

UCh - FC
Q. Ambiental
D 862
C. Q



**"IMPLEMENTACIÓN DE UN PLAN DE MANEJO DE SUSTANCIAS
PELIGROSAS EN LA SUPERINTENDENCIA PLANTAS PRODUCTOS
COMERCIALES, EN CODELCO CHILE, DIVISIÓN ANDINA"**

Seminario de Título

Entregado a la

Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile

Para optar al título de

QUÍMICO AMBIENTAL



CRISTIÁN ENRIQUE BRITO MARTINEZ

Director Seminario de Título: Eduardo Arellano Campos

Profesor patrocinante : Marcela Urzúa Acevedo

Marzo, 2007

FACULTAD DE CIENCIAS

UNIVERSIDAD DE CHILE

INFORME DE APROBACIÓN

SEMINARIO DE TÍTULO

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

CRISTIÁN ENRIQUE BRITO MARTINEZ

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

Comisión

Director: Ing. Eduardo Arellano C. 

Profesor patrocinante: Dra. Marcela Urzúa A. 

Corrector: Dr. Antonio Galdames S. 

Corrector: Ms. Ing. Fernando Valenzuela L. 



RESEÑA DEL ALUMNO



Nombre: Cristian Brito Martínez

Edad: 25 años

Teléfono: 08-1248597

Correo electrónico: cbritto@gmail.com

Dirección: José Villaroel 1486, Los Andes.



Estudios

[2001 – 2006], Química Ambiental, Facultad ciencias, Universidad de Chile.

Experiencia laboral

[Julio 2006 – Marzo 2007], Gerencia de Sustentabilidad, División Andina, Codelco Chile.

- Implementación de un plan de manejo de sustancias químicas peligrosas a través de un sistema de gestión integrado, Ambiente, calidad, seguridad y salud ocupacional, en la Superintendencia Plantas Productos Comerciales.

[Noviembre 2005 – Marzo 2006], Alimentos Indal S.A. Grupo Arcor S.A.

- Estudio de la prefactibilidad técnica y económica, para la instalación de un sistema de tratamiento de aguas para el control de pH, DBO₅ y sólidos.

[Noviembre 2004 – Marzo 2005], Alimentos Indal S.A. Grupo Arcor S.A.

- Diseño de un plan de manejo para el control de residuos sólidos mediante compostaje.

Publicaciones

- Hernán Ríos, Carla Fonseca, **Cristián Brito**, Marcela Urzúa and Walton Cabrera. “Adsorption of poly(mono-n-alkylmaleate-alt-N-vinylpyrrolidone) sodium salts at the air/water interface” J. Macromol. Sci. B. Physics., 45, 1-8 (2006).



Dedico esta memoria a mi familia, especialmente a Verónica, Roció y Regina. También a mis compañeros y a todos mis amigos que me brindaron siempre su apoyo.



AGRADECIMIENTOS



Agradezco a la Gerencia de Sustentabilidad de Codelco Chile, División Andina, por darme la oportunidad y todas las facilidades para realizar esta memoria y especialmente al Señor Juan Giuliano por recibirme y confiar en mí, a Cristian Gonzáles por su apoyo y orientación brindada.

Deseo agradecer con mucho afecto al Señor Eduardo Arellano Campos por todo su apoyo, conocimiento y valiosos consejos entregados, que sin lugar a dudas servirán bastante en mi vida profesional.

También deseo agradecer al Señor Egidio Catalán, del Instituto de Innovación en Minería y Metalurgia, (IM2) de Codelco Chile, por su amistad, consejos y orientación.

Y no puedo dejar de expresar con mucho cariño mi agradecimiento a mi profesora patrocinante la Doctora Marcela Urzúa.

ÍNDICE GENERAL



I INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Área mina.....	2
1.2 Área Concentrador.....	2
1.3 Área Plantas Productos Comerciales.....	3
1.4 Política del sistema de gestión integrado.....	4
II OBJETIVOS.....	5
2.1 Objetivo General.....	5
2.2 Objetivos Específicos.....	5
III SUPERINTENDENCIA PLANTAS PRODUCTOS COMERCIALES.....	6
3.1 Composición química y mineralógica del concentrado mixto de cobre.....	6
3.2 Procesos Superintendencia Plantas Productos Comerciales.....	7
3.2.1 Flotación Molibdeno.....	8
3.2.2 Planta Filtrado Convencional.....	11
3.2.3 Planta Filtrado Larox.....	12
3.2.4 Planta Lixiviación y Recuperación.....	13
IV MANEJO DE SUSTANCIAS PELIGROSAS.....	17
4.1 Manejo sustancias peligrosas SPPC.....	18
4.2 Recopilación de información.....	19
4.3 Catastro sustancias peligrosas.....	20
4.4 Clasificación.....	21
4.5 Verificación cumplimiento reglamento interno y legislación aplicable.....	23
4.5.1 Elaboración de procedimientos y documentos.....	24

4.5.2 Control hojas datos de seguridad.....	26
4.5.3 Monitoreo ácido sulfhídrico.....	27
4.6 Aspectos e impactos ambientales.....	32
4.6.1 Identificación de aspectos ambientales.....	32
4.6.2 Evaluación de aspectos ambientales.....	33
4.6.3 Aspectos ambientales significativos.....	35
4.7 Competencia, capacitación y sensibilización.....	38
V CONTROL DERRAMES DE LICOR RICO.....	39
5.1 Mecanismo de oxidación del hierro en el Rio Blanco.....	41
5.2 Diseño del sistema de tratamiento.....	42
5.2.1 Intercambio iónico.....	42
5.2.2 Oxidación / Filtración.....	43
5.2.3 Precipitación.....	43
5.3 Precipitación Licor Rico.....	45
5.4 Diagrama sistema de tratamiento.....	49
VI MANEJO DE RILES FUERA DE NORMA.....	51
6.1 Pruebas precipitación de cobre.....	54
VII DISCUSIÓN.....	64
VIII CONCLUSIONES.....	66
IX BIBLIOGRAFÍA.....	68
X ANEXOS.....	69
ANEXO 1.....	70





ANEXO 2.....	72
ANEXO 3.....	74
ANEXO 4.....	76
ANEXO 5.....	78
ANEXO 6.....	80
ANEXO 7.....	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Mapa ubicación División Andina	1
Figura 2	Celda de flotación por aire disuelto	9
Figura 3	Partículas de molibdenita adheridas a burbuja de aire	10
Figura 4	Filtro larox	12
Figura 5	Imagen del Licor rico	14
Figura 6	Etapas del trabajo realizado	17
Figura 7	Procedimiento verificación cumplimiento reglamento interno	23
Figura 8	Procedimiento chequeo en terreno	24
Figura 9	Concentración H ₂ S, sector tanque almacenamiento NaHS	30
Figura 10	Concentración H ₂ S, sector flotación molibdeno	30
Figura 11	Concentración H ₂ S, sector oficinas generales	31
Figura 12	Diagrama derrames Licor rico	39
Figura 13	Cristal de pirrotita formado a pH ácidos	40



Figura 14	Diagrama solubilidad hierro	44
Figura 15	Procedimiento toma de muestra Licor rico	45
Figura 16	Curva de precipitación de Licor rico con hidróxido de sodio	46
Figura 17	Curva de precipitación de hierro	47
Figura 18	Porcentaje de remoción de hierro en función del pH	48
Figura 19	Diagrama sistema de control	49
Figura 20	Planta tratamiento de efluentes ampliada	51
Figura 21	Formación de flóculos mediante adición de floculante	53
Figura 22	Equipo de jarras utilizado	54
Figura 23	Metodología utilizada para pruebas de precipitación	55
Figura 24	Diagrama sistema de dosificación de Nalmet	60



INDICE DE TABLAS

Tabla 1	Composición química del concentrado de cobre	6
Tabla 2	Composición mineralógica del concentrado de cobre	7
Tabla 3	Concentración media de especies del Licor rico	13
Tabla 4	Características químicas Licor rico	14
Tabla 5	Listado procedimientos en los que se participó	18
Tabla 6	Normativa aplicable al manejo de sustancias peligrosas	19
Tabla 7	Catastro sustancias peligrosas	20
Tabla 8	Símbolos de riesgo y peligrosidad.	21
Tabla 9	Clasificación sustancias peligrosas SPPC	22
Tabla 10	Registro no conformidades encontradas	25
Tabla 11	Mediciones ácido sulfhídrico	29
Tabla 12	Criterios utilizados para la evaluación ambiental	34
Tabla 13	Nivel de criticidad de aspectos ambientales	35
Tabla 14	Aspectos ambientales evaluados	36
Tabla 15	Concentración de hierro a distintos valores de pH	47
Tabla 16	Capacidad de tratamiento PTE modificada	52
Tabla 17	Pruebas de selección floculante	56
Tabla 18	Pruebas de determinación dosis de Nalmet [®]	57
Tabla 19	Pruebas de precipitación de cobre efluente SPPC	58
Tabla 20	Análisis químico efluente SPPC, mes noviembre	61
Tabla 21	Análisis químico efluente SPPC, mes diciembre	62

LISTA DE ABREVIATURAS

AA: Espectrometría de absorción atómica

AC: Alto cobre

BC: Bajo cobre

DAND: División Andina

DGA: Dirección general de aguas

ICP: Espectrometría de inducción de plasmas.

LX: Lixiviación y Recuperación

PTE: Planta tratamiento de efluentes

RPM: Revoluciones por minuto

SGI: Sistema de gestión integral

SPPC: Superintendencia plantas productos comerciales

GLOSARIO DE TERMINOS

Aspecto ambiental: Elemento de las actividades, productos o servicios de una organización que puede interactuar con el medio ambiente.

Control automático: Es el mantenimiento de un valor deseado dentro de una cantidad o condición, midiendo el valor existente, comparándolo con el valor deseado y utilizando la diferencia para proceder a reducirla.

Flotación Colectiva: Proceso que permite la separación de los minerales sulfurados de cobre y molibdeno, del resto de los minerales que componen la mayor parte de la roca original.

Flotación Selectiva: Proceso que permite la separación diferencial del cobre y el molibdeno.

Licor rico: Solución proveniente del proceso de Lixiviación y Recuperación, que esta constituida por cloruro de hierro (II), cloruro de hierro (III), y cloruro de cobre (II).

Riesgo ambiental: Es la posibilidad de que se produzca un daño o catástrofe en el medio ambiente natural o social por causa de un fenómeno natural o una acción humana e industrial.

Set - point: Es el valor constante al cual se desea mantener una variable de un proceso unitario como: pH, temperatura, caudal, etc.

Sistema de Gestión Integral: Sistema de Gestión relativo a Ambiente; Calidad; y Seguridad y Salud Ocupacional y que tiene en cuenta los requisitos de las Normas ISO 14001:2004; ISO 9001:2000 y OHSAS 18001:1999.

RESUMEN

En este trabajo se evaluaron los aspectos ambientales que tienen relación al uso y manipulación de sustancias peligrosas, se identificaron dos aspectos significativos los que corresponden a la formación de aerosoles de ácido sulfúrico producto de la oxidación del ácido sulfhídrico presente en la planta y los derrames de cloruro ferroso y riles fuera de norma, provenientes del proceso de Lixiviación y Recuperación. Se midieron las concentraciones ambientales de ácido sulfhídrico con un detector electroquímico y se encontró que su principal fuente de emisión corresponde a la descomposición del sulfhidrato de sodio que se derrama durante el proceso de descarga, desde el camión de transporte al tanque de almacenamiento. Para controlar un eventual derrame de cloruro ferroso, se diseñó un sistema de control automático, el que emplea hidróxido de sodio como agente precipitante de hierro, las pruebas realizadas dieron como resultado que a un pH = 9, se consigue la precipitación del 100 % del hierro presente en el Licor rico, razón por la que se determinó este valor como "Set- point", para el sistema de control automático.

Para precipitar el cobre en el efluente de la Superintendencia Plantas Productos Comerciales se utilizó el precipitador de metales Nalmet[®] y el floculante Nalco 83400. El empleo de estos reactivos ayudó a que las concentraciones de cobre en el efluente de la planta se encuentren bajo los límites establecidos en el Decreto Supremo 90.

Mediante el desarrollo de este trabajo se colaboró a que todas las sustancias peligrosas que se manejan en la Superintendencia Plantas Productos Comerciales de la División Andina, cumplan con todos los requisitos establecidos en el reglamento interno de sustancias peligrosas de la división y la legislación Chilena aplicable.

ABSTRACT

In this work the aspects environment were assess that have relationship to the use and manipulation of hazardous materials. Two significant aspects were identified which correspond to the formation of aerosols of acid sulfuric product of the oxidation of the sulfhidric acid present in the plant, and the spills of iron chloride and riles out norm, originating from the leaching process and recovery. It was measured the concentrations environment of sulfhidric acid with an electrochemical detector, it found that their main emission source corresponds to the decomposition of the sodium sulfhydrate that spill during the discharge process, from the truck of transport to the storage tank. In order to control the spills of ferrous chloride, it design a system of automatic control, the one that uses hydroxide of sodium like agent iron precipitant, the made tests gave like a result that to a $\text{pH} = 9$, the precipitation of 100% of the present iron in the rich liquor is gotten, reason why it determines this value like "Set- point", for the system of automatic control.

In order to precipitate the copper in the effluent of the Superintendence Plants Products Commercials, it used the metal precipitant Nalmet[®] and the flocculants Nalco 83400. The use of these reagents helped to that the copper concentrations in the effluent of the plant are below the limits established in the Supreme Ordinance 90.

With the development of this work we collaborated to that all the hazardous materials that are managed in the Superintendence Plants Products Commercials of Division Andina, fulfill with regard in the internal regulation of hazardous materials of the division and the Chilean legislation applicable.

I INTRODUCCIÓN

División Andina es una de las cinco divisiones operativas de Codelco Chile. Se encuentra ubicada en la V Región, a 38 kilómetros de Los Andes y a 50 kilómetros al noreste de Santiago. Sus operaciones mineras se llevan a cabo en el yacimiento Río Blanco ubicado en la cordillera de Los Andes, entre los 3.500 y 4.200 metros sobre el nivel del mar. División Andina es la tercera división de Codelco en términos de producción de cobre fino, también es la única que no posee fundición propia, por lo que la mayor parte de sus concentrados son exportados².

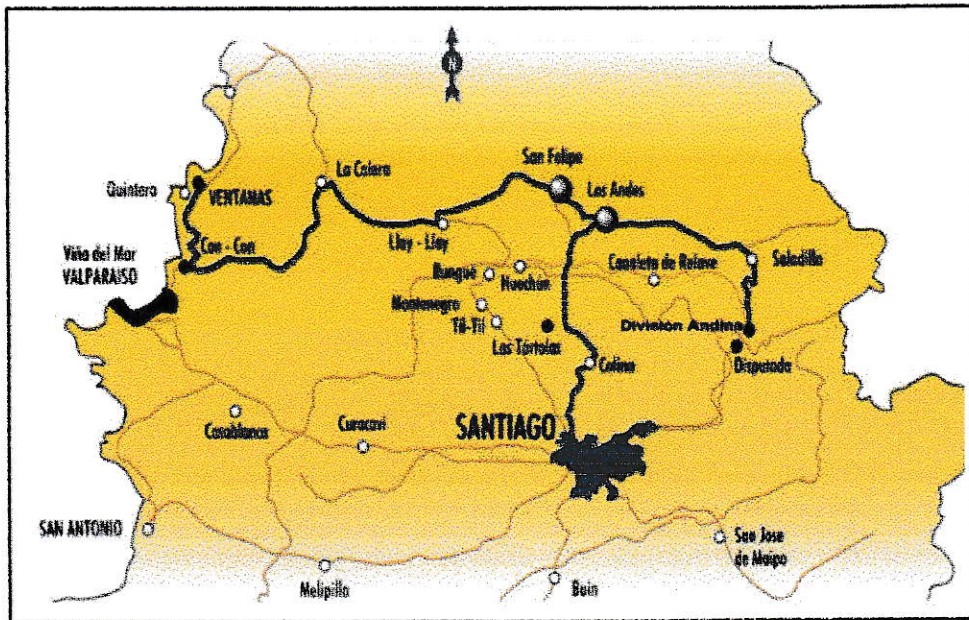


Figura 1: Mapa ubicación División Andina

Los concentrados de cobre que son producidos por la División Andina, están compuestos aproximadamente en partes iguales por cobre, hierro y azufre. Este material constituye la materia prima de todas las fundiciones de cobre, que al procesarlo obtienen un cobre metálico impuro en forma de blister o ánodos, que posteriormente son

utilizados para elaborar cobre refinado de alta pureza. Las operaciones que realiza la División Andina en el valle de Rio Blanco pueden dividirse en tres áreas principales, las que son: Mina, Concentrador y Plantas Productos Comerciales.

1.1 Área mina

En la División Andina existen dos puntos de extracción de mineral, los que son: mina subterránea Rio Blanco y la mina a rajo abierto Sur Sur. La mina subterránea se explota por el sistema de hundimiento por bloques el que consiste en socavar con explosivos bloques rocosos que tienen dimensiones entre 100 y 200 metros de altura y un área basal de 90 m por 60 m que contienen aproximadamente entre 1.000.000 a 2.500.000 toneladas de mineral, el que al ser fracturado cae por gravedad a través de piques a diferentes niveles de explotación. La mina Sur Sur es explotada por el método de extracción por bancos que incluye: perforación, tronadura, carguío y transporte, este ultimo se efectúa mediante el empleo de palas hidráulicas y camiones de gran capacidad de carga. Una vez que se ha extraído el mineral desde la mina subterránea y la mina a rajo abierto, es transportado mediante correas transportadoras al área concentrador³.

1.2 Área Concentrador

Esta se ubica a 3.000 metros sobre el nivel del mar. El objetivo del proceso de concentración es liberar y concentrar las partículas de cobre y molibdeno que se encuentran en forma de sulfuros en las rocas mineralizadas, de manera que pueda continuar a otras etapas del proceso productivo. En la División Andina, este proceso se

realiza en instalaciones ubicadas en el interior de la mina. El proceso de concentración se divide en las siguientes etapas²:

- 1) Chancado
- 2) Molienda
- 3) Flotación colectiva

1.3 Área Plantas Productos Comerciales

Estas plantas se ubican en el sector de Saladillo y reciben el concentrado mixto proveniente del proceso de flotación colectiva para someterlo a un proceso de flotación selectiva primaria o Rougher, aquí se logra la separación diferencial del concentrado de cobre y molibdeno en atmósfera inerte, depresando los minerales de cobre por la adición de sulfhidrato de sodio, (NaHS), y colectando el molibdeno con petróleo diesel. El concentrado de cobre es filtrado y secado, posteriormente es transportado al puerto de Ventanas para su comercialización. El concentrado de molibdeno se somete a un proceso de lixiviación con cloruro férrico para extraer las especies de cobre que puedan quedar y obtener un concentrado con calidad comercial. En el proceso de flotación selectiva y lixiviación se utilizan grandes cantidades de sustancias peligrosas como: ácido sulfúrico, sulfhidrato de sodio, hidróxido de sodio, petróleo, cloro, cloruro férrico, además se originan otras sustancias peligrosas como subproductos del proceso, este es el caso del ácido sulfhídrico y el cloruro ferroso, es por ello que en este trabajo se gestionaran los riesgos ambientales originados producto del manejo de sustancias peligrosas con el propósito de mejorar el desempeño ambiental de la organización.

1.4 Política del sistema de gestión integrado

La División Andina de Codelco Chile, ha implantado un sistema de gestión integrado en todos sus procesos, con el propósito de incrementar su competitividad y sustentabilidad.

A continuación se presenta la política del SGI.



**POLITICA DE GESTIÓN INTEGRAL
DE SEGURIDAD Y SALUD OCUPACIONAL,
MEDIO AMBIENTE Y CALIDAD**

CODELCO CHILE DIVISIÓN ANDINA, empresa del Estado, productora de concentrados de cobre y molibdeno, declara que los pilares fundamentales de su competitividad y sustentabilidad en el largo plazo son:

- La seguridad, salud y calidad de vida de los trabajadores; la calidad de sus procesos y productos y la responsabilidad ambiental y social de sus actividades.
- Es por ello que reafirma que su estilo de gestión -sistemático e integrado- se operativiza en la organización mediante el Sistema de Gestión Integral (SGI), el que permite materializar sus objetivos con sustentabilidad y atender las expectativas de las partes interesadas y la realización de sus integrantes.
- En este marco, División Andina declara su compromiso para:
 - Cumplir con el marco legal, la reglamentación vigente y los compromisos que la División ha suscrita y que sean aplicables a sus actividades.
 - Propiciar relaciones mutuamente beneficiosas con clientes y proveedores.
 - Identificar los peligros, aspectos ambientales y variables claves de proceso; evaluarlos y establecer medidas de control.
 - Propiciar el cuidado de la salud y el bienestar de todas las personas que trabajan en sus operaciones.
 - Promover conductas laborales basadas en la prevención de los incidentes, la contaminación, las enfermedades y las desviaciones de los procesos.
 - Tender a una utilización eficiente de los recursos, con énfasis en el aprovechamiento del agua y la energía.
 - Promover el uso de tecnologías ambientalmente sustentables y tender a las mejores prácticas sobre el manejo de residuos.
 - Aplicar el mejoramiento continuo a los procesos y al Sistema de Gestión Integral.
 - Reafirmar como valor esencial de División Andina que ninguna meta de producción o emergencia operacional justifica que un trabajador se exponga a riesgos no controlados.
 - CODELCO CHILE DIVISIÓN ANDINA asume el cumplimiento de esta Política de Gestión Integral como la premisa fundamental para alcanzar la excelencia en sus operaciones.


Daniel Trivezi Dyarzún
Gerente General

Junio de 2004

II OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Evaluar el estado actual de las sustancias peligrosas en la Superintendencia Plantas Productos Comerciales, conforme al reglamento interno de la División Andina y proponer planes de manejo para aquellas sustancias que presenten riesgos ambientales.

2.2 Objetivos Específicos

1. Verificar el cumplimiento de las normas ambientales aplicables al uso y manipulación de sustancias peligrosas.
2. Caracterizar y clasificar las sustancias peligrosas utilizadas en la Superintendencia Plantas Productos Comerciales o que puedan ser generadas como subproductos en el proceso productivo del molibdeno y del concentrado de cobre.
3. Estudiar, desarrollar e implementar un procedimiento de prevención y tratamiento químico para derrames de cloruro ferroso.
4. Diseñar en base a los resultados obtenidos, un sistema de control automático para el manejo de los derrames de cloruro ferroso.

III SUPERINTENDENCIA PLANTAS PRODUCTOS COMERCIALES

La Superintendencia Plantas Productos Comerciales, (SPPC), constituye la última etapa del proceso productivo de la División Andina, es en estas plantas donde a través de un mineroducto de 28 Km de longitud se recibe el concentrado mixto de cobre proveniente del área concentrador. Este es la materia prima con la que se alimenta el proceso de flotación molibdeno.

3.1 Composición química y mineralógica del concentrado mixto de cobre

El principal mineral que se extrae en la División Andina corresponde a la calcopirita CuFeS_2 es por ello que en promedio el 85 % del concentrado mixto que es transportado a la SPPC esta constituido por Cu, Fe y S, no obstante, también encontramos otras especies como el SiO_2 y el Al_2O_3 , en la Tabla 1 se muestra la composición química del concentrado de cobre.

Tabla 1: Composición química del concentrado de cobre.

Elemento	% Peso
As	0,198
Cu	28,31
Fe	28,42
S	33,51
Mo	0,422
Pb	0,058
Zn	0,308
Al_2O_3	2,570
SiO_2	6,200

Fuente: Codelco Chile, División Andina, Abril 2006

La División Andina produce principalmente minerales sulfurados de cobre, es por ello que el azufre se encuentra en casi todos los minerales que se extraen desde la mina

subterránea Rio Blanco, así como también de la mina a rajo abierto Sur Sur. En la Tabla 2 se muestra la composición mineralógica del concentrado de cobre.

Tabla 2: Composición mineralógica del concentrado de cobre.

Especie	Compuesto	% en peso
Calcopirita	CuFeS_2	72,89
Calcosina	Cu_2S	0,570
Covelina	CuS	2,220
Enargita	$3\text{Cu}_2\text{S} * \text{As}_2\text{S}_5$	0,280
Bornita	Cu_5FeS_4	0,510
Tenantita	$\text{S}_{13}\text{As}_4(\text{Cu},\text{Fe},\text{Zn},\text{Ag})_{12}$	0,710
Pirita	FeS_2	12,10
Molibdenita	MoS_2	0,700
Hematita	Fe_2O_3	0,910
Magnetita	Fe_3O_4	0,130
Rutilo	TiO_2	0,210
Ganga	$(\text{Al}_2\text{O}_3, \text{SiO}_2)$	8,770

Fuente: Codelco Chile, División Andina, Abril 2006

3.2 Procesos Superintendencia Plantas Productos Comerciales

La SPPC, cuenta con cuatro procesos principales los que son:

- Flotación Molibdeno
- Lixiviación y Recuperación
- Filtrado Convencional
- Filtrado Larox

Se cuenta además, con un proceso de tratamiento de efluentes, el que mediante un proceso unitario que cuenta con clarificadores, sedimentadotes y filtros de arena, tiene la misión de entregar a las aguas del Rio Blanco, efluentes con parámetros químicos que cumplan con la legislación vigente.

3.2.1 Flotación Molibdeno

El propósito del proceso de flotación molibdeno, es la obtención del concentrado de molibdeno alto cobre, (mayor o igual a 4,3 % de Cu), a partir de la pulpa de concentrado mixto, (pulpa con: 0,2 a 0,6 % de Mo, 28 a 32% de Cu y 25 a 50% de sólidos), proveniente desde el proceso de flotación colectiva. Esta pulpa mixta ha sido tratada durante el proceso de flotación colectiva con hidróxido de calcio, (Ca(OH)₂), como regulador del pH, debido a ello las partículas de calcopirita y molibdenita, traen en la superficie de sus cristales residuos de hidróxido de calcio y carbonato de calcio, los que si no son eliminados antes de comenzar el proceso de flotación selectiva, le restan eficiencia al proceso. Para eliminar estos residuos se acondiciona la pulpa, mediante el empleo de ácido sulfúrico al 98 %, el que reacciona con el hidróxido de calcio y carbonato de calcio, dejando limpia la superficie de los cristales formando sulfato de calcio. A continuación se muestran las ecuaciones.



Posteriormente el concentrado mixto ingresa a la etapa de flotación de molibdeno o flotación selectiva, la que mediante el empleo de reactivos como NaHS, petróleo diesel y mediante la inyección de burbujas de aire desde el fondo de la celda de flotación, consigue la separación de la pulpa en concentrado de cobre y concentrado de molibdeno. En la Figura 2 se muestra una celda de flotación por aire disuelto semejante a la utilizada en el proceso de flotación selectiva.

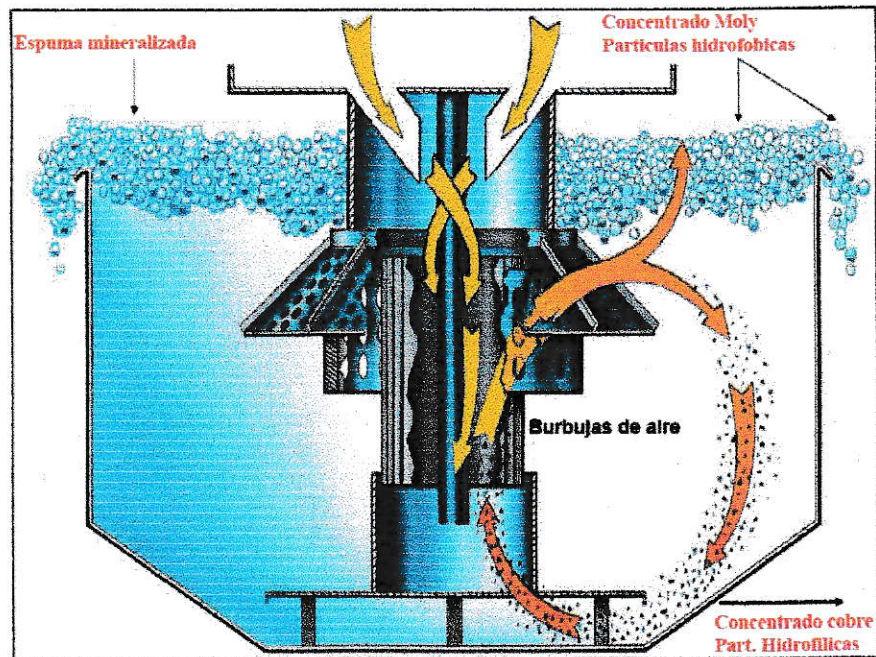


Figura 2: Celda de flotación por aire disuelto. Fuente: Empresa Dorr-Oliver eimco.

El proceso de flotación contempla la presencia de tres fases: sólida, líquida, gaseosa. La fase sólida representa los minerales a separar, en este caso compuesta por, (CuFeS_2 - MoS_2), la fase líquida es el medio donde ocurrirá la separación, en este caso agua y la fase gaseosa es el aire inyectado en la pulpa en forma neumática, para formar las burbujas que son los centros sobre los que se adhieren las partículas sólidas aerofílicas de molibdenita³. En la Figura 3 se muestran partículas de molibdenita adheridas a una burbuja de aire.

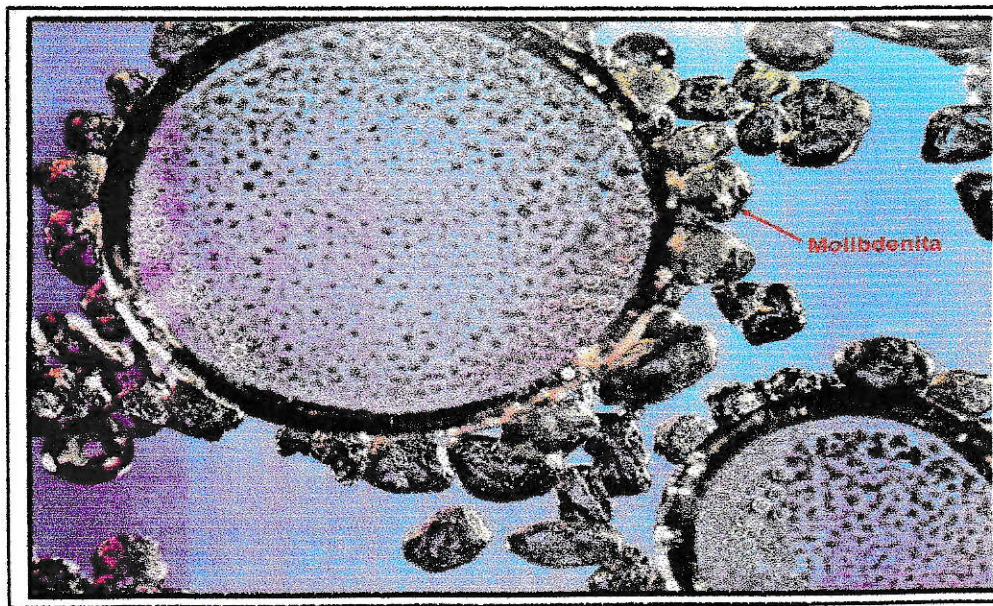


Figura 3: Partículas de molibdenita adheridas a burbujas de aire. Fuente: Empresa Dorr-Oliver eimco.

La flotación se basa en las propiedades hidrofílicas, (afinidad por el agua), y aerofílicas, (afinidad por el aire), de una especie mineral que se requiere separar de otras especies. El sulfhidrato de sodio se emplea como un reactivo depresante de cobre, puesto que, modifica las propiedades superficiales de la calcopirita, el sulfhidrato de sodio se une a los bordes con carga positiva del cristal de calcopirita, y lo transforma en un sólido aerofóbico e hidrofílico, esto le permite separarse del molibdeno y colectarse en el fondo de la celda de flotación. La superficie de la molibdenita no es modificada por el sulfhidrato de sodio, puesto que, el borde de sus cristales posee cargas negativas, por lo tanto conserva sus propiedades aerofílicas e hidrofóbicas y es colectada por el petróleo diesel adhiriéndose a las burbujas de aire, con lo que la molibdenita flota a la superficie de la celda.

3.2.2 Planta Filtrado Convencional

El propósito del proceso de filtrado convencional es espesar, filtrar y secar el concentrado de cobre hasta humedad comercial, (entre 8,6 – 9,0 %), y trasladarlo hasta la bodega de almacenamiento de concentrado de cobre de Saladillo.

El proceso filtrado convencional cuenta con tres filtros de tambor rotatorio. Los que operan con succión mediante vacío en el 90% de su área filtrante para extraer el agua y con soplado en el sector restante. La carga proveniente de los filtros de tambor es transportada por la correa transportadora 11, la que alimenta el horno de secado, donde el concentrado de cobre es secado mientras avanza a lo largo de éste, por intercambio de calor con gases y aire caliente provenientes de la cámara de combustión de petróleo y arrastrados por el sistema extractor. El horno de secado dispone internamente de alzadores de carga y cadenas para evitar los aglomerados y permitir el avance del concentrado. Por otra parte, en su exterior posee martillos que despegan el material pegado a la pared, ambos elementos buscan mantener una buena área de transferencia de calor. Mediante este intercambio de calor, el concentrado de cobre es deshidratado liberando grandes cantidades de vapor que junto al resto de los gases calientes ya enfriados son enviados por extracción forzada a un sistema húmedo de abatimiento de polvo. El concentrado seco, una vez que ha alcanzado el final del horno de secado, es descargado sobre la correa 12, que es la encargada de llevarlo hasta la bodega de almacenamiento de concentrado de cobre, con una humedad comercial entre 8,6 – 9,0 %.

3.2.3 Planta Filtrado Larox

En el proceso de filtrado larox se filtra el concentrado de cobre hasta humedad comercial, (entre 8,6 - 9,0 %), posteriormente se traslada hasta la bodega de almacenamiento de Saladillo, donde el concentrado de cobre es cargado en tren para ser transportado al puerto de Ventanas. La pulpa de concentrado de cobre es filtrada en un filtro de presión de alta eficiencia de 24 placas verticales como el que se muestra en la Figura 4.

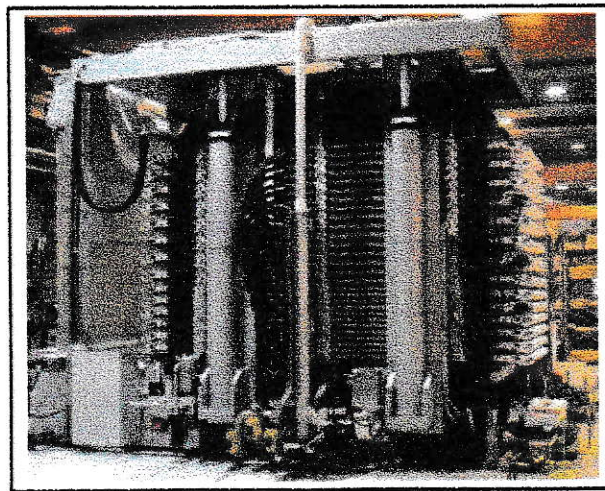


Figura 4: Filtro Larox

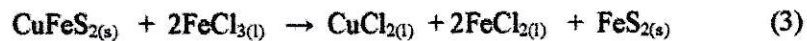
El concentrado que ha ingresado en las cámaras, comienza a confinarse entre el diafragma y la tela filtrante, ya que los sólidos de la pulpa quedan retenidos sobre la tela, mientras que el agua permea a través de la misma, puesto que, en las cámaras la única superficie permeable es la tela. La bomba de alimentación logra introducir un volumen mucho mayor de pulpa que el volumen de las cámaras, en esta etapa es donde más agua se filtra de la pulpa. El término de la alimentación es automático y puede producirse al finalizar el tiempo de alimentación, el que es definido por el operador

planta o al momento en que el filtro alcanza el peso de carga máxima deseada, el que siempre estará controlado por la celda de carga.

3.2.4 Planta Lixiviación y Recuperación

En esta planta el molibdeno alto cobre proveniente del proceso de flotación selectiva es lixiviado con cloruro férrico, para extraer el cobre y obtener concentrado de molibdeno bajo cobre, (0,4 % Cu). Este proceso se efectúa en 4 reactores Pfaudler con operación tipo Bach a 115 °C, una vez alcanzado el tiempo de lixiviación, se realiza la descarga de los reactores por gravedad, la pulpa lixiviada es lavada y filtrada en un filtro prensa Perrin de 20 placas de 1,5 por 1,5 metros, con ciclos de 1 hora de duración. La torta que se obtiene de este proceso es el concentrado de molibdeno bajo cobre.

El cloruro férrico es selectivo y solo reacciona con la calcopirita para producir cloruro cúprico dejando libre la molibdenita, de acuerdo a la siguiente ecuación.



Este proceso genera dos soluciones, un Licor rico en cobre y otro Licor pobre, en la Tabla 3 se muestran las concentraciones promedio del Licor rico y en la Tabla 4 se muestran sus características químicas.

Tabla 3: Concentración media de especies del Licor rico

Especie	Concentración (g/L)
FeCl ₂	110
FeCl ₃	12
CuCl ₂	50

Tabla 4: Características químicas Licor rico

Parámetro	Unidad	Valor
pH	---	0,9
Potencial	mV	450
Coloración	---	Negra

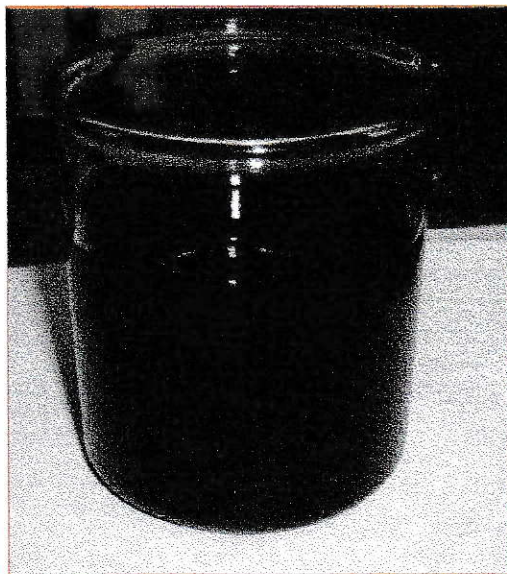
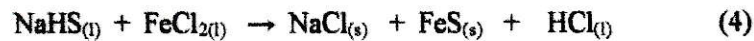


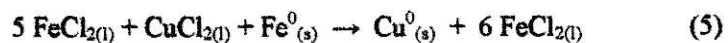
Figura 5: Imagen del Licor rico.

Como se observa en la Tabla 3 el Licor rico posee una alta concentración de cobre, es por ello que con el objetivo de recuperar este elemento, la solución es transportada a un proceso de cementación, para obtener cemento de cobre, (90 % Cu).

El Licor pobre es utilizado para abatir el sulfhidrato de sodio residual que poseen las aguas provenientes del proceso de flotación molibdeno, de acuerdo a la siguiente ecuación.



La etapa de cementación como se menciono anteriormente tiene como entradas el Licor rico que contiene FeCl_2 y CuCl_2 y tiene como salidas FeCl_2 limpio, (con contenido bajo en cobre), y cemento de cobre. El proceso de cementación consiste en extraer el contenido de cobre del Licor rico en forma de cobre metálico mediante la adición de chatarra de hierro, a través de una reacción de oxidorreducción el hierro metálico, (chatarra), pasa a solución como Fe^{+2} y el cobre en solución pasa a cobre metálico Cu^0 , de acuerdo a la siguiente ecuación.



Esta reacción se realiza en un cementador continuo de polipropileno de 2 m de diámetro por 3 m de largo con velocidad de giro de 1,5 RPM, y con un consumo medio de 1 tonelada de chatarra al día y una producción media de 0,2 toneladas de Cu /día.

Producida la cementación, el licor va a un estanque decantador que almacena el cemento de cobre granulado y el rebose va a las piscinas de salida desde donde se bombea el FeCl_2 hacia los estanques S_1 y S_2 . La pulpa de cemento de cobre que queda

en el decantador se agita y por bombeo se alimenta a un filtro Perrin de 20 placas, (80 x 80 cm), se agrega agua fresca industrial e hidróxido de sodio para neutralizar el cemento de cobre a pH 7, enviando esta solución de lavado a la PTE de la SPPC. Cada ciclo descarga 400 Kg de cemento de cobre con una humedad máxima de 15%. La solución de FeCl₂ producida es transportada al proceso de cloración en el que en un reactor ingresa el FeCl₂ por la parte superior y cloro líquido que se hace burbujear por la parte inferior produciendo una reacción instantánea que genera además calor por ser una reacción exotérmica. Este proceso regenera la solución lixivante de cloruro férrico.



El FeCl₂ proveniente de los estanques de almacenamiento, (S1 y S2), y el cloro líquido se distribuye hacia el reactor por una cañería conectada a un carro "Isotank". El cloruro férrico producido tiene dos destinos: una parte se introduce nuevamente en el reactor, previo enfriamiento en un intercambiador de calor de placas, que permiten un control de temperatura en el reactor y el otro es almacenado en el estanque de despacho para su envío a los dos estanques acumuladores de 30 m³ de capacidad que alimentan el proceso de lixiviación y recuperación.

La planta de cloración es operada en forma automática y la solución permanece en el reactor hasta que se alcanza el potencial de -585 mV que corresponde a la oxidación del 95% del FeCl₂ a FeCl₃.

IV MANEJO DE SUSTANCIAS PELIGROSAS

Para mejorar el desempeño de la organización con respecto al manejo de sustancias peligrosas, en la SPPC se realizó el siguiente plan de trabajo que se muestra en la Figura

6.

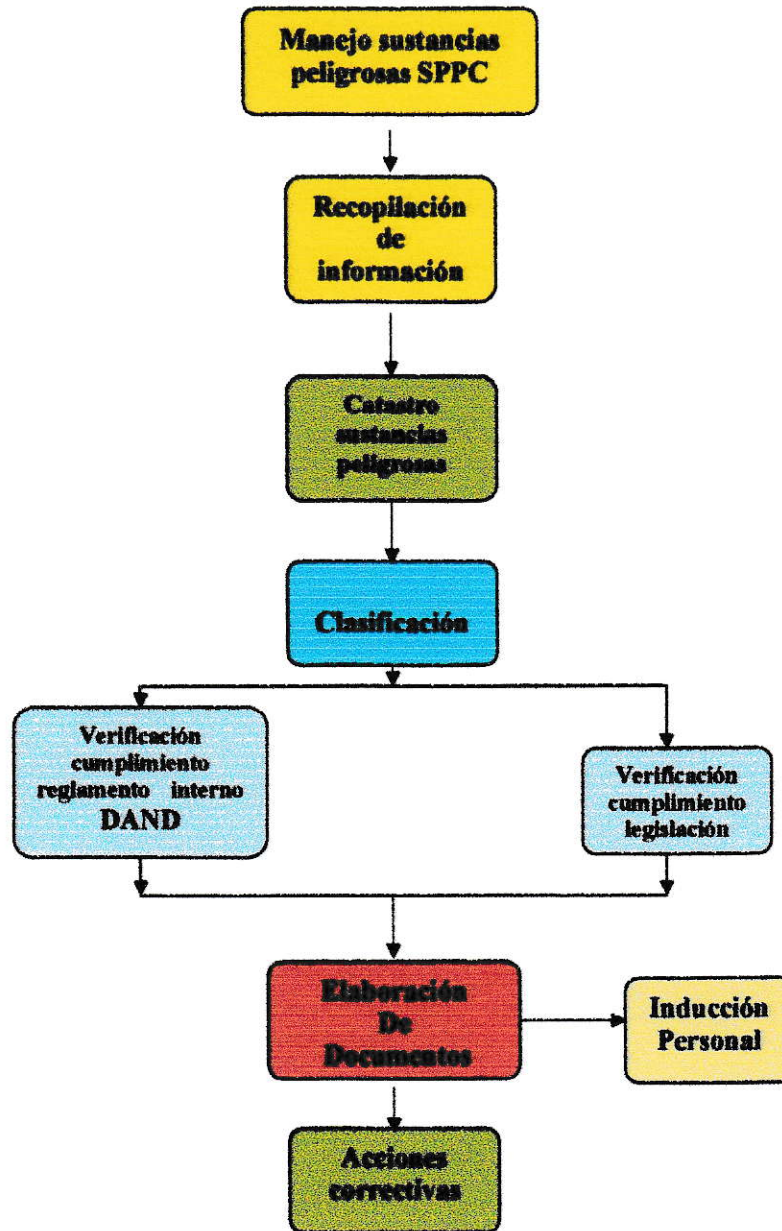


Figura 6: Etapas del trabajo realizado.

4.1 Manejo sustancias peligrosas SPPC

En esta etapa se planificó y se elaboró los procedimientos administrativos a seguir para mejorar el plan de manejo de sustancias peligrosas en la SPPC, a continuación se detallan las actividades realizadas en este trabajo.

- Capacitación e inducción
- Catastro de sustancias peligrosas
- Control de documentos y datos
- Identificación de no conformidades
- Identificación de aspectos e impactos ambientales
- Chequeos en terreno
- Monitoreo de gases
- Control de aspectos ambientales significativos.

A continuación en la Tabla 5 se presentan un listado de los procedimientos en los que se participó.

Tabla 5: Listado de procedimientos en los que se participó.

Nombre	Código
Catastro sustancias peligrosas	SGI-GE-070.01
Identificación requisitos legales	SGI-P-GE-002
Evaluación aspectos ambientales	SGI-I-GE-006
Capacitación personal	-----
Clasificación sustancias peligrosas	SGI-P-R-GE-003
Monitoreo gases.	-----

4.2 Recopilación de información

En esta etapa se hace uso de la biblioteca electrónica del sistema de gestión integrado de la DAND, para obtener información acerca de los procesos de la SPPC, así como también, de los diferentes reglamentos, instructivos y procedimientos existentes para el manejo de sustancias peligrosas. Posteriormente se hacen visitas a terreno y recorridos por lo diferentes lugares de producción para obtener información adicional y entrevistar al personal. También se realiza una inducción acerca de las distintas actividades de la SPPC, con el ingeniero jefe de procesos. Finalmente se realiza una búsqueda bibliográfica para obtener información acerca de la normativa ambiental y legal aplicable al manejo de sustancias peligrosas.


Tabla 6: Normativa aplicable al manejo de sustancias peligrosas.

Norma	Descripción
Nch-2190	Transporte sustancias peligrosas.
Nch-382	Sustancias peligrosas terminología y clasificación.
DS-594	Condiciones sanitarias y ambientales en los lugares de trabajo.
Ley 19300	Bases generales sobre el medio ambiente.
Reglamento sustancias peligrosas DAND.	Almacenamiento, compra, distribución, manejo y uso de sustancias peligrosas en la DAND.
DS-90	Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales

4.3 Catastro sustancias peligrosas

Con el objetivo de identificar las sustancias peligrosas que se manipulan en la SPPC, se realizó una inspección a las plantas y a todos los procesos, con el propósito de efectuar un catastro de estas y establecer las cantidades almacenadas. En la Tabla 7 se muestran las sustancias peligrosas utilizadas, su ubicación y la cantidad almacenada.











Tabla 7: Catastro sustancias peligrosas

		Catastro sustancias peligrosas	Hoja de
Sustancia peligrosa	Ubicación	Cantidad almacenada (L)	
Acido sulfúrico	Frente a oficinas generales y planta tratamiento efluentes	18.000	
Acido clorhídrico	Laboratorio químico	5	
Acido nítrico	Laboratorio químico	12	
Acido sulfhídrico	Variable, (descomposición NaHS).	Cantidad variable	
Acido acético	Laboratorio químico	5	
Cloro líquido	Planta de cloración	37.000	
Cloruro férrico	Planta de cloración	V	
Hidróxido de sodio	Sector decantadores de Molibdeno	20.000	
Peróxido de hidrógeno	Planta tratamiento efluentes	12.000	
Petróleo Enap 6	Filtrado convencional	42.000	
Petróleo diesel	Flotación Molibdeno	30.000	
Sulfhidrato de sodio	Tanque almacenamiento NaHS	220.000	
Realizado por :		Hora :	
Fecha :		Firma :	

4.4 Clasificación

Para realizar esta tarea se utilizan los símbolos de riesgo o peligrosidad, los que dan información acerca de las características de una sustancia química. La etiqueta es en general, la primera fuente de información que recibe el trabajador en el lugar donde desempeña su tarea y es la que permite identificar el producto en el momento de su utilización. Todo contenedor o recipiente que contenga una sustancia química peligrosa debe llevar obligatoriamente esta etiqueta⁸, es por ello que en este trabajo se clasificaron las sustancias peligrosas que se manejan en la SPPC, de acuerdo a las categorías establecidas en la norma chilena Nch-382.

Tabla 8: Símbolos de riesgo y peligrosidad.

<p>N</p>  <p>Peligroso para el medio ambiente</p>	<p>F+</p>  <p>Extremadamente inflamable</p>	<p>F</p>  <p>Fácilmente inflamable</p>	<p>C</p>  <p>Corrosivo</p>	<p>O</p>  <p>Comburente</p>
<p>E</p>  <p>Explosivo</p>	<p>T+</p>  <p>Muy tóxico</p>	<p>T</p>  <p>Tóxico</p>	<p>X_N</p>  <p>Nocivo</p>	<p>X_I</p>  <p>Irritante</p>

En el Anexo 1, se muestran las características utilizadas para clasificar las sustancias peligrosas de la SPPC y en la Tabla 9 se muestra la etiqueta asignada a cada una de ellas.

Tabla 9: Clasificación sustancias peligrosas SPPC

	Clasificación sustancias peligrosas SPPC		Hoja de
Sustancias peligrosas	Clasificación	Etiqueta	
Ácido sulfúrico Ácido sulfhídrico Cloruro ferroso Cloruro férrico Riles fuera de norma	N Peligro para el medio ambiente		
Ácido sulfhídrico Cloro líquido Cloro gas	T+ Muy Tóxico		
Peróxido de hidrógeno	O Comburente		
Ácido sulfúrico Hidróxido de sodio Sulfhidrato de sodio Cloruro ferroso Cloruro férrico	C Corrosivo		
Petróleo diesel Petróleo Enap 6	F Fácilmente inflamable		
Realizado por: Fecha :		Hora : Firma :	

4.5 Verificación cumplimiento reglamento interno y legislación aplicable

Para verificar el cumplimiento del reglamento interno de sustancias peligrosas de la DAND, en la SPPC, se estableció el procedimiento presentado en la Figura 7 mediante el cual se determinó el estado del manejo de sustancias peligrosas, con respecto al transporte, almacenaje, manipulación y los aspectos ambientales asociados a su uso. Posteriormente se propuso las acciones a seguir para lograr un mejor manejo y el cumplimiento a cabalidad del reglamento de DAND y la normativa aplicable expuesta anteriormente en la Tabla 6.

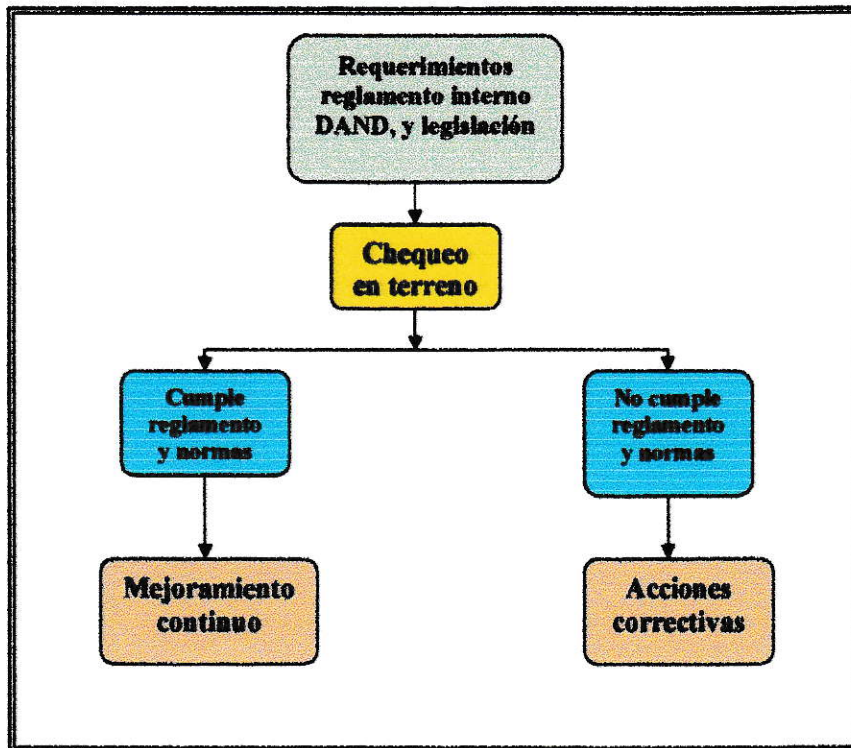


Figura 7: Procedimiento verificación cumplimiento reglamento interno.

Para chequear en terreno los requerimientos establecidos en la normativa y el reglamento interno se elaboró el siguiente procedimiento.

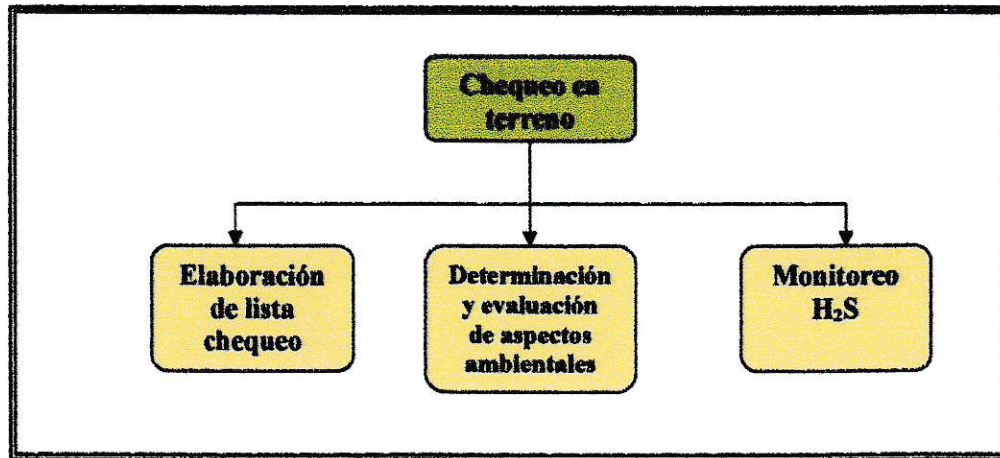



Figura 8: Procedimiento chequeo en terreno.

4.5.1 Elaboración de procedimientos y documentos

Para realizar las revisiones en terreno se confeccionó la lista de chequeo mostrada en el Anexo 2, esta se realizó en base al reglamento interno de DAND, y la normativa aplicable, con el propósito de determinar que aspectos no estaban cumpliendo los requisitos del SGI y las causas de esto, de modo tal de establecer las acciones a seguir para corregirlas. Además con esta lista de chequeo se revisó y evaluó las sustancias peligrosas establecidas en la Tabla 7, y se procedió a actualizar tanto su contenido como la revisión de las sustancias peligrosas una vez al mes, posteriormente se confeccionó una lista con las no conformidades encontradas y se procedió a establecer las acciones correctivas a tomar, así como también su control posterior, en la Tabla 10 se muestra el formato elaborado para registrar las no conformidades encontradas en los distintos

procesos unitarios de la SPPC, que tienen relación al manejo de productos químicos como: ácido sulfúrico, sulfhidrato de sodio, cloro. En el Anexo 3 se muestra la ficha de control de terreno confeccionada para tener un registro semanal y actualizado del estado de las sustancias peligrosas almacenadas en la SPPC, en relación a la disponibilidad de las hojas de seguridad en los lugares de almacenamiento, el estado de los lavajos y duchas, y también para registrar los eventos en los que se haya producido derrames de productos químicos que puedan generar episodios de contaminación del suelo o riesgos a las personas.

Tabla 10: Registro no conformidades encontradas.

		Registro no conformidades encontradas		Hoja de
No conformidad		Sustancia peligrosa	Ubicación	Proceso
Realizado por:		Hora :		
Fecha :		Firma :		

4.5.2 Control hojas datos de seguridad

La hoja datos de seguridad, (HDS), es un documento que permite comunicar, en forma breve los peligros que los productos químicos presentan para el trabajador, infraestructura y el medio ambiente. También informa acerca de las precauciones requeridas en el uso del producto y las medidas de control a tomar en casos de emergencias, como un derrame o incendio⁴. La confección y el diseño de la HDS, corresponde a lo descrito en la norma Chilena Nch- 2245 Of.93. En la SPPC de acuerdo al reglamento interno de sustancias peligrosas todos los productos químicos deben contar con su hoja de seguridad, la que debe informar acerca de las siguientes características:

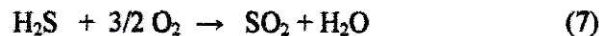
- Propiