante una hélice ubicada en el fondo del cilindro la cual recibe la rotación a través de un eje vertical. Todo el sistema está suspendido en una estructura que descansa en la boca superior del cilindro. La siguiente figura muestra el equipo utilizado:

Figura 33: Equipo utilizado para la Lixiviación por Agitación



Las filtraciones de la solución resultante de la lixiviación se realizan mediante un embudo y papel filtro Whatman del N°2, este papel es de un tamaño apropiado para recibir la solución en recipientes de vidrio o plástico.

a) Materiales

- Materiales de vidrio, como vasos precipitados de diferentes graduaciones, probetas y embudos.
- Guantes de neopreno.

- Una trompa con cartuchos químicos MGV-2 para gases ácidos y vapores orgánicos. Una trompa para polvos TC-21-133 marca MSA.
- Botellas de plástico para muestras líquidas y bolsas de plástico para guardar muestras sólidas.
- Balanza analítica marca Sartorius.
- pH-metro modelo C6-837.
- Picnómetro.
- Horno y bandejas para secar muestras.

b) Condiciones para la Lixiviación por Agitación

Las condiciones que se establecen son:

a) Tamaño del reactor: Este tiene las siguientes características:

- Diámetro interno: 18,2 cm.
- Diámetro externo: 19,1 cm.
- Altura interna: 27,5 cm.
- Altura externa: 27,7 cm.
- Volumen interno Reactor (sin deflectores): 7154 cm³.
- Volumen interno Reactor (con deflectores): 6695 cm³.

b) Muestra seca a temperatura ambiente.

c) Velocidad de agitación: La velocidad establecida para las pruebas es de 650 rpm.

d) Solución lixivante: La solución lixivante utilizada es ácido sulfúrico el cual presenta las siguientes características:

- Densidad ácido sulfúrico: 1,84 g/mL.
- Concentración ácido sulfúrico: 95%.

e) Agua industrial, ocupada en los procesos normales de lixiviación y flotación de minerales de cobre en la Planta Vallenar.

c) Variables de estudio

- Volumen de ácido sulfúrico.
- Porcentaje de sólidos en la agitación.
- Tiempo lixiviación.
- Análisis de metales.

d) Determinación de Características Físicas

Las características físicas que se determinaron para el lodo fueron las siguientes:

Tabla 27: Características Físicas Lodos

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	CONTENIDO
% Humedad	5,3 %
Peso específico	3,63 g/mL
Consumo de ácido	7,62 Kg de ácido/ Kg de cobre
Densidad aparente	0,81 g/mL

e) Ecuaciones

Las ecuaciones que se van a utilizar en la determinación de las condiciones en las cuales se va a trabajar son las siguientes:

$$\text{Ec 1) Masa del Líquido} = \text{Masa del Sólido} * ((100 - \% \text{ Sólidos}) / \% \text{ Sólidos})$$

Ec 2) Volumen Total (mL) = Volumen Sólido (mL) + Volumen Líquido (mL)

Ec 3) Masa ácido = (Masa Lodo (g) * Concentración Cu Soluble (%) * Consumo Acido (g/g)* % Máximo Recuperación Cu por Lixiviación* % Error en Consumo)/(100* Concentración Acido)

Ec 4) Volumen Líquido (mL) = Volumen Acido + Volumen Agua

f) Cálculos

Los cálculos que se realizan para la determinación de las condiciones en que se va a realizar los experimentos de cinética se indican a continuación tomando como ejemplo la cinética de lodo con 50% sólidos.

f.1) Cálculo Relación Masa Sólido/ Masa Líquido

En la determinación de la relación masa sólido/masa líquido se utiliza la ecuación 1:

Tabla 28: Datos Determinación Masa Sólido/Masa Líquido

DATOS	CONTENIDO
% Sólidos	50%
Volumen Total	3000 mL
% Humedad	5,3%
Peso específico	3,63 g/mL
Densidad Líquido	1 g /mL

$$\text{Masa Líquido} = \text{Masa Sólido} * ((100 - 50) / 50)$$

$$\text{Masa Líquido} = \text{Masa Sólido}$$

f.2) Cálculo Masa Sólido

- En la determinación de la masa del sólido se utiliza la ecuación 2:

$$3000 \text{ mL} = (\text{Masa Sólido} / 3,63 \text{ g/mL}) + (\text{Masa Sólido} / 1 \text{ g/ml})$$

$$3000 \text{ mL} = \text{Masa Sólido} * ((1/3,63 \text{ g/mL}) + 1)$$

$$\text{Masa Sólido} = 2352 \text{ g}$$

- Considerando el porcentaje de humedad del sólido:

$$\text{Masa sólido húmedo} = (2352 \text{ g} * 105,3\%) / 100\%$$

$$\text{Masa sólido húmedo} = 2477 \text{ g}$$

f.3) Cálculo Volumen Líquido

En la determinación del volumen del líquido se utiliza la ecuación 2:

$$3000 \text{ mL} = (2352 \text{ g} / 3,63 \text{ g/mL}) + \text{Volumen Líquido}$$

$$\text{Volumen Líquido} = 2352 \text{ mL}$$

f.4) Cálculo Masa de Acido

En la determinación de la masa del ácido se utiliza la ecuación 3:

Tabla 29: Datos Determinación Masa Acido

DATOS	CONTENIDO
Consumo de Acido	7,62 g ácido/ g Cu
% Máximo de Recuperación de Cu por Lixiviación: 90%.	90%
% Error en el Consumo de Acido: 25%.	25%
Concentración Acido	95%

$$\text{Masa de Acido} = (2352 \text{ g} * 3,85\% * 7,62 \text{ g/g} * 0,9125) / (100 * 0,95)$$

$$\text{Masa de Acido} = 817 \text{ g}$$

f.5) Calculo Volumen de Agua

En la determinación del volumen de agua se utiliza la ecuación 4:

$$2352 \text{ mL} = (817\text{g}/ 1,84 \text{ g/mL}) + \text{Volumen Agua (mL)}$$

$$\text{Volumen Agua} = 1907 \text{ mL}$$

Se considera el volumen de agua que se agrega en la masa húmeda:

$$\text{Volumen Agua agregado Sólido} = \text{Masa Sólido Húmedo} - \text{Masa Sólido Seco}$$

$$\text{Volumen Agua agregado Sólido} = 2477 \text{ g} - 2352 \text{ g}$$

$$\text{Volumen Agua agregado Sólido} = 125 \text{ mL}$$

Volumen Agua = 1907 mL – 125 mL

Volumen Agua = 1782 mL

9.5 Parte Experimental

9.5.1 Cinéticas de Lixiviación por Agitación

a) Procedimiento Experimental

- a) Agregar al reactor una determinada masa de lodo.
- b) Agregar un volumen determinado de ácido sulfúrico y agua.
- c) Agitar a una velocidad de 650 rpm, y dejar lixiviando.
- d) Tomar alícuotas de un determinado volumen cada ciertos intervalos de tiempo de la solución agitada.
- e) Filtrar las alícuotas tomadas de la solución agitada.
- f) Enviar el extracto líquido obtenido de las alícuotas a análisis por cobre total y acidez libre.

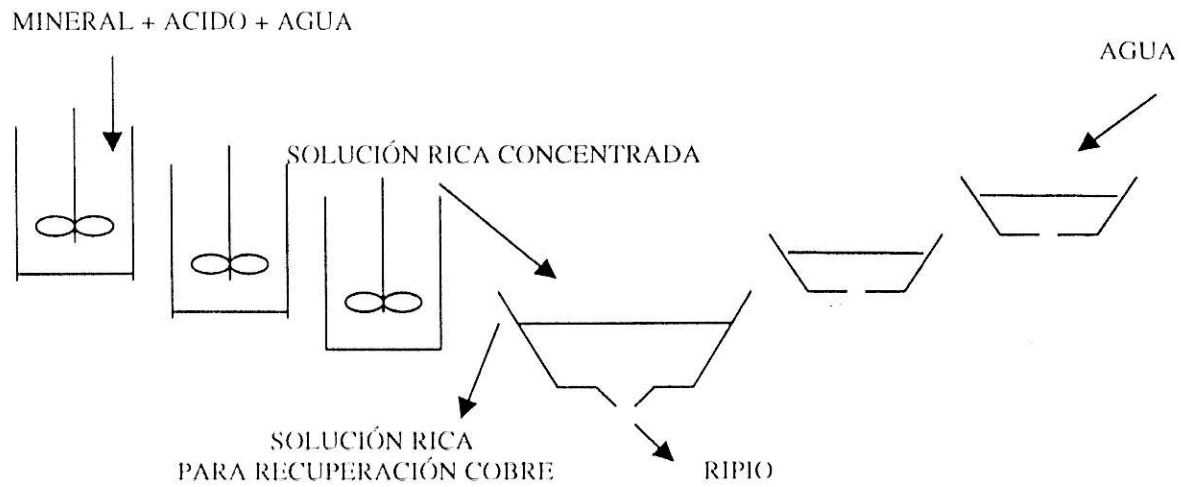
9.5.2 Proceso de una Lixiviación por Agitación

El procedimiento experimental para una lixiviación por agitación que se diseñó, se basó en simular un proceso industrial para la lixiviación de minerales de cobre oxidados.

En el proceso los minerales ingresan a los agitadores donde se genera una solución rica en cobre la cual por rebalse va pasando por los agitadores hasta llegar a los espesadores. Los espesadores tienen como función separar el líquido del sólido. Además en estos ocurre una etapa de lavado en contracorriente la cual tiene como función liberar la solución que queda retenida en el sólido, generando una fuerte turbulencia esta retención se produce por adsorción o por una retención mecánica.

Por último la solución que sale de los espesadores presenta una concentración de cobre apropiada para la recuperación de éste por procesos tales como adición de chatarra de fierro y extracción por solventes.

Figura 34: Proceso Industrial de una Lixiviación por Agitación

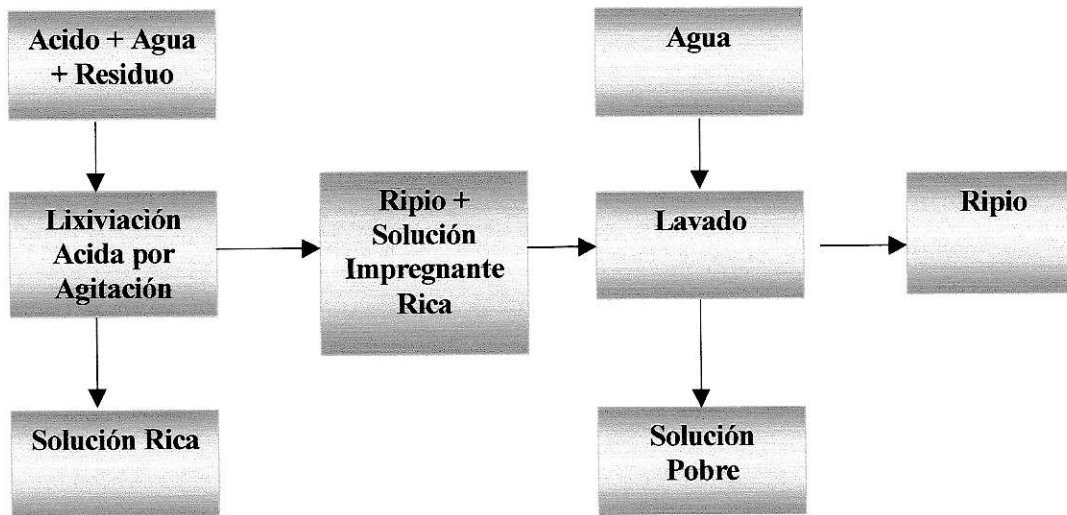


En base esto se propusieron dos diseños de trabajo para realizar la prueba a nivel de laboratorio:

a) Procedimiento Experimental 1

El diseño del procedimiento experimental se presenta en la siguiente figura:

Figura 35: Esquema del Procedimiento Experimental 1



a.1) Procedimiento Experimental obtención Solución Rica

- Agregar al reactor una determinada masa de lodo.
- Agregar un volumen determinado de ácido sulfúrico y agua.
- Agitar a una velocidad de 650 rpm, y dejar lixiviando durante un tiempo determinado por la cinética.
- Parar la agitación.
- Filtrar la solución proveniente de la agitación.
- Medir el volumen de la solución rica obtenida.
- Guardar la solución rica en botellas de plástico.

a.2) Procedimiento Experimental obtención Solución Impregnante

En la determinación de la solución impregnante de la solución rica se considera el siguiente procedimiento:

- a) Pesar los filtros secos y vacíos antes de la filtración de la solución que resultante de la agitación.
- b) Pesar los filtros húmedos + rípios, luego de terminada la filtración.

a.3) Procedimiento Experimental obtención Solución Pobre

- a) Los filtros húmedos + rípios se lavan con agua sobre un recipiente plástico.
- b) La solución resultante del lavado es vaciada al reactor.
- c) Agitar la solución por un tiempo determinado.
- d) Parar la agitación.
- e) Filtrar la solución proveniente de la agitación.
- f) Guardar la solución pobre en botellas de plástico.

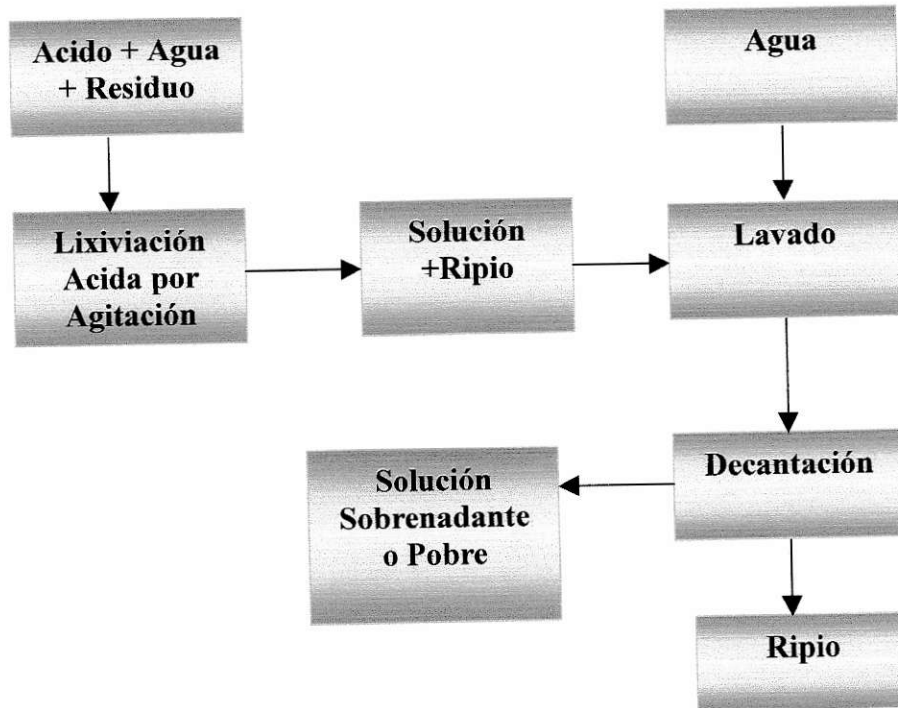
a.4) Procedimiento Experimental obtención Rípios

- a) Secar a 40°C los filtros + rípios hasta que los rípios estén secos.
- b) Sacar los rípios de los filtros.
- c) Pesar filtros secos vacíos.
- d) Pesar una porción de rípios y secar a 105°C.
- e) Determinar peso seco rípios (105°C).

b) Procedimiento Experimental 2

El esquema que se muestra a continuación presenta el diseño del procedimiento experimental 2:

Figura 36: Esquema del Procedimiento Experimental 2



b.1) Procedimiento Experimental obtención Solución

- Agregar al reactor una determinada masa de lodo.
- Agregar un volumen determinado de ácido sulfúrico y agua.
- Agitar a una velocidad de 650 rpm, y dejar lixiviando durante un tiempo determinado por la cinética.
- Parar la agitación.
- Vaciar la solución agitada a un recipiente plástico de mayor volumen.
- Agregar agua a la solución agitada.

- g) Agitar por un tiempo determinado.
- h) Vaciar a un recipiente plástico de mayor volumen.
- i) Dejar decantar.
- j) Sacar la solución sobrenadante (o pobre) por gravedad y filtrar.
- k) Medir Volumen Solución.

b.2) Procedimiento Experimental obtención Solución Impregnante

- a) Pesar los filtros secos y vacíos antes de la filtración de la solución pobre.
- b) Pesar los filtros húmedos + rípios.

b.3) Procedimiento Experimental obtención Rípios

- a) Secar rípio a 105°C en bandejas pesadas.
- b) Pesar rípios secos a 105°C.
- c) El rípio que contenía la solución sobrenadante (o pobre) que fue filtrada, se lavó y luego se filtró siguiendo los siguientes pasos:
 - Pesar los filtros secos y vacíos.
 - Pesar los filtros húmedos + rípios
 - Secar a 40°C los filtros + rípios hasta que los rípios estén secos
 - Sacar los rípios de los filtros.
 - Secar rípios a 105°C en bandejas.

9.6 Experimentos

9.6.1 Experimentos Lodos

a) Experimento 1: Cinética Lodo 50% Sólidos

Los cálculos para la determinación de las condiciones que se van a utilizar para la realización de la cinética del lodo al 50% se indicaron anteriormente. Los datos calculados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 30: Datos Experimento 1

DATOS	CONTENIDO
% Sólidos	50%
Volumen Total	3000 mL
% Humedad	5,3%
Peso Específico	3,63 g/mL
Densidad Líquido	1 g /mL

Tabla 31: Condiciones Experimento 1

CONDICIONES	CONTENIDO
Masa del lodo (seco 105°C)	2352 g
Masa del lodo (húmeda)	2477 g
Kg de ácido	0,817 Kg
Volumen Líquido	2352 mL
Volumen de ácido	444 mL
Volumen de agua	1782 mL

b) Experimento 2: Cinética Lodos 45% Sólidos

Los cálculos para la determinación de las condiciones que se van a utilizar para la realización de la cinética del lodo al 45% se realizan de la misma forma que el experimento 1, se utilizan los siguientes datos:

Tabla 32: Datos Experimento 2

DATOS	CONTENIDO
% Sólidos	45%
Volumen Total	3500 mL
% Humedad	18,3%
Peso Específico	3,63 g/mL
Densidad Líquido	1 g /mL

Tabla 33: Condiciones Experimento 2

CONDICIONES	CONTENIDO
Masa del lodo (seco 105°C)	2352 g
Masa del lodo (húmeda)	2782 g
Kg de ácido	0,817 Kg
Volumen Líquido	2852 mL
Volumen de ácido	444 mL
Volumen de agua	1978 mL

c) Experimento 3: Cinética Lodos 35% Sólidos

Los cálculos para la determinación de las condiciones que se van a utilizar para la realización de la cinética del lodo al 35% se realizan de la misma forma que las cinéticas anteriores utilizando los siguientes datos:

Tabla 34: Datos Experimento 3

DATOS	CONTENIDO
% Sólidos	35%
Volumen Total	3000 mL
% Humedad	5,3%
Peso Específico	3,63 g/mL
Densidad Líquido	1 g /mL

Tabla 35: Condiciones Experimento 3

CONDICIONES	CONTENIDO
Masa del lodo (seco 105°C)	1407 g
Masa del lodo (húmeda)	1482 g
Kg de ácido	0,488 Kg
Volumen Líquido	2612 mL
Volumen de ácido	266 mL
Volumen de agua	2272 mL

d) Experimento 4: Lixiviación por Agitación de Lodos

En base a los resultados obtenidos por las cinéticas de lixiviación por agitación se escogió trabajar con el procedimiento experimental 2 a 45% de sólidos, bajo las siguientes condiciones:

Tabla 36: Condiciones Experimento 4

CONDICIONES	CONTENIDO
Masa del lodo (seco 105°C)	2352 g
Masa del lodo (húmeda)	2782g
Kg. de ácido	0,691 Kg
Volumen Líquido	2852 mL
Volumen de ácido	376 mL
Volumen de agua	2046 mL

9.6.2 Experimentos Polvos P.E.P.A.

Adicionalmente se trabajó con otro residuo de la Empresa, el polvo P.E.P.A

En él se determinaron los siguientes parámetros:

Tabla 37: Parámetros del Polvo P.E.P.A.

PARÁMETROS	CONTENIDO
Peso específico	5,85 g/mL
Consumo de ácido	No hay consumo
% de Humedad	0,42 %
Tamizado	100 % bajo malla 150 Tyler

a) Experimento 5: Cinética P.E.P.A 50% Sólidos

Los cálculos para la determinación de las condiciones de la cinética del polvo al 50% son similares a los realizados en el lodo. En este experimento se utilizó agua como solución lixivante. Los datos utilizados y condiciones se indican a continuación:

Tabla 38: Datos Experimento 5

DATOS	CONTENIDO
% Sólidos	50%
Volumen Total	3000 mL
% Humedad	0,42%
Peso Específico	5,85 g/mL
Densidad Líquido	1 g /mL

Tabla 39: Condiciones Experimento 5

CONDICIONES	CONTENIDO
Masa de polvo PEPA (seco 105°C)	2562 g
Masa de polvo PEPA (húmedo)	2572 g
Volumen Líquido	2562 mL
Volumen de agua	2552 mL

b) Experimento 6: Cinética P.E.P.A 30% Sólidos

Los cálculos para la determinación de las condiciones que se van a utilizar para la realización de la cinética del polvo al 30% son los mismos que la anterior cinética, este experimento se

realiza utilizando agua como solución lixivante. Los datos utilizados y condiciones se indican a continuación:

Tabla 40: Datos Experimento 6

DATOS	CONTENIDO
% Sólidos	30%
Volumen Total	3000 mL
% Humedad	0,42%
Peso Específico	5,85 g/mL
Densidad Líquido	1 g /mL

Tabla 41: Condiciones Experimento 6

CONDICIONES	CONTENIDO
Masa de polvo PEPA (seco 105°C)	1198 g
Masa de polvo PEPA (húmedo)	1203 g
Volumen Líquido	2795 mL
Volumen de agua	2790 mL

c) Experimento 7: Cinética P.E.P.A 50% Sólidos con Acido

Los cálculos para la determinación de las condiciones que se van a utilizar para la realización de la cinética del polvo al 50% con ácido son los mismos que los realizados en el caso del lodo, tomando como dato de consumo de ácido el estequiométrico el cual se indica a continuación:

Tabla 42: Datos Experimentos 7

DATOS	CONTENIDO
% Sólidos	50%
Volumen Total	3000 mL
% Humedad	0,42%
Peso Específico	5,85 g/mL
Densidad Líquido	1 g /mL
Consumo de Acido	1,53 g de ácido/ g de Cu

Tabla 43: Condiciones Experimento 7

CONDICIONES	CONTENIDO
Masa de polvo P.E.P.A (seco 105 °C)	2562 g
Masa del polvo P.E.P.A (húmeda)	2573 g
Kg de ácido	0,234 Kg
Volumen Líquido	2562 mL
Volumen de ácido	127 mL
Volumen de agua	2424 mL

d) Experimento 8: Cinética P.E.P.A 30% Sólidos con Acido

Los cálculos para la determinación de las condiciones que se van a utilizar para la realización de la cinética del polvo al 30% con ácido son los mismos que los realizados en el caso del experimento 7, se toma también el dato de consumo de ácido estequiométrico:

Tabla 44: Datos Experimento 8

DATOS	CONTENIDO
% Sólidos	30%
Volumen Total	3000 mL
% Humedad	0,42%
Peso Específico	5,85 g/mL
Densidad Líquido	1 g /mL
Consumo de Acido	1,53 g de ácido/ g de Cu

Tabla 45: Condiciones Experimento 8

CONDICIONES	CONTENIDO
Masa de polvo P.E.P.A (seco 105°C)	1198 g
Masa del polvo P.E.P.A(húmeda)	1203 g
Kg de ácido	0,110 Kg
Volumen Líquido	2795 mL
Volumen de ácido	60 mL
Volumen de agua	2730 mL

e) Experimento 9: Lixiviación por Agitación de polvo P.E.P.A

En base a los resultados obtenidos por las cinéticas de lixiviación de los polvos se escogió agitar este a 30% de sólidos con agua, utilizando el procedimiento 1, bajo las siguientes condiciones:

Tabla 46: Condiciones Experimento 9

CONDICIONES	CONTENIDO
Masa de polvo PEPA (seco 105°C)	1198 g
Masa de polvo PEPA (húmedo)	1203 g
Volumen Líquido	2795 mL
Volumen de agua	2790 mL

f) Experimento 10: Lixiviación por Agitación de una Mezcla de Polvo P.E.P.A y Lodo relación 6:1

En base a los resultados obtenidos por las cinéticas de lixiviación se procedió a mezclar ambos residuos en la relación 6:1, con 30% de sólidos, los cálculos se realizaron similarmente a los anteriores experimentos. El procedimiento experimental que se ocupó fue el 1:

Tabla 47: Datos Experimento 10

DATOS	CONTENIDO
% Sólidos	30%
Volumen Total	3000 mL
% Humedad polvo P.E.P.A	0,42%
% Humedad Lodo	5,3 %
Peso Específico	5,53 g/mL
Densidad Líquido	1 g /mL
Consumo de Acido Lodo	7,62 g de ácido/ g de Cu
Consumo de Acido polvo P.E.P.A	No hay consumo

Tabla 48: Condiciones Experimento 10

CONDICIONES	CONTENIDO
Masa Mezcla (105°C)	1193 g
Masa de polvo PEPA (seco 105°C)	1023 g
Masa de polvo PEPA (húmedo)	1027 g
Masa Lodo (seco 105°C)	170 g
Masa Lodo (húmedo)	179 g
Volumen Líquido	2784 mL
Volumen de agua	2737 mL
Masa ácido	62 g
Velocidad de agitación	650 rpm
Tiempo de agitación	100 min

9.7 Resultados

A continuación se presentan los resultados de los experimentos realizados, los cálculos llevados a cabo se encuentran en el Anexo A.

a) Experimento 1

Los lodos en este experimento presentaron problemas de permeabilidad en la agitación, por lo que no fue posible obtener resultados.

b) Experimento 2

Los porcentajes de recuperación de cobre obtenidos con 45% de sólidos para los lodos se muestran a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 49: % Recuperación de Cobre (Experimento 2)

TIEMPO LIXIVIACIÓN (MINUTOS)	RECUPERACIÓN COBRE (%)
20	74,3
40	76,3
60	78,6
90	64,6
120	77,4
150	79,1
180	78,5
210	75,3
240	75,6
340	72,9

c) Experimento 3

Los porcentajes de recuperación de cobre obtenidos con 35% de sólidos para los lodos se muestran a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 50: % Recuperación de Cobre (Experimento 3)

TIEMPO LIXIVIACION (MINUTOS)	RECUPERACION COBRE (%)
20	103,7
40	106,1
60	99,5
90	114,5
120	102,7
160	109,6
210	109,3
270	106,2
340	101,0

d) Experimento 4

Las distribuciones de los metales, en la solución rica, solución impregnante y ripio luego de realizar una lixiviación ácida para los lodos, se muestran a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 51: Distribución de los Metales (Experimento 4)

ELEMENTO	FINO ENTRADA	FINO SOLUCION RICA	FINO SOLUCIÓN IMPREGNANTE	FINO RIPIO	BALANCE DE MASA
	Gramos	Gramos	Gramos	Gramos	Gramos
Cu	112,9	35,6	1,2	73,4	110,2
Fe	103,0	11,0	0,0	18,0	29,0
As	218,0	34,4	1,2	138,9	174,5
Pb	17,4	0,1	0	17,5	17,6
Cd	3,8	0,5	0	2,9	3,4
Hg	6,0	0	0	4,7	4,7
Sb	0,90	0,10	0,00	0,70	0,80
Ag	0,12	0	0	0,22	0,23
Se	1,7	0,1	0,0	2,0	2,0

e) Experimento 5

Los porcentajes de recuperación de cobre obtenidos con 50% de sólidos para los polvos P.E.P.A. sin ácido se muestran a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 52: % Recuperación de Cobre (Experimento 5)

TIEMPO LIXIVIACION (MUNUTOS)	RECUPERACION COBRE (%)
10	29,3
20	38,0
35	44,9
50	37,7
70	41,9
100	49,8
130	44,8
190	43,0

f) Experimento 6

Los porcentajes de recuperación de cobre obtenidos con 30% de sólidos para los polvos P.E.P.A. sin ácido se muestran a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 53: % Recuperación de Cobre (Experimento 6)

TIEMPO LIXIVIACION (MINUTOS)	RECUPERACION COBRE (%)
5	71,8
10	73,8
20	71,2
40	73,1
60	73,4
100	74,9
120	64,7
160	71,8
200	69,0

g) Experimento 7

Los porcentajes de recuperación de cobre obtenidos con 50% de sólidos para los polvos P.E.P.A. con ácido se muestran a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 54: % Recuperación de Cobre (Experimento 7)

TIEMPO LIXIVIACION (MINUTOS)	RECUPERACION COBRE (%)
10	44,6
20	47,2
30	45,8
50	42,9
70	40,8
100	37,7
130	34,9
190	35,3

h) Experimento 8

Los porcentajes de recuperación de cobre obtenidos con 30% de sólidos para los polvos P.E.P.A. con ácido se muestran a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 55: % Recuperación de Cobre (Experimento 8)

TIEMPO LIXIVIACION (MINUTOS)	RECUPERACION COBRE (%)
5	79,1
10	78,8
20	78,7
30	78,8
50	75,0
70	74,0
100	78,8
140	78,2
160	79,3

i) Experimento 9

Las distribuciones de los metales, en la solución rica, solución impregnante y ripio luego de realizar una lixiviación ácida en los polvos P.E.P.A., se muestran a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 56: Distribución de los Metales (Experimento 9)

ELEMENTO	FINO ENTRADA	FINO SOLUCIÓN RICA	FINO SOLUCIÓN IMPREGNANTE	FINO RIPIO	BALANCE MASA
	Gramos	Gramos	Gramos	Gramos	Gramos
Cu	74,3	39,4	9,2	25,5	74,1
Fe	7,9	1,3	0,3	16,9	18,5
As	133,9	77,4	18	44,3	139,7
Pb	195,5	0	0	172,9	172,9
Cd	5,8	3,8	0,9	0,8	5,5
Hg	0,10	0,00	0,00	0,10	0,10
Sb	2,4	0,4	0,1	1,4	1,9
Ag	0,08	0	0	0,07	0,07
Se	0,12	0,02	0	0,08	0,1

j) Experimento 10

Las distribuciones de los metales, en la solución rica, solución impregnante y ripio luego de realizar una lixiviación ácida en una mezcla de polvos P.E.P.A. con lodos en una proporción 6:1, se muestran a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 57: Distribución de los Metales (Experimento 10)

ELEMENTO	FINO ENTRADA	FINO SOLUCIÓN RICA	FINO SOLUCIÓN IMPREGNANTE	FINO RIPIO	BALANCE MASA
	Gramos	Gramos	Gramos	Gramos	Gramos
Cu	72,0	39,0	13,0	18,0	71,0
Fe	14,0	3,0	1,0	6,0	10,0
As	130,6	59,0	20,0	43,0	122,0
Pb	169,0	0,0	0,0	141,0	141,0
Cd	5,0	3,0	1,0	1,0	5,0
Hg	0,50	0,00	0,00	0,50	0,50
Sb	2,0	1,0	0,0	1,0	2,0
Ag	0,08	0,00	0,00	0,07	0,07
Se	0,20	0,10	0,00	0,20	0,30

h) Porcentaje de Consumo de Acido y Generación de Acido

Al realizar las cinéticas de lixiviación se presentan dos tipos de situaciones:

- Consumo de ácido del lodo.
- Generación de ácido de los polvos P.E.P.A.

En la tabla siguiente se muestra el rango de porcentaje de ácido consumido y de generación de ácido para las cinéticas realizadas en el tiempo:

Tabla 58: % Acido Consumido y Generado

EXPERIMENTO	% ACIDO CONSUMIDO	% ACIDO GENERADO
1	-----	-----
2	71,4-77,8	-----
3	65,9-73,3	-----
5	-----	36,7-69,8
6	-----	0
7	-----	33,0-84,4
8	-----	48,2-61,6

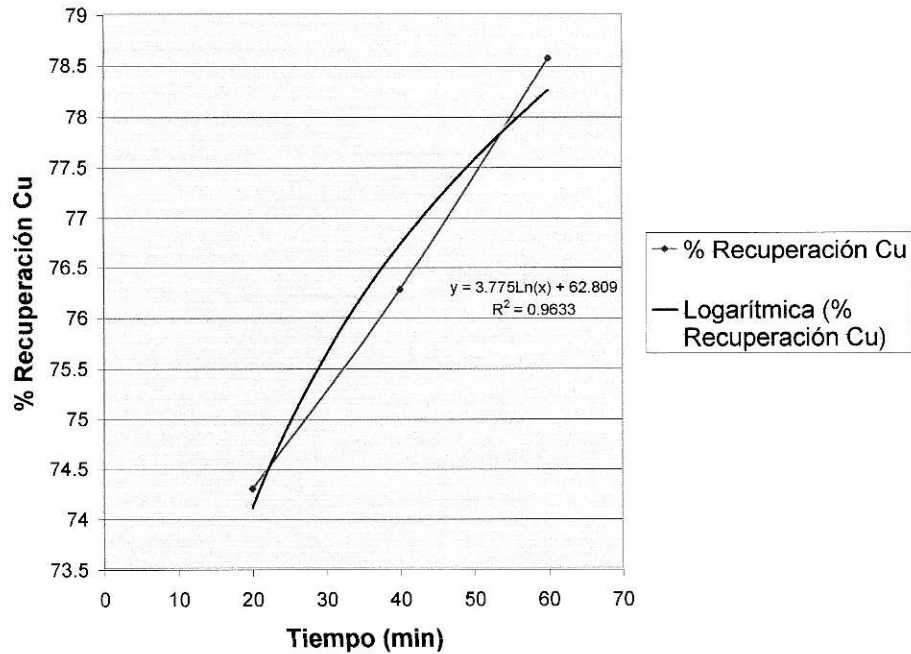
Nota: Las tablas completas se presentan en el anexo A.

9.8 Análisis y Discusión de Resultados

1. Las cinéticas de lixiviación ácida realizadas tanto para los lodos como para los polvos P.E.P.A. indican solamente una tendencia de la recuperación del cobre soluble a través del tiempo ya que estas curvas fueron confeccionadas sin considerar la pérdida de masa de los residuos.
2. Los lodos luego de ser lixiviados, fueron filtrados para separar el sólido del líquido obtenido, pero estos presentaron dificultades técnicas durante esta separación, debido a la formación de una masa gelatinosa. En el laboratorio se contaba con equipo de filtración al vacío para la separación de éste, pero tampoco se obtuvieron resultados óptimos.
3. En relación a las cinéticas de lixiviación de los lodos se puede indicar que:
 - El experimento 1 con 50% de sólidos presentó problemas de permeabilidad, es decir al agregar ácido y agua al lodo éste no se mojó en su totalidad, por lo tanto, de este experimento no se obtuvo una solución que haya sido representativa para el análisis.
 - El experimento 2 con 45% de sólidos no presentó problemas de permeabilidad. Sin embargo, durante su filtración presentó dificultades, por esto en la confección de la curva de porcentaje de recuperación de cobre se asume que el líquido filtrado corresponde al total del líquido agregado.
 - El experimento 3 con 35% de sólidos no presentó problemas de permeabilidad. Sin embargo, la filtración también presentó dificultades, sus curvas fueron confeccionadas de la misma forma que el experimento 2.
4. Los resultados obtenidos con 45% de sólidos para el lodo muestran una mayor recuperación de cobre a los 60 minutos con un 78,6%, el comportamiento de la curva

luego de este tiempo muestra una disminución en su recuperación, la tendencia observada entre los 20 y 60 minutos se muestra en el siguiente gráfico:

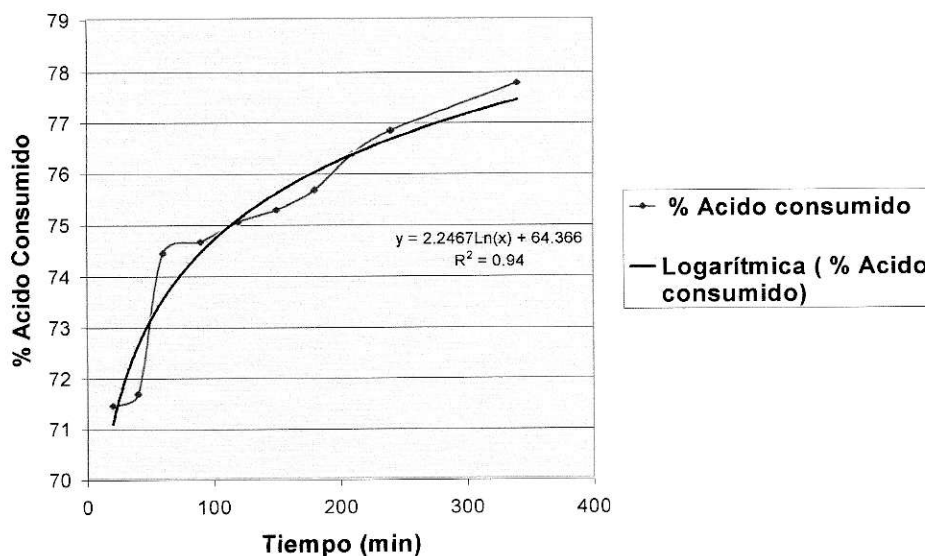
Figura 37: % Recuperación Cobre Lodo 45% (60 min)



Esta delimitación se realiza debido a que un mayor tiempo de lixiviación solo implica un gasto de energía de acuerdo a los resultados obtenidos.

El porcentaje de ácido consumido en el tiempo aumenta, al adicionar una curva de tendencia logarítmica a este gráfico se obtiene:

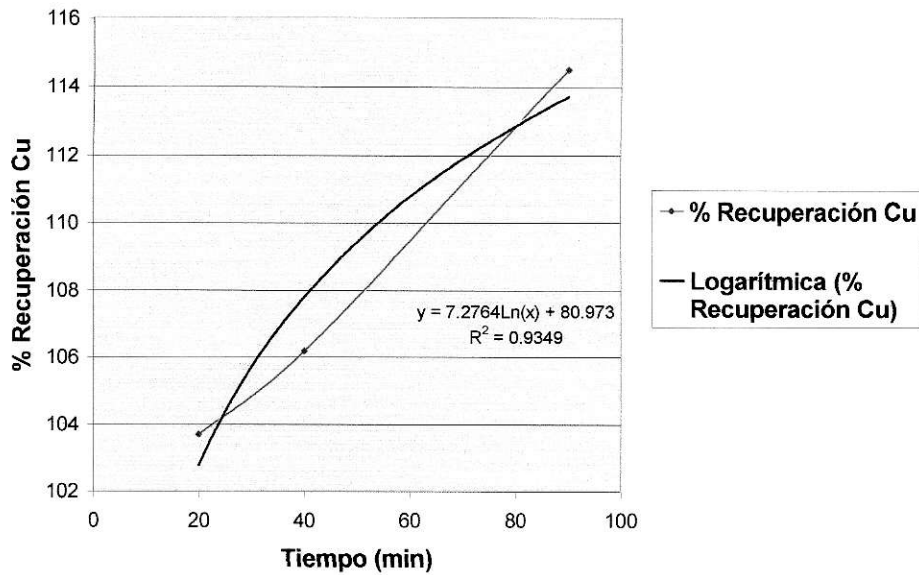
Figura 38: % Acido Consumido Lodo 45%



La cantidad de ácido agregado fue de 0,817 Kg, ocupando la ecuación $y = 2,2467\ln(x) + 64,366$ se obtiene que el ácido consumido fue 0,601 Kg a los 60 minutos.

5. La cinética de lixiviación ácida de los lodos con 35% de sólidos, muestra resultados de recuperación de cobre sobre el 100%, esto puede deberse a las dificultades de filtración, ya que la ley obtenida de cobre en el líquido filtrado puede que no haya sido representativa. Además el comportamiento de la curva de recuperación de cobre es bastante poco definido en el tiempo, observándose una fluctuación. Sin embargo la máxima recuperación de cobre se produce a los 90 minutos, si se delimita la curva a este tiempo y se elimina el punto de los 60 minutos se tiene:

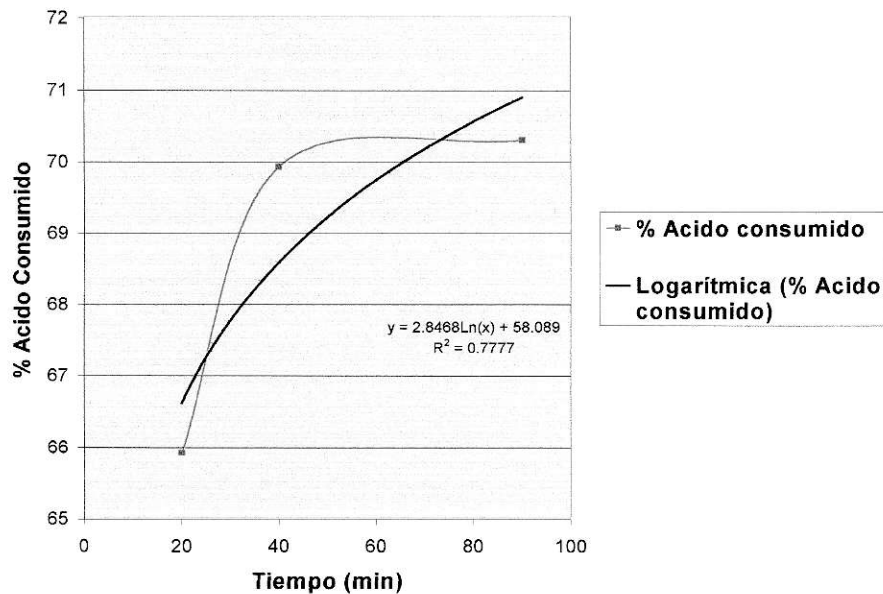
Figura 39: % Recuperación de Cobre Lodo 35% (90 min)



De la curva $y = 7,2764\ln(x) + 80,973$ se tiene una recuperación de cobre a los 90 minutos de 113,7%.

La curva de porcentaje de consumo de ácido si se delimita a los 90 minutos y se elimina el punto de los 60 minutos se tiene que:

Figura 40: % Acido Consumido Lodo 35% (90 min)



Donde la cantidad de ácido agregado inicialmente fue de 0,488 Kg, ocupando la curva obtenida $y = 2,8468\ln(x) + 58,089$ se tiene un consumo de ácido a los 90 min de 70,9% lo que equivale a 0,346 Kg de ácido consumido.

6. El objetivo de trabajar con una línea de tendencia en las cinéticas realizadas en los lodos, es debido a que las curvas obtenidas tanto de porcentaje de recuperación de cobre como de porcentaje de consumo de ácido no presentan un comportamiento definido, esto se puede deber a la complejidad de la matriz del lodo y a las dificultades técnicas (filtración) que ella genera.
7. Se realizó una lixiviación ácida en los lodos con el objeto de determinar el comportamiento de los diferentes metales a través del proceso (experimento 4), se escogió para realizar esta experiencia trabajar con 45% de sólidos, de acuerdo a la cinética realizada se estableció el tiempo de lixiviación en 60 minutos y la cantidad de ácido en 0,691 Kg. La cantidad de ácido se estableció de acuerdo a los 0,601 Kg de ácido calculado, agregando un 15% de ácido.
8. Los resultados obtenidos en el experimento 4, muestran diferencias con el fino de entrada y el fino en el balance total luego de haber hecho la lixiviación, esto se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 59: Diferencias Fino Entrada y Fino Balance en el Lodo

ELEMENTO	FINO ENTRADA	BALANCE	DESVIACIÓN
	Gramos	Gramos	Gramos
Cu	112,9	110,2	2,7
Fe	102,5	29,3	73,2
As	218,0	174,5	43,5
Pb	17,4	17,6	-0,2
Cd	3,8	3,4	0,4

Hg	6,0	4,7	1,3
Sb	0,89	0,78	0,11
Ag	0,12	0,23	-0,11
Se	1,7	2,0	-0,3

La desviación más significativa se observa en el hierro con 73,2 g y en el arsénico 43,5 g. Las desviaciones de los demás metales no presentaron grandes diferencias al comparar la entrada con el balance de masa. Estas desviaciones se pueden deber básicamente a las etapas en el proceso involucrado y a las interacciones que puedan existir en la matriz del lodo. Por otro lado se deberá considerar la solubilidad en medio ácido de estos metales. Además algunas posibles dificultades en los análisis (As).

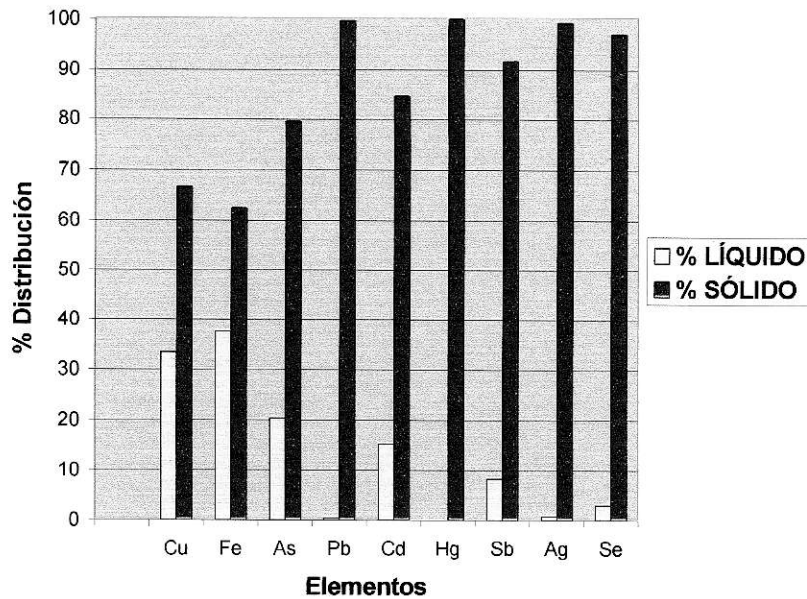
9. Considerando los resultados obtenidos en el experimento 4, y estableciendo que el fino del balance total es el 100%, se establece el porcentaje de los metales que queda en el líquido y que queda en el sólido, esto se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 60: Distribución de los Metales en el Sólido y en el Líquido para el Lodo

ELEMENTO	FINO LÍQUIDO	FINO SÓLIDO	% LÍQUIDO	% SÓLIDO
	Gramos	Gramos		
Cu	36,8	73,4	33,4	66,6
Fe	11	18,3	37,6	62,4
As	35,6	138,9	20,4	79,6
Pb	0,1	17,5	0,4	99,6
Cd	0,5	2,9	15,3	84,7
Hg	0,0	4,7	0,0	100,0
Sb	0,1	0,7	8,3	91,7
Ag	0,00	0,22	0,8	99,2
Se	0,1	2,0	3,0	97,0

A partir de estos datos se construye el gráfico %Distribución v/s Metales, el cual se muestra a continuación:

Figura 41: Distribución de Metales en el Lodo



Al observar el gráfico se tiene que los metales se distribuyeron mayoritariamente en el sólido, esto se debió al método experimental implementado para simular la lixiviación ácida, este fue realizado por las dificultades de filtración que presentó el lodo. El método consistió en que luego de la lixiviación se agregó agua para realizar el lavado, se agitó y luego se decantó, y se separó el líquido resultante mediante un sifón, hasta llegar a un límite en que el líquido no pudo ser separado del lodo, es debido a esto que el lodo una vez secado quedó enriquecido con parte de los metales aportados por el líquido.

10. La recuperación de cobre soluble en el experimento 4 alcanzó un 40,6%. Esto se muestra en la siguiente tabla:

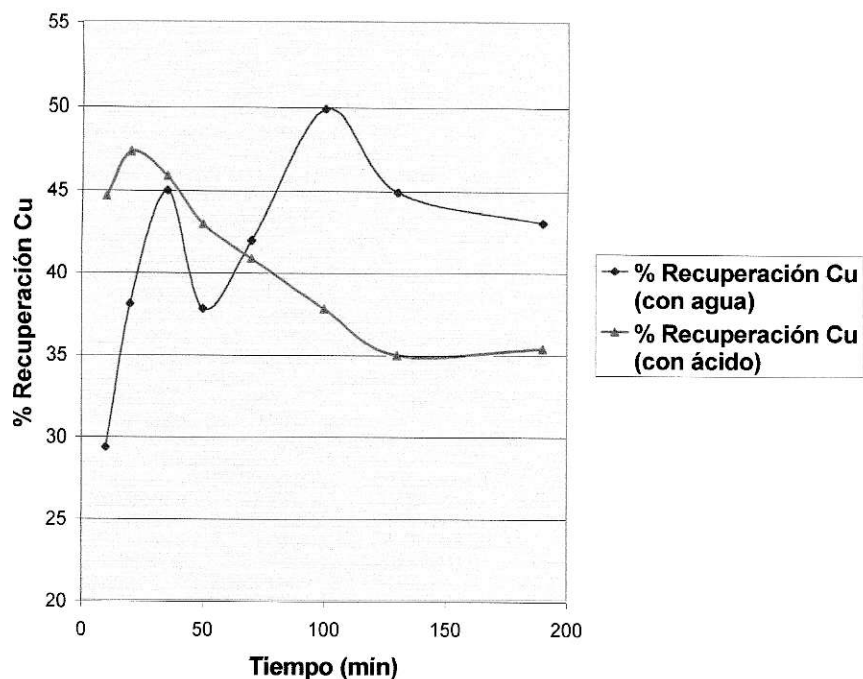
Tabla 61: % Recuperación Cobre en los Lodos

ELEMENTO	FINO ENTRADA	FINO LÍQUIDO	RECUPERACIÓN COBRE
	Gramos	Gramos	%
Cu soluble	90,6	36,8	40,6

La recuperación de cobre soluble 40,6% es baja con respecto a la obtenida en la cinética que alcanzó los 78,6%, esto es atribuible a lo anteriormente expuesto.

11. El ripio obtenido luego de la lixiviación pesó 1790 g, al compararlo con la masa del lodo que ingresa al sistema 2352 g se tiene una pérdida de masa de 24%.
12. Debido a las dificultades técnicas que presentó el lodo en su separación durante la filtración, la cual influyó en la recuperación de cobre y la distribución de los otros metales, la posibilidad de una mezcla con los polvos P.E.P.A. resulta interesante, para ello se llevaron a cabo pruebas de laboratorio con este residuo.
13. El polvo P.E.P.A. no presentó dificultades técnicas durante la filtración, con el se realizaron 4 cinéticas de lixiviación, donde se realizaron 2 cinéticas con 50% de sólidos una con agua y otra con ácido, experimento 5 y 7 respectivamente. Finalmente se realizaron 2 cinéticas con 30% de sólidos, una con agua y otra con ácido, experimento 6 y 8 respectivamente.
14. Al comparar los resultados obtenidos de porcentaje de recuperación de cobre en las cinéticas con 50% de sólidos con agua y con ácido se tiene que:

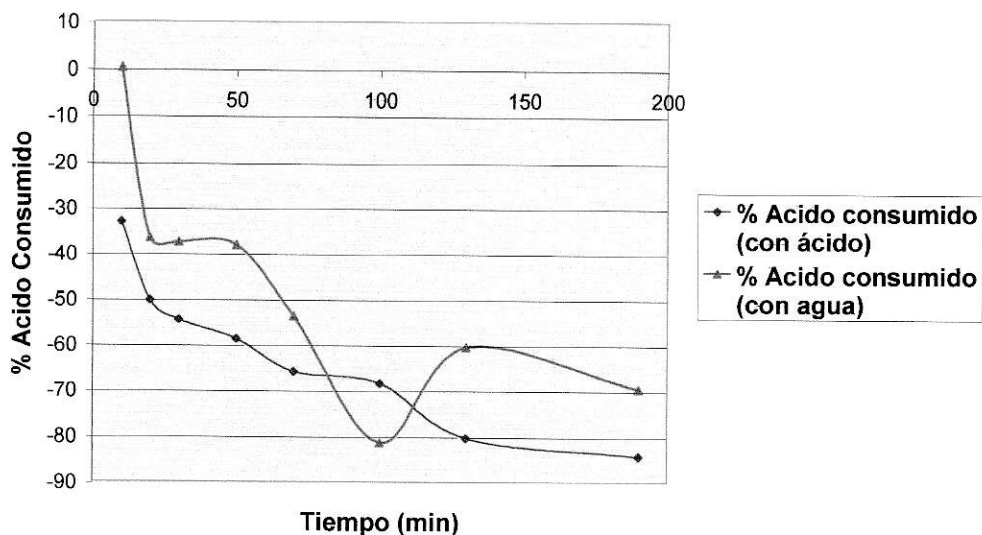
Figura 42: Comparación Cinéticas P.E.P.A 50%



La recuperación máxima de cobre de la cinética con agua se tiene a los 100 minutos con un 49,8%, y la recuperación máxima de cobre en la cinética con ácido se tiene a los 20 minutos con un 47,2%. Está comparación es importante de destacar debido a que el ácido en la actualidad tiene un valor aproximado de US\$ 39/ton, y el agua en un proceso normalmente se recupera para luego recircularla, aunque un mayor tiempo de lixiviación va a implicar un gasto en energía. La cantidad de ácido agregada fue la estequiométrica, es decir con un consumo de 1,53 Kg de ácido/ Kg de cobre. Cabe destacar que en la cinética realizada con ácido se formaron cristales durante la filtración el cual pudo haber influido en la ley de recuperación de cobre. No se realizan líneas de tendencia debido a que la recuperación máxima de cobre para la experiencia realizada con ácido se tiene a los 20 minutos.

15. El polvo P.E.P.A. es un residuo el cual genera ácido al agregarle al agua y esto hace que lixivie el cobre soluble presente, esto queda demostrado en los porcentajes de recuperación de cobre en el experimento con 50% de sólidos con agua, además esto se confirma con la curva de porcentaje de consumo de ácido que se muestra a continuación:

Figura 43: Comparación % Acido Consumido P.E.P.A. 50 %



Estas curvas muestran un consumo de ácido negativo, es decir generación de ácido, llegando ambas alrededor del -80%. La generación de ácido puede deberse a la presencia del plomo en el polvo P.E.P.A. con un 16,32%, este metal pertenece al grupo de cationes que siendo ácidos además tienen la tendencia a formar hidróxidos anfóteros, lo cual podría generar ácido como se muestra en la siguiente ecuación:



En el futuro se podría desarrollar un estudio más acabado que logrará explicar precisamente la generación de ácido por el polvo P.E.P.A.

16. Se realizaron 2 cinéticas adicionales con 30% de sólidos para el polvo P.E.P.A. una con agua y otra con ácido, las recuperaciones de cobre alcanzaron un máximo de 74,9% a los 100 minutos en la primera y un 79,1% a los 5 min en la segunda. La cantidad de ácido agregado fue la estequiométrica en ésta última, no se observó formación de cristales, por último se puede decir que el ácido agregado aumentó la recuperación de cobre en un 4,2%.

17. Al comparar las recuperaciones de cobre con 50% y 30% de sólidos con agua para el polvo P.E.P.A., se tiene que éstas aumentaron de un 49,8% a un 74,9%. Debido a esto, resulta interesante trabajar con menos porcentaje de sólidos para llevar a cabo una mayor recuperación de cobre.
18. Se llevó a cabo el experimento 9, el cual consistió en simular un proceso de lixiviación ácida para el polvo P.E.P.A., se eligió trabajar con 30% de sólidos, con agua, y tiempo de lixiviación de 100 minutos, para de este modo evaluar el comportamiento de los metales en el proceso. Los resultados obtenidos en el experimento 9, muestran diferencias con el fino de entrada y el fino en el balance total luego de haber hecho la lixiviación, esto se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 62: Diferencias Fino Entrada y Fino Balance en el Polvo P.E.P.A.

ELEMENTO	FINO ENTRADA	BALANCE	DESVIACIÓN
	Gramos	Gramos	Gramos
Cu	74,3	74,1	0,2
Fe	7,9	18,5	-10,6
As	133,9	139,7	-5,8
Pb	195,5	172,9	22,6
Cd	5,8	5,5	0,3
Hg	0,13	0,11	0,02
Sb	2,4	1,9	0,5
Ag	0,08	0,07	0,01
Se	0,12	0,1	0,02

La excepción al igual que en los lodos la presenta hierro, el cual en este caso aumentó su valor. Una posible explicación podría ser la naturaleza química del hidróxido de hierro y su dependencia con el pH.

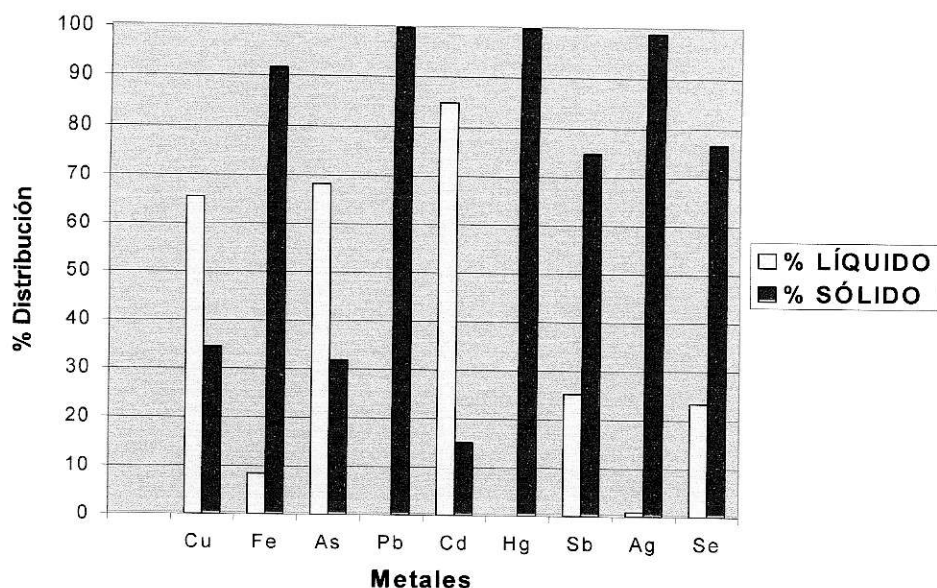
19. Considerando los resultados obtenidos en el experimento 9, y estableciendo que el fino del balance total es el 100%, se establece el porcentaje de los metales que queda en el líquido y que queda en el sólido, esto se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 63: Distribución de los Metales en el Sólido y en el Líquido para el Polvo P.E.P.A.

ELEMENTO	LIQUIDO	SÓLIDO	% LÍQUIDO	% SÓLIDO
	Gramos	Gramos		
Cu	48,6	25,5	65,6	34,4
Fe	1,6	16,9	8,4	91,6
As	95,4	44,3	68,3	31,7
Pb	0,0	172,9	0,0	100,0
Cd	4,6	0,8	84,9	15,1
Hg	0,0	0,1	0,0	100,0
Sb	0,5	1,4	25,2	74,8
Ag	0,00	0,1	0,9	99,1
Se	0,02	0,1	23,3	76,7

A partir de estos datos se construyó el gráfico % Distribución v/s Metales, el cual se muestra a continuación:

Figura 44: Distribución Metales Polvo P.E.P.A.



El comportamiento de los metales muestra que aquellos que quedan en el líquido en un mayor porcentaje son: cobre, arsénico, cadmio. El sólido queda constituido en un mayor porcentaje por: plomo, mercurio, antimonio plata y selenio, cabe destacar que el plomo, mercurio y la plata están en un 100% en el sólido. El pH medido durante la lixiviación fue alrededor de pH 2.

20. La recuperación de cobre soluble en el experimento 9 alcanzó un 80,3%. Esto se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 64: % Recuperación Cobre Polvo P.E.P.A.

ELEMENTO	FINO ENTRADA	FINO LÍQUIDO	RECUPERACIÓN COBRE
	Gramos	Gramos	%
Cu soluble	60,5	48,6	80,3

La recuperación de cobre aumentó en comparación con lo obtenido en la cinética en las mismas condiciones, desde un 74,9% a un 80,3%, esta diferencia se debe a la pérdida de masa

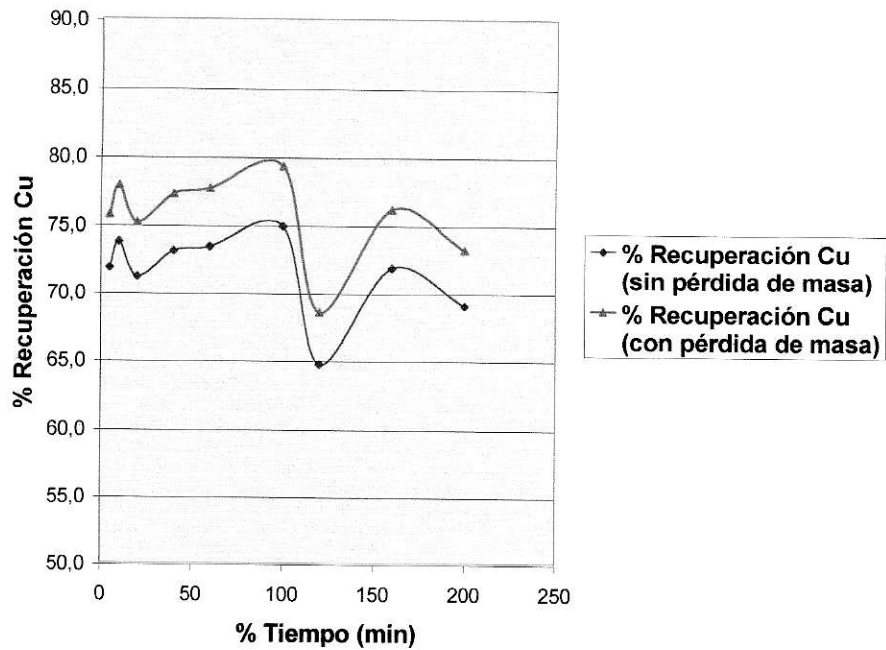
del polvo P.E.P.A, donde ingresaron 1198 g y se obtuvo luego de la lixiviación 386 g de sólido lo que representa una pérdida de masa de 67,8%. Al considerar esta pérdida de masa en la cinética del polvo P.E.P.A. y asumiendo ésta como constante en el tiempo se tiene un aumento de un 4,4% en la recuperación de cobre, alcanzando un valor de 79,3%. Esto se muestra a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 65: Comparación % Recuperación de Cobre P.E.P.A. 30% con Pérdida de Masa

TIEMPO LIXIVIACIÓN	RECUPERACIÓN COBRE (SIN PERDIDA DE MASA)	RECUPERACIÓN COBRE (CON PERDIDA DE MASA)	DIFERENCIA
Minutos	%	%	%
5	71,8	75,8	3,9
10	73,8	77,9	4,1
20	71,2	75,2	4,0
40	73,1	77,3	4,2
60	73,4	77,7	4,2
100	74,9	79,3	4,4
120	64,7	68,5	3,8
160	71,8	76,1	4,3
200	69,0	73,2	4,2

A partir de estos datos se construye el siguiente gráfico:

Figura 45: Comparación % Recuperación de Cobre P.E.P.A. 30% con Pérdida de Masa



Hay que destacar que en general una planta de lixiviación ácida, la máxima recuperación que se alcanza es de un 90% del metal presente en los minerales que se tratan.

La pérdida de masa también queda demostrada al comparar las leyes obtenidas en el sólido o ripio luego de la lixiviación con respecto a las leyes de entrada del polvo P.E.P.A.. En la siguiente tabla se muestra esta comparación:

Tabla 66: Comparación Ley P.E.P.A. y Ley Ripio

ELEMENTO	LEY P.E.P.A.	LEY RIPIO
Cu total %	6,2	6,61
Fe %	0,66	4,38
As %	11,18	11,48
Pb %	16,32	44,79

Cd ppm	4813	2150
Hg ppm	106	280
Sb %	0,2	0,36
Ag g/ton	70	191
Se %	0,01	0,02

La ley de plomo obtenida en el ripio es bastante alta 44,79%, esto consecuencia de que el 100% del plomo luego de la lixiviación quedó en el sólido, de acuerdo a esto perfectamente se podría decir que el ripio obtenido es un concentrado de plomo. Otro de los metales que se concentró bastante fue la plata alcanzando 191 g/ton. Por último el arsénico mantuvo su ley alrededor del 11% luego de la lixiviación al igual que el cobre.

21. El ripio obtenido luego de lixiviar el polvo P.E.P.A. mantiene su peligrosidad por toxicidad, pero su masa es menor y hay algunos metales que se concentran como los mencionados anteriormente.

22. El experimento 10, es una mezcla de polvo P.E.P.A. y lodo en una proporción de 6:1 respectivamente, ésta tiene como objetivo evitar los problemas de filtración del lodo y determinar las distribuciones de los diferentes metales en un proceso de lixiviación, se eligió trabajar con 30% de sólido, un tiempo de lixiviación de 60 minutos, una masa de ácido de 62 g. La masa de ácido se calculó considerando el consumo de ácido solamente del lodo 7,62 Kg de ácido/ Kg de cobre.

Se realizó además otra experiencia la cual no fue informada ya que no se obtuvieron muestras para el análisis, está consistió en mezclar a ambos residuos en una proporción de 3:1 de polvo P.E.P.A. con lodo respectivamente, se trabajó con 30% de sólidos y se presentaron las mismas dificultades de filtración que cuando se trabaja con el lodo solo. La mezcla 6:1 lixiviada no presentó estas dificultades.

23. Los resultados obtenidos en el experimento 10, muestran diferencias con el fino de entrada y el fino en el balance total luego de haber hecho la lixiviación, esto se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 67: Diferencias Fino Entrada y Fino Balance en la Mezcla

ELEMENTO	FINO ENTRADA	BALANCE	DESVIACIÓN
	Gramos	Gramos	Gramos
Cu	71,8	71,1	0,7
Fe	14,2	10,4	3,8
As	130,6	122	8,6
Pb	168,9	140,8	28,1
Cd	5,2	5	0,2
Hg	0,54	0,45	0,09
Sb	2,1	1,6	0,5
Ag	0,08	0,07	0,01
Se	0,23	0,26	-0,03

La principal desviación nuevamente la presenta el hierro.

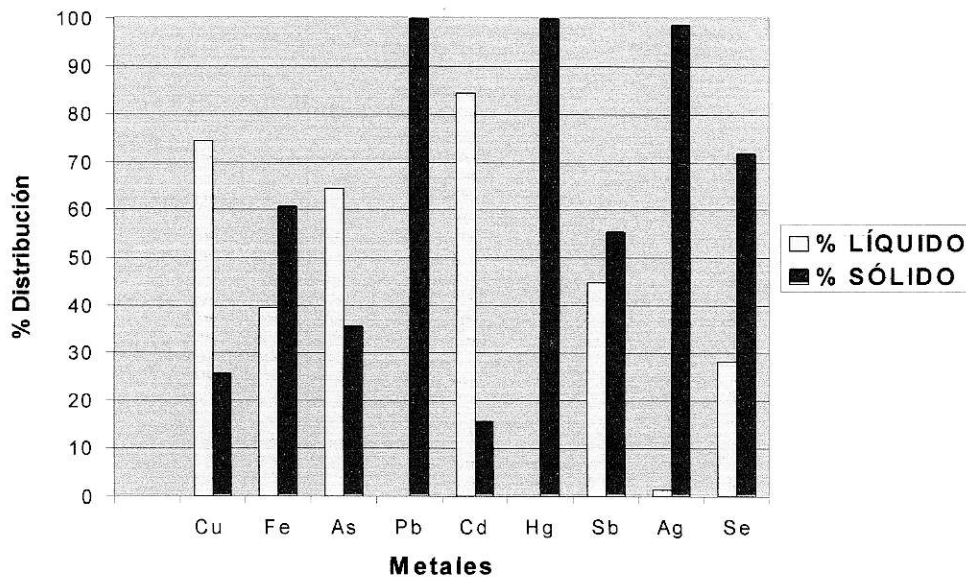
24. Considerando los resultados obtenidos en el experimento 10, y estableciendo que el fino del balance total es el 100%, se establece el porcentaje de los metales que queda en el líquido y que queda en el sólido, esto se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 68: Distribución de los Metales en el Sólido y en el Líquido en la Mezcla

ELEMENTO	FINO LÍQUIDO	FINO SÓLIDO	% LÍQUIDO	% SÓLIDO
	Gramos	Gramos		
Cu	53,0	18,2	74,4	25,6
Fe	4,1	6,3	39,5	60,5
As	78,7	43,3	64,5	35,5
Pb	0,0	140,8	0,0	100,0
Cd	4,3	0,8	84,5	15,5
Hg	0,00	0,45	0,0	100,0
Sb	0,72	0,89	44,7	55,3
Ag	0,00	0,07	1,4	98,6
Se	0,07	0,19	28,1	71,9

A partir de estos datos se construye el gráfico % Distribución v/s Metales, el cual se muestra a continuación:

Figura 46: Distribución de Metales en la Mezcla



Este gráfico muestra que los metales que quedan en el líquido en un mayor porcentaje son: cobre, arsénico, cadmio. El sólido queda constituido en un mayor porcentaje por: plomo, mercurio, plata y selenio, cabe destacar que el plomo, mercurio y la plata están en un 100% en el sólido. El pH medido durante la lixiviación fue alrededor de 2.

25. La recuperación de cobre soluble en el experimento 10 alcanzó un 90,7%. Esto se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 69: % Recuperación Cobre en la Mezcla

ELEMENTO	FINO DE ENTRADA	FINO LÍQUIDO	RECUPERACIÓN COBRE
	Gramos	Gramos	%
Cu soluble	58,4	53,0	90,7

26. El fino de entrada fue de 1193 g, si se compara con la masa del ripio 404 g, se tiene una pérdida de masa de 66,1%.

27. La acidez libre medida en la solución rica arrojó un resultado de 25,97 g/L, esto quiere decir que se tienen 72,8 g libres de ácido en solución, comparándolo con los 62 g de ácido ingresados indica que esta experiencia pudo haber sido realizada sin agregar ácido y se hubiera obtenido posiblemente la misma recuperación de cobre. La siguiente tabla muestra esta comparación:

Tabla 70: Acidez Libre Mezcla

ACIDEZ LIBRE	LÍQUIDO	ACIDO LIBRE	ACIDO INGRESADO
g/L	Litros	Gramos	Gramos
26,0	2,8	72,8	62,0

28. La mezcla realizada destaca principalmente por:

- Alta recuperación de cobre: 90,7%.
- No sería necesario utilizar ácido.
- Tiempo de lixiviación relativamente bajo.
- Disminución del volumen del sólido.
- Concentración de metales como plomo y plata.
- Necesidad de disposición y manejo de este sólido potencialmente tóxico.

Conclusiones

1. El lodo resultó ser un residuo peligroso, el cual debido a sus características fue catalogado como tóxico, y clasificado de acuerdo a la normativa chilena de materiales peligrosos en las clases 6.1 y 9. Por otro lado los metales pesados potencialmente comercializables que posee son cobre, oro, plata, sin embargo además posee impurezas como arsénico y cadmio.
2. La legislación existente no cuenta con un ordenamiento básico o mínimo que se refiera específicamente a residuos peligrosos, donde se establezcan obligaciones y responsabilidades a los generadores, ni tampoco están definidos los organismos públicos con competencias excluyentes y únicas sobre la materia, con excepción de las autoridades de salud en algunas áreas específicas. Asimismo, no hay una regulación sistemática y coherente del manejo de los residuos sólidos industriales en sus diferentes etapas, es por esto que el borrador del “Reglamento de Manejo Sanitario de Residuos Sólidos Peligrosos” del Ministerio de Salud, es un documento en el cual se organiza esta temática, y fue considerado como referencia obligada en el desarrollo de este trabajo.
3. En relación a la manipulación de los lodos se recomienda como fundamental el secado de los lodos en una piscina auxiliar antes de ser llevados al depósito de seguridad para su acopio temporal debido a la cantidad de líquido que poseen éstos. En el secado de éstos en el laboratorio se obtuvo una disminución de su peso de alrededor del 60%. Cabe destacar que los lodos ya fueron removidos de la piscina 1 y trasladados a una piscina auxiliar.
4. La alternativa de tratamiento de lixiviación ácida para los lodos resultó dificultosa por los problemas de filtración en el laboratorio, obteniéndose un 40% de recuperación de cobre soluble en el proceso, es por esto que, si se llegase a implementar esta alternativa debe considerarse un estudio de cada operación unitaria que se vaya a efectuar.

5. De la prueba de mezcla de polvo P.E.P.A. y lodo en una proporción 6:1 respectivamente, se obtiene como resultado un mejoramiento de las condiciones físico-químicas del lodo, obteniendo una recuperación del cobre soluble del 90% y la disminución en el consumo de ácido. La similitud de ambos residuos con respecto al contenido de metales pesados, a excepción del plomo, hace posible su tratamiento en conjunto, además de disponer su ripio en forma conjunta.
6. Con respecto al ripio obtenido de la lixiviación de la mezcla, éste presenta un menor volumen con respecto al fino de entrada (66,1% menos). Se debe considerar que éste seguirá siendo un residuo peligroso con la característica de toxicidad, pero la cantidad de sólido la cual se va a manipular y disponer va a ser menor.
7. La lixiviación de estos dos residuos mineros puede ser económicamente ventajosa con respecto al tratamiento de minerales debido a: no contienen costos de explotación desde minas, no se tiene que llevar a cabo un proceso de molienda, tienen una alta ley de cobre soluble.
8. En relación a la extracción de cobre desde el lixiviado se recomienda que sea probada a nivel de laboratorio determinándose su eficiencia, se debe considerar que la extracción por solvente es más selectiva que la adición de chatarra de fierro y posiblemente de mejores resultados. Actualmente el proceso de extracción por solventes es llevado a cabo en la Planta Salado de ENAMI para soluciones lixiviadas de minerales oxidados.
9. Se debe considerar luego de realizar la lixiviación, que hacer con los residuos sólidos y líquidos, en este trabajo se proponen alternativas para ello. Debido a los resultados obtenidos en la mezcla el residuo sólido disminuirá su volumen por lo que una disposición final de este ya sea por medio de una estabilización/solidificación o venta a Hidronor disminuirá su costo, cabe destacar que el costo de tratar los residuos en dicha empresa es de US\$300/ton. Además sin realizar un análisis de costo, ya que no es objetivo de esta memoria, se debe destacar que la recuperación de cobre generará un ingreso para la ENAMI, el cual puede ayudar a la disminución en el costo de disposición de este residuo

sólido, es decir los residuos se puedan autofinanciar. El egreso principal en una planta de lixiviación ácida para minerales es el costo de operación, que en las plantas de ENAMI tiene un valor de US\$22/ton donde se incluye el costo del ácido sulfúrico. Por otro lado en cuanto al líquido residual este debe tratarse, debido a los contenidos de arsénico y cadmio que contendría éste o incluirlo en algún proceso de tratamiento de efluentes de alguna Planta o Fundición y Refinería de la ENAMI.

10. Además debe considerarse que el ripio obtenido, aunque sea un residuo peligroso puede presentar un valor agregado por las cantidades de plomo en el caso de la mezcla y de mercurio en el caso del lodo, por lo tanto podría pensarse en la potencial venta de éstos a terceros, aunque el principal problema recaería en las concentraciones de arsénico de éstos.
11. Este trabajo tuvo como aporte principal la identificación de las fuentes generadoras de los lodos, los análisis tanto químicos o físicos a realizarse en los lodos y la determinación de la peligrosidad de éste. Por otro lado se recomendó una forma de manipulación de los lodos separándola en diferentes etapas, donde la etapa de secado y recolección ya fue realizada. Asimismo se dieron diferentes alternativas para el tratamiento y/o disposición final de los lodos estudiándose la alternativa que tuvo más interés por parte de la ENAMI. El estudio de la alternativa de lixiviación ácida por agitación aunque haya consistido en la realización de pruebas preliminares, arrojó resultados tales como porcentaje de recuperación cobre, distribución de los metales a través del proceso, tiempo de lixiviación, porcentaje de sólido, consumo de ácido. Finalmente se recomienda la realización de una mezcla de los residuos, pero se deben realizar otras pruebas en cuanto a la relación de ellos de modo de disminuir al mínimo el consumo de ácido y además se recomienda efectuar la realización de un estudio económico.

Bibliografía

1. Borrador Reglamento sobre Manejo Sanitario de Residuos Peligrosos, noviembre 1999, del Ministerio de Salud, División Salud Ambiental.
2. Compendio Normas Chilenas "Sustancias Peligrosas", del Instituto Nacional de Normalización, primera edición 1998.
3. Elaboración de Guías Metodológicas de Procedimientos, para la Confeción y Revisión de Planes de Manejo de Residuos Peligrosos, Informe Final Volumen I y Volumen II, Santiago, Mayo de 1999.
4. Residuos Peligrosos "Régimen Jurídico de los Residuos Peligrosos en Chile", Estudios de Legislación Ambiental, Documento N°29, Serie Jurídica, CONAMA.
5. Planes de Manejo de Residuos Industriales de Fundición Hernán Videla Lira, Noviembre 1998, CIMM T & S S.A, Unidad de Gestión Ambiental.
6. Apuntes Procesos de la Fundición y Refinería Ventanas, ENAMI.
7. Antecedentes "Propuesta de Política Nacional para la Gestión de los Residuos Sólidos Industriales", Febrero 1997, Comisión Nacional de Medio Ambiente.
8. Orientaciones para la Evaluación de Impacto Ambiental " Proyectos de Manejo de Sustancias Peligrosas", CONAMA.
9. Manual de Manejo de Residuos Sólidos Industriales, Fernando Alliende Correa, 1996.

10. Lineamientos Generales para el Manejo de Residuos Peligrosos, División Residuos Peligrosos y/o Tóxicos, Buenos Aires, agosto 1982.
11. Manual de Auditoría en Producción Limpia, Secretaría Ejecutiva de la Producción Limpia, 1998, Capítulo II.
12. Residuos tóxicos y peligrosos, Monografías de la Secretaría de Estado para las Políticas de Agua y el Medio Ambiente, Ministerio de Obras Públicas y Transporte, Febrero 1989.
13. Los Residuos Tóxicos y Peligrosos, Carlos Martínez Orgado, Madrid, Ministerio de Obras Públicas y Transporte, 1991.
14. Condiciones Sanitarias en los Lugares de Trabajo, Decreto Supremo N°594/1999, Ministerio de Salud.
15. Química Analítica Cualitativa: por F. Burriel Martí, F. Lucena Conde y otros. Decimo séptima edición, 2000.
16. Apuntes Lodos de Piscinas de Decantación, ENAMI, Enero 1999.
17. Procesos Físico-químicos para la Estabilización de Residuos Peligrosos, Margarita Yolanda Espindola Zepeda, primera edición 1994, páginas 44-57.
18. Physical/ Chemical Processes, Vol 2, Innovative Hazardous Waste Treatment Technology Series, Chapter 2.6, edited by Harry M. Freeman.
19. Technologies for Immobilizing High Mercury Subcategory Waste, July 1998, EPA.
20. Apuntes "Depósito de Residuos de ENAMI Ventanas", Noviembre 1998, ENAMI.

21. Unit Operations for Treatment of Hazardous Industrial Waste, por Joan B. Berkowitz, Jhont T. Funkhousen y otros, pags 503-551 y 722-737.
22. Recuperación de Plomo y Metales Nobles desde Polvos de Fundición, Denis Juan Herdocio Peralta, Memoria Ingeniero Civil Químico, 1984.
23. Extracción por Solventes de Cu(II) con LIX 864 desde Soluciones Acuólicas Ácidas, Pablo Alberto Guerrero Castillo, Tesis para Optar al Título de Químico, 1987.
24. Revista Induambiente, Año 4- N° 21- Septiembre- Octubre 1996 páginas, 17-55.

Anexo A: Cálculos Parte Experimental

A) Cálculos Parte Experimental

A.1) Experimento 1

Este experimento no presenta cálculos.

A.2) Experimento 2

A.2.1) Cálculo Fino de Cobre Ingresado

El cálculo del fino de cobre que ingresa al sistema se realiza:

$$\text{Fino de Cobre Ingresado} = (\text{Peso Seco (g)} * \text{Ley de Cobre (\%)})/100$$

Ej: Tiempo Lixiviación 40 minutos

$$\text{Fino de Cobre Ingresado} = (2352 \text{ g} * 3,85 \%)/100$$

$$\text{Fino de Cobre Ingresado} = 90,6 \text{ g}$$

Tabla 1A: Cálculo de Fino de Cobre Ingresado

TIEMPO LIXIVIACION (MINUTOS)	PESO SECO LODO INGRESADO (GRAMOS)	LEY COBRE INGRESADA (%)	FINO COBRE INGRESADO (GRAMOS)
20	2352	3,85	90,6
40	2352	3,85	90,6
60	2352	3,85	90,6
90	2352	3,85	90,6
120	2352	3,85	90,6

150	2352	3,85	90,6
180	2352	3,85	90,6
210	2352	3,85	90,6
240	2352	3,85	90,6
340	2352	3,85	90,6

A.2.2) Cálculos de Volúmenes

- **Cálculo Volumen Solución**

El cálculo del volumen de la solución se realiza:

$$\text{Volumen Solución} = \text{Volumen Solución en el Sistema} - \text{Volumen Alícuota}$$

Ej: Tiempo Lixiviación 40 minutos

$$\text{Volumen Solución} = 3500 \text{ mL} - 40 \text{ mL}$$

$$\text{Volumen Solución} = 3460 \text{ mL}$$

- **Cálculo Volumen Líquido Alícuota**

El cálculo del volumen del líquido de la alícuota se realiza:

$$\text{Volumen Líquido Alícuota} = (\text{Volumen Líquido en el Sistema} * \text{Volumen Alícuota}) / \text{Volumen Solución en el Sistema}$$

Ej: Tiempo Lixiviación 40 minutos

$$\text{Volumen Líquido Alícuota} = (2819 \text{ mL} * 40 \text{ mL}) / 3460 \text{ mL}$$

Volumen Líquido Alícuota = 33 mL

- **Calculo Volumen Líquido**

El cálculo del volumen del líquido se realiza:

Volumen Líquido = Volumen Líquido en el Sistema – Volumen Líquido Alícuota

Ej: Tiempo Lixiviación 40 minutos

Volumen Líquido = 2852 mL – 33 mL

Volumen Líquido = 2819 mL

Tabla 2A: Cálculos de Volúmenes

TIEMPO LIXIVIACION	VOLUMEN LÍQUIDO	VOLUMEN ALÍCUOTA	VOLUMEN SOLUCIÓN	VOLUMEN LÍQUIDO ALÍCUOTA
Minutos	mL	mL	mL	mL
20	2852	40	3500	33
40	2819	40	3460	33
60	2787	40	3420	33
90	2754	40	3380	33
120	2722	40	3340	33
150	2689	40	3300	33
180	2656	40	3260	33
210	2624	40	3220	33
240	2591	40	3180	33

340	2559	40	3140	33
-----	------	----	------	----

A.2.3) Cálculo Fino de Cobre en el Líquido

El cálculo de fino de cobre en el sistema se realiza:

$$\text{Fino de Cobre en el Líquido} = (\text{Volumen Líquido (mL)} * \text{Ley de Cobre (g/L)}) / 1000$$

Ej: Tiempo Lixiviación 40 minutos

$$\text{Fino de Cobre en el Líquido} = (2819 \text{ mL} * 24,3 \text{ g/L}) / 1000$$

$$\text{Fino de Cobre en el Líquido} = 68,5 \text{ g.}$$

Tabla 3A: Cálculo Fino de Cobre en el Líquido

TIEMPO LIXIVIACIÓN	VOLUMEN LIQUIDO	LEY DE COBRE	FINO COBRE LIQUIDO
Minutos	mL	g/L	gramos
20	2852	23,6	67,3
40	2819	24,3	68,5
60	2787	25,1	69,9
90	2754	20,7	57,0
120	2722	24,9	67,8
150	2689	25,5	68,6
180	2656	25,4	67,5
210	2624	24,4	64,0
240	2591	24,6	63,7
340	2559	23,8	60,9

A.2.4) Cálculo Fino Cobre restado por Alícuota

El cálculo del fino de cobre restado por alícuota se realiza:

Fino de Cobre restado por Alícuota = (Volumen Líquido Alícuota (mL) * Ley de Cobre (g/L))/1000

Ej: Tiempo Lixiviación 40 minutos

Fino de Cobre restado por Alícuota = (33 mL* 24,3 g/L)/1000

Fino de Cobre restado por Alícuota = 0,8 g

Tabla 4A: Cálculo Fino de Cobre restado por Alícuota

TIEMPO LIXIVIACION	VOLUMEN LIQUIDO ALICUOTA	LEY DE COBRE	FINO COBRE RESTADO ALÍCUOTA
Minutos	mL	g/L	gramos
20	33	23,6	0,8
40	33	24,3	0,8
60	33	25,1	0,8
90	33	20,7	0,7
120	33	24,9	0,8
150	33	25,5	0,8
180	33	25,4	0,8
210	33	24,4	0,8
240	33	24,6	0,8
340	33	23,8	0,8

A.2.5) Cálculo Fino Cobre en Solución y % Recuperación Cobre

- **Cálculo Fino de Cobre en Solución**

El cálculo de fino de cobre en solución se realiza:

Fino de Cobre en Solución = Fino de Cobre en Solución en el Sistema – Fino de Cobre restado por Alícuota

Ej: Tiempo Lixiviación 40 minutos

Fino de Cobre en Solución = 90,6 g – 0,8 g

Fino de Cobre en Solución = 89,8 g

- **Cálculo % Recuperación Cobre**

El cálculo del % de Recuperación de cobre se realiza:

% Recuperación Cobre = (Fino de Cobre en el Líquido/ Fino de Cobre en Solución) * 100

Ej: Tiempo Lixiviación 40 minutos

% Recuperación Cobre = (68,5 g/ 89,8 g) * 100

% Recuperación Cobre = 76,3 %

Tabla 5A: Cálculo Fino Cobre Solución y % Recuperación Cobre

TIEMPO LIXIVIACION	FINO COBRE LÍQUIDO	FINO COBRE RESTADO ALÍCUOTA	FINO COBRE SOLUCIÓN	RECUPERACIÓN COBRE
Minutos	gramos	gramos	gramos	%
20	67,3	0,8	90,6	74,3
40	68,5	0,8	89,8	76,3
60	69,9	0,8	89,0	78,6
90	57,0	0,7	88,2	64,6
120	67,8	0,8	87,5	77,4
150	68,6	0,8	86,7	79,1
180	67,5	0,8	85,9	78,5
210	64,0	0,8	85,1	75,3
240	63,7	0,8	84,3	75,6
340	60,9	0,8	83,5	72,9

A.2.6) Cálculo Masa Acido

El cálculo de masa de ácido fue realizado con anterioridad en el “Capítulo IX”.

A.2.7) Cálculos de Volúmenes

Los cálculos de volúmenes son los mismos que los realizados anteriormente.

A.2.8) Cálculo Acido Libre Líquido

El cálculo de ácido libre en el líquido se realiza:

Acido Libre Líquido = (Volumen Líquido (mL) * Acido Libre (g/L))/ 1000

Ej: Tiempo Lixiviación 40 minutos

Acido Libre Líquido = (2819 mL * 81,83 (g/L))/ 1000

Acido Libre Líquido = 230,7 g

Tabla 6A: Cálculo Acido Libre Líquido

TIEMPO LIXIVIACIÓN	VOLUMEN LÍQUIDO	ACIDO LIBRE	ACIDO LIBRE LIQUIDO
minutos	mL	g/L	gramos
20	2852	81,83	233,4
40	2819	81,83	230,7
60	2787	74,48	207,6
90	2754	74,48	205,1
120	2722	73,99	201,4
150	2689	73,99	199,0
180	2656	73,5	195,2
210	2624	72,03	189,0
240	2591	71,3	184,8
340	2559	69,09	176,8

A.2.9) Cálculo Acido Restado por Alícuota

El cálculo de ácido restado por alícuota se realiza:

Acido restado por Alícuota = (Volumen Líquido Alícuota (mL) * Acido Libre (g/L))/ 1000

Ej: Tiempo Lixiviación 40 minutos

Acido restado por Alícuota = $(33 \text{ mL} * 81,83 \text{ (g/L)}) * 1000$

Acido restado por Alícuota = 2,7 gramos

Tabla 7A: Cálculo Acido Restado por Alícuota

TIEMPO LIXIVIACIÓN	VOLUMEN LÍQUIDO ALÍCUOTA	ACIDO LIBRE	ACIDO RESTADO ALÍCUOTA
minutos	mL	g/L	gramos
20	33	81,83	2,7
40	33	81,83	2,7
60	33	74,48	2,4
90	33	74,48	2,4
120	33	73,99	2,4
150	33	73,99	2,4
180	33	73,5	2,4
210	33	72,03	2,3
240	33	71,3	2,3
340	33	69,09	2,3

A.2.10) Cálculo Acido Solución, Acido Consumido y % Acido Consumido

- **Cálculo Acido Solución**

El cálculo del ácido en solución se realiza:

Acido Solución = Acido en el Sistema (g) – Acido restado por Alícuota

Ej: Tiempo Lixiviación 40 minutos

$$\text{Acido Solución} = 817 \text{ g} - 2,7 \text{ g}$$

$$\text{Acido Solución} = 814,3 \text{ g}$$

- **Cálculo Acido Consumido**

El cálculo de ácido consumido se realiza:

$$\text{Acido Consumido} = \text{Acido Solución (g)} - \text{Acido Libre Líquido (g)}$$

Ej: Tiempo Lixiviación 40 minutos

$$\text{Acido Consumido} = 814,3 \text{ g} - 230,7 \text{ g}$$

$$\text{Acido Consumido} = 583,6 \text{ g}$$

- **% Acido Consumido**

El cálculo del % ácido consumido se realiza:

$$\% \text{ Acido Consumido} = (\text{Acido Consumido (g)} / \text{Acido Solución (g)}) * 100$$

Ej: Tiempo Lixiviación 40 minutos

$$\% \text{ Acido Consumido} = (583,6 \text{ g} / 814 \text{ g}) * 100$$

$$\% \text{ Acido Consumido} = 71,7 \%$$

Tabla 8A: Cálculo Acido Solución, Acido Consumido y % Acido Consumido

TIEMPO LIXIVIACION	ACIDO LIBRE LIQUIDO	ACIDO RESTADO ALÍCUOTA	ACIDO SOLUCIÓN	ACIDO CONSUMIDO	ACIDO CONSUMIDO
Minutos	gramos	gramos	gramos	gramos	%
20	233,4	2,7	817	583,6	71,4
40	230,7	2,7	814,3	583,6	71,7
60	207,6	2,4	811,7	604,1	74,4
90	205,1	2,4	809,2	604,1	74,7
120	201,4	2,4	806,8	605,4	75,0
150	199,0	2,4	804,4	605,4	75,3
180	195,2	2,4	802,0	606,7	75,7
210	189,0	2,3	799,6	610,6	76,4
240	184,8	2,3	797,2	612,5	76,8
340	176,8	2,3	794,9	618,1	77,8

A.3) Experimento 3

Los cálculos del experimento 3 de porcentaje de recuperación de cobre y porcentaje de ácido consumido se presentan a continuación en las siguientes tablas:

Tabla 9A: % Recuperación de Cobre

PESO SECO LODO INGRESADO	LEY COBRE LODO INGRESADO	FINO COBRE INGRESADO	VOLUMEN LÍQUIDO	TIEMPO LIXIVIACIÓN	VOLUMEN ALÍCUOTA	VOLUMEN SOLUCIÓN
Gramos	%	gramos	mL	minutos	mL	mL
1407	3,85	54,2	2612	20	50	3000
1407	3,85	54,2	2568	40	60	2950

1407	3,85	54,2	2516	60	60	2890
1407	3,85	54,2	2464	90	60	2830
1407	3,85	54,2	2412	120	60	2770
1407	3,85	54,2	2360	160	60	2710
1407	3,85	54,2	2307	210	60	2650
1407	3,85	54,2	2255	270	60	2590
1407	3,85	54,2	2203	340	60	2530

VOLUMEN LÍQUIDO ALÍCUOTA	LEY DE COBRE	FINO COBRE LÍQUIDO	FINO COBRE RESTADO ALÍCUOTA	FINO SOLUCIÓN COBRE	RECUPERACIÓN COBRE
mL	g/L	gramos	gramos	gramos	%
44	21,5	56,2	0,9	54,2	103,7
52	22	56,5	1,1	53,2	106,1
52	20,6	51,8	1,1	52,1	99,5
52	23,7	58,4	1,2	51,0	114,5
52	21,2	51,1	1,1	49,8	102,7
52	22,6	53,3	1,2	48,7	109,6
52	22,5	51,9	1,2	47,5	109,3
52	21,8	49,2	1,1	46,3	106,2
52	20,7	45,6	1,1	45,2	101,0

Tabla 10A: % Acido Consumido

MASA ACIDO	VOLUMEN LÍQUIDO	TIEMPO LIXIVIACION	VOLUMEN ALÍCUOTA	VOLUMEN SOLUCIÓN	VOLUMEN LÍQUIDO ALÍCUOTA	ACIDEZ LIBRE
gramos	mL	minutos	mL	mL	mL	g/L
488	2612	20	50	3000	44	63,7
488	2568	40	60	2950	52	56,84

488	2516	60	60	2890	52	52,19
488	2464	90	60	2830	52	57,82
488	2412	120	60	2770	52	52,92
488	2360	160	60	2710	52	55,86
488	2307	210	60	2650	52	56,6
488	2255	270	60	2590	52	55,37
488	2203	340	60	2530	52	56,35

ACIDO LIBRE LÍQUIDO	ACIDO RESTADO ALÍCUOTA	ACIDO SOLUCIÓN	ACIDO CONSUMIDO	ACIDO CONSUMIDO
Gramos	gramos	gramos	gramos	%
166	2,8	488	322	65,9
146	3,0	485,2	339	69,9
131	2,7	482,3	351	72,8
142	3,0	479,5	337	70,3
128	2,8	476,5	349	73,2
132	2,9	473,7	342	72,2
131	3,0	470,8	340	72,3
125	2,9	467,9	343	73,3
124	2,9	465,0	341	73,3

A.4) Experimento 4

Los cálculos del fino de entrada, fino solución, fino solución impregnante y fino ripio se presentan en las siguientes tablas:

Tabla 11A: Cálculo Fino Entrada

ELEMENTO	PESO LODO (GRAMOS)	LEY LODO	FINO ENTRADA (GRAMOS)
Cu total %	2352	4,8	112,9
Cu soluble %	2352	3,85	90,6
Fe %	2352	4,36	102,5
As %	2352	9,27	218,0
Pb %	2352	0,74	17,4
Cd ppm	2352	1603	3,8
Hg ppm	2352	2536	6,0
Sb %	2352	0,038	0,89
Ag g/ton	2352	50	0,12
Se %	2352	0,074	1,7

Tabla 12A: Cálculo Fino Solución

SOLUCIÓN	= 10,845 L	
Elemento	Ley	Fino Solución (gramos)
Cu total (mg/L)	3280	35,6
Fe (mg/L)	980	10,6
As (mg/L)	3170	34,4
Pb(mg/L)	6,44	0,07
Cd (mg/L)	46,4	0,50
Hg (mg/L)	n.d	0,00
Sb (mg/L)	5,8	0,06
Ag (mg/L)	0,16	0,00
Se (mg/L)	5,5	0,06

Tabla 13A: Cálculo Fino Solución Impregnante

SOLUCIÓN IMPREGNANTE	= 0,375 L	
Elemento	Ley	Fino Impregnante (gramos)
Cu total (mg/L)	3280	1,2
Fe (mg/L)	980	0,37
As (mg/L)	3170	1,2
Pb(mg/L)	6,44	0,00
Cd (mg/L)	46,4	0,02
Hg (mg/L)	n.d	0,00
Sb (mg/L)	5,8	0,00
Ag (mg/L)	0,16	0,00
Se (mg/L)	5,5	0,00

Tabla 14A: Cálculo Fino Ripio

RIPIO (GRAMOS)	= 1790	
Elemento	Ley	Fino Ripio (gramos)
Cu %	4,1	73,4
Fe %	1,02	18,3
As %	7,76	138,9
Pb %	0,98	17,5
Cd ppm	1610	2,9
Hg ppm	2625	4,7
Sb %	0,04	0,72
Ag (g/ton)	125	0,22

Se %	0,11	2,0
------	------	-----

A.5) Experimento 5

Los cálculos del experimento 5 de porcentaje de recuperación de cobre y porcentaje de ácido consumido se presentan a continuación en las siguientes tablas:

Tabla 15A: % Recuperación Cobre

PESO SECO P.E.P.A. INGRESADA	LEY COBRE P.E.P.A. INGRESADA	FINO COBRE INGRESADO	VOLUMEN LÍQUIDO	TIEMPO LIXIVIACIÓN	VOLUMEN ALÍCUOTA	VOLUMEN SOLUCIÓN
Gramos	%	gramos	mL	minutos	mL	mL
2562	5,05	129,4	2562	10	40	3000
2562	5,05	129,4	2528	20	40	2960
2562	5,05	129,4	2494	35	40	2920
2562	5,05	129,4	2460	50	40	2880
2562	5,05	129,4	2425	70	40	2840
2562	5,05	129,4	2391	100	40	2800
2562	5,05	129,4	2357	130	40	2760
2562	5,05	129,4	2323	190	40	2720

VOLUMEN LÍQUIDO ALÍCUOTA	LEY DE COBRE	FINO COBRE LÍQUIDO	FINO COBRE RESTADO ALÍCUOTA	FINO SOLUCIÓN COBRE	RECUPERACIÓN COBRE
ML	g/L	gramos	gramos	gramos	%
34	14,8	38	0,5	129,4	29,3
34	19,4	49	0,7	128,9	38,0
34	23,1	58	0,8	128,2	44,9

34	19,55	48	0,7	127,4	37,7
34	21,9	53	0,7	126,8	41,9
34	26,25	63	0,9	126,0	49,8
34	23,8	56	0,8	125,1	44,8
34	23	53	0,8	124,3	43,0

Tabla 16A: % Acido Consumido

MASA ACIDO	VOLUMEN LÍQUIDO	TIEMPO LIXIVIACIÓN	VOLUMEN ALÍCUOTA	VOLUMEN SOLUCIÓN	VOLUMEN LÍQUIDO ALÍCUOTA	ACIDO LIBRE
gramos	mL	minutos	mL	mL	mL	g/L
0	2562	10	40	3000	34	6,62
0	2528	20	40	2960	34	9,07
0	2494	35	40	2920	34	9,08
0	2460	50	40	2880	34	9,08
0	2425	70	40	2840	34	10,05
0	2391	100	40	2800	34	11,76
0	2357	130	40	2760	34	10,29
0	2323	190	40	2720	34	10,78

ACIDO LIBRE LÍQUIDO	ACIDO RESTADO ALÍCUOTA	ACIDO SOLUCIÓN	ACIDO CONSUMIDO	ACIDO CONSUMIDO
Gramos	gramos	gramos	gramos	%
17	0,2	17	0	0,2
23	0,3	17	-6	-36,7
23	0,3	16	-6	-37,5
22	0,3	16	-6	-38,2
24	0,3	16	-9	-53,8

28	0,4	16	-13	-81,4
24	0,4	15	-9	-60,6
25	0,4	15	-10	-69,8

A.6) Experimento 6

Los cálculos del experimento 6 de porcentaje de recuperación de cobre y porcentaje de ácido consumido se presentan a continuación en las siguientes tablas:

Tabla 17A: % Recuperación Cobre

PESO SECO P.E.P.A. INGRESADO	LEY COBRE P.E.P.A. INGRESADA	FINO COBRE INGRESADO	VOLUMEN LÍQUIDO	TIEMPO LIXIVIACIÓN	VOLUMEN ALÍCUOTA	VOLUMEN SOLUCIÓN
Gramos	%	gramos	mL	minutos	mL	mL
1198	5,05	60,5	2795	5	50	3000
1198	5,05	60,5	2748	10	50	2950
1198	5,05	60,5	2702	20	50	2900
1198	5,05	60,5	2655	40	50	2850
1198	5,05	60,5	2609	60	50	2800
1198	5,05	60,5	2562	100	50	2750
1198	5,05	60,5	2516	120	50	2700
1198	5,05	60,5	2469	160	50	2650
1198	5,05	60,5	2422	200	50	2600

VOLUMEN LÍQUIDO ALÍCUOTA	LEY DE COBRE	FINO COBRE LÍQUIDO	FINO COBRE RESTADO ALÍCUOTA	FINO SOLUCIÓN COBRE	RECUPERACIÓN COBRE
mL	g/L	gramos	gramos	gramos	%
47	15,55	43	0,7	60,5	71,8

47	16,05	44	0,7	59,8	73,8
47	15,55	42	0,7	59,0	71,2
47	16,05	43	0,7	58,3	73,1
47	16,2	42	0,8	57,6	73,4
47	16,6	43	0,8	56,8	74,9
47	14,4	36	0,7	56,0	64,7
47	16,1	40	0,7	55,4	71,8
47	15,55	38	0,7	54,6	69,0

Tabla 18A: % Acido Consumido

MASA ACIDO	VOLUMEN LÍQUIDO	TIEMPO LIXIVIACION	VOLUMEN ALÍCUOTA	VOLUMEN SOLUCIÓN	VOLUMEN LÍQUIDO ALÍCUOTA	ACIDEZ LIBRE
gramos	mL	minutos	mL	mL	mL	g/L
0	2795	5	50	3000	47	8,58
0	2748	10	50	2950	47	8,58
0	2702	20	50	2900	47	7,6
0	2655	40	50	2850	47	8,58
0	2609	60	50	2800	47	7,35
0	2562	100	50	2750	47	8,58
0	2516	120	50	2700	47	7,35
0	2469	160	50	2650	47	7,35
0	2422	200	50	2600	47	7,6

ACIDO LIBRE LÍQUIDO	ACIDO RESTADO ALÍCUOTA	ACIDO SOLUCIÓN	ACIDO CONSUMIDO	ACIDO CONSUMIDO
Gramos	gramos	gramos	gramos	%
24	0,4	24	0	0,1

24	0,4	24	0	0,1
21	0,4	23	3	11,5
23	0,4	23	0	0,3
19	0,3	22	3	14,6
22	0,4	22	0	0,6
18	0,3	22	3	14,8
18	0,3	21	3	15,1
18	0,4	21	3	12,4

A.7) Experimento 7

Los cálculos del experimento 7 de porcentaje de recuperación de cobre y porcentaje de ácido consumido se presentan a continuación en las siguientes tablas:

Tabla 19A: % Recuperación Cobre

PESO SECO P.E.P.A. INGRESADO	LEY COBRE INGRESADA	FINO COBRE INGRESADO	VOLUMEN LÍQUIDO	TIEMPO LIXIVIACIÓN	VOLUMEN ALÍCUOTA	VOLUMEN SOLUCIÓN
Gramos	%	gramos	mL	minutos	mL	mL
2562	5,05	129,4	2562	10	50	3000
2562	5,05	129,4	2519	20	50	2950
2562	5,05	129,4	2477	30	50	2900
2562	5,05	129,4	2434	50	50	2850
2562	5,05	129,4	2391	70	50	2800
2562	5,05	129,4	2349	100	50	2750
2562	5,05	129,4	2306	130	50	2700
2562	5,05	129,4	2263	190	50	2650

VOLUMEN LÍQUIDO ALÍCUOTA	LEY DE COBRE	FINO COBRE LÍQUIDO	FINO COBRE RESTADO ALÍCUOTA	FINO SOLUCIÓN COBRE	RECUPERACIÓN COBRE
ML	g/L	gramos	gramos	gramos	%
43	22,52	58	1,0	129,4	44,6
43	24,08	61	1,0	128,4	47,2
43	23,56	58	1,0	127,4	45,8
43	22,28	54	1,0	126,4	42,9
43	21,4	51	0,9	125,4	40,8
43	20	47	0,9	124,5	37,7
43	18,72	43	0,8	123,7	34,9
43	19,16	43	0,8	122,9	35,3

Tabla 20A: % Acido Consumido

MASA ACIDO	VOLUMEN LÍQUIDO	TIEMPO LIXIVIACIÓN	VOLUMEN ALÍCUOTA	VOLUMEN SOLUCIÓN	VOLUMEN LÍQUIDO ALÍCUOTA	ACIDEZ LIBRE
gramos	mL	minutos	mL	mL	mL	g/L
234	2562	10	50	3000	43	121,52
234	2519	20	50	2950	43	136,47
234	2477	30	50	2900	43	139,16
234	2434	50	50	2850	43	141,61
234	2391	70	50	2800	43	146,51
234	2349	100	50	2750	43	147
234	2306	130	50	2700	43	155,33
234	2263	190	50	2650	43	156,31

ACIDO LIBRE LÍQUIDO	ACIDO RESTADO ALÍCUOTA	ACIDO SOLUCIÓN	ACIDO CONSUMIDO	ACIDO CONSUMIDO
Gramos	gramos	gramos	gramos	%
311	5,2	234	-77	-33,0
344	5,8	229	-115	-50,3
345	5,9	223	-122	-54,6
345	6,0	217	-128	-58,8
350	6,3	211	-139	-66,0
345	6,3	205	-140	-68,6
358	6,6	198	-160	-80,5
354	6,7	192	-162	-84,4

A.8) Experimento 8

Los cálculos del experimento 8 de porcentaje de recuperación de cobre y porcentaje de ácido consumido se presentan a continuación en las siguientes tablas:

Tabla 21A: % Recuperación Cobre

PESO SECO P.E.P.A. INGRESADO	LEY COBRE INGRESADA	FINO COBRE INGRESADO	VOLUMEN LÍQUIDO	TIEMPO LIXIVIACIÓN	VOLUMEN ALÍCUOTA	VOLUMEN SOLUCIÓN
Gramos	%	gramos	mL	minutos	mL	mL
1198	5,05	60,5	2795	5	50	3000
1198	5,05	60,5	2748	10	50	2950
1198	5,05	60,5	2702	20	50	2900
1198	5,05	60,5	2655	30	50	2850
1198	5,05	60,5	2609	50	50	2800
1198	5,05	60,5	2562	70	50	2750

1198	5,05	60,5	2516	100	50	2700
1198	5,05	60,5	2469	140	50	2650
1198	5,05	60,5	2422	160	50	2600

VOLUMEN LÍQUIDO ALÍCUOTA	LEY DE COBRE	FINO COBRE LÍQUIDO	FINO RESTADO ALÍCUOTA	FINO SOLUCIÓN COBRE	RECUPERACIÓN COBRE
mL	g/L	gramos	gramos	gramos	%
47	17,12	48	0,8	60,5	79,1
47	17,12	47	0,8	59,7	78,8
47	17,16	46	0,8	58,9	78,7
47	17,24	46	0,8	58,1	78,8
47	16,48	43	0,8	57,3	75,0
47	16,32	42	0,8	56,5	74,0
47	17,48	44	0,8	55,8	78,8
47	17,4	43	0,8	55,0	78,2
47	17,72	43	0,8	54,1	79,3

Tabla 22A: % Acido Consumido

MASA ACIDO	VOLUMEN LÍQUIDO	TIEMPO LIXIVIACIÓN	VOLUMEN ALÍCUOTA	VOLUMEN SOLUCIÓN	VOLUMEN LÍQUIDO ALÍCUOTA	ACIDEZ LIBRE
Gramos	mL	minutos	mL	mL	mL	g/L
110	2795	5	50	3000	47	58,31
110	2748	10	50	2950	47	56,35
110	2702	20	50	2900	47	56,11
110	2655	30	50	2850	47	57,33
110	2609	50	50	2800	47	56,35
110	2562	70	50	2750	47	55,37

110	2516	100	50	2700	47	57,33
110	2469	140	50	2650	47	55,86
110	2422	160	50	2600	47	59,29

ACIDO LIBRE LÍQUIDO	ACIDO RESTADO ALÍCUOTA	ACIDO SOLUCIÓN	ACIDO CONSUMIDO	ACIDO CONSUMIDO
Gramos	gramos	gramos	gramos	%
163	2,7	110	-53	-48,2
155	2,6	107	-48	-44,4
152	2,6	105	-47	-44,9
152	2,7	102	-50	-49,2
147	2,6	99	-48	-47,9
142	2,6	97	-45	-46,6
144	2,7	94	-50	-53,1
138	2,6	91	-46	-50,7
144	2,8	89	-55	-61,6

A.9) Experimento 9

Los cálculos del fino de entrada, fino solución rica, fino solución impregnante y fino ripio se presentan en las siguientes tablas:

Tabla 23A: Cálculo Fino de Entrada

ELEMENTO	PESO P.E.P.A.	LEY PEPA	FINO
	gramos		g
Cu total %	1198	6,2	74,3
Cu soluble %	1198	5,05	60,5
Fe %	1198	0,66	7,9

As %	1198	11,18	133,9
Pb %	1198	16,32	195,5
Cd ppm	1198	4813	5,8
Hg ppm	1198	106	0,13
Sb %	1198	0,2	2,4
Ag g/ton	1198	70	0,08
Se %	1198	0,01	0,12

Tabla 24A: Cálculo Fino Solución Rica

SOLUCIÓN RICA =	2,32 L	
Elemento	Ley	Fino Solución Rica (gramos)
Cu total (mg/L)	16980	39,4
Fe (mg/L)	544	1,3
As (mg/L)	33350	77,4
Pb(mg/L)	15,25	0,0
Cd (mg/L)	1625	3,8
Hg ppm	n.d	0,00
Sb (mg/L)	163,8	0,38
Ag (mg/L)	0,23	0,00
Se (mg/L)	8,2	0,02

Tabla 25A: Cálculo Fino Impregnante Rica

Solución Impregnante Rica (L) =	0,541	
Elemento	Ley	Fino impregnante (gramos)
Cu total (mg/L)	16980	9,2
Fe (mg/L)	544	0,3
As (mg/L)	33350	18,0
Pb(mg/L)	15,25	0,01
Cd (mg/L)	1625	0,9
Hg ppm	n.d	0,00
Sb (mg/L)	163,8	0,09
Ag (mg/L)	0,23	0,00
Se (mg/L)	8,2	0,00

Tabla 26A: Cálculo Fino Ripio

RIPIO (GRAMOS) =	386	
Elemento	Ley	Fino Ripio (gramos)
Cu total %	6,61	25,5
Fe %	4,38	16,9
As %	11,48	44,3
Pb %	44,79	172,9
Cd ppm	2150	0,83
Hg ppm	280	0,11
Sb %	0,36	1,4
Ag (g/ton)	191	0,07
Se %	0,02	0,08

A.10) Experimento 10

Los cálculos del fino de entrada, fino solución rica, fino solución impregnante y fino ripio se presentan en las siguientes tablas:

Tabla 27A: Cálculo Fino de Entrada P.E.P.A.

ELEMENTO	PESO SECO P.E.P.A. INGRESADO (GRAMOS)	LEY P.E.P.A.	FINO ENTRADA P.E.P.A. (GRAMOS)
Cu total %	1027	6,2	63,7
Cu soluble %	1027	5,05	51,9
Fe %	1027	0,66	6,8
As %	1027	11,18	114,8
Pb %	1027	16,32	167,6
Cd ppm	1027	4813	4,9
Hg ppm	1027	106	0,11
Sb %	1027	0,2	2,1
Ag g/ton	1027	70	0,07
Se %	1027	0,01	0,10

Tabla 28A: Cálculo Fino Entrada Lodo

ELEMENTO	PESO SECO LODO INGRESADO (GRAMOS)	LEY LODO	FINO ENTRADA LODO (GRAMOS)
Cu total %	170	4,8	8,2
Cu soluble %	170	3,85	6,5

Fe %	170	4,36	7,4
As %	170	9,27	15,8
Pb %	170	0,74	1,3
Cd ppm	170	1603	0,27
Hg ppm	170	2536	0,43
Sb %	170	0,038	0,06
Plata g/ton	170	50	0,01
Oro g/ton	170	2,2	0,00
Se %	170	0,074	0,13

Tabla 29A: Cálculo Fino Entrada Mezcla

ELEMENTO	PESO MEZCLA (GRAMOS)	FINO P.E.P.A. (GRAMOS)	FINO LODO (GRAMOS)	FINO ENTRADA MEZCLA (GRAMOS)
Cu total %	1193	63,7	8,2	71,8
Cu soluble %	1193	51,9	6,5	58,4
Fe %	1193	6,8	7,4	14,2
As %	1193	114,8	15,8	130,6
Pb %	1193	167,6	1,3	168,9
Cd ppm	1193	4,9	0,3	5,2
Hg ppm	1193	0,11	0,43	0,54
Sb %	1193	2,05	0,06	2,12
Ag g/ton	1193	0,07	0,01	0,08
Se %	1193	0,10	0,13	0,23

Tabla 30A: Cálculo Fino Solución Rica

SOL RICA (L)=	2,089	
Elemento	Ley	Fino Solución Rica (gramos)
Cu total (mg/L)	18900	39,5
Fe (mg/L)	1470	3,1
As (mg/L)	28070	58,6
Pb(mg/L)	13,28	0,03
Cd (mg/L)	1520	3,2
Hg (mg/L)	n.d	0,00
Sb (mg/L)	256	0,53
Ag (mg/L)	0,36	0,00
Se (mg/L)	25,97	0,05

Tabla 31A: Cálculo Fino Solución Impregnante

SOLUCIÓN IMPREGNANTE RICA (L) =	0,713	
Elemento	Ley	Fino Solución Impregnante (gramos)
Cu total (mg/L)	18900	13,5
Fe (mg/L)	1470	1,0
As (mg/L)	28070	20,0
Pb(mg/L)	13,28	0,01
Cd (mg/L)	1520	1,1
Hg ppm	n.d	n.d
Sb (mg/L)	256	0,18
Plata (mg/L)	0,36	0,00

Se (mg/L)	25,97	0,02
-----------	-------	------

Tabla 32A: Cálculo Fino Ripio

RIPIO (GRAMOS) =	404	
Elemento	Ley	Fino Ripio (gramos)
Cu total %	4,5	18,2
Fe %	1,56	6,3
As %	10,73	43,3
Pb %	34,85	140,8
Cd ppm	1940	0,78
Hg ppm	1125	0,45
Sb %	0,22	0,89
Ag g/ton	180	0,07
Se %	0,046	0,19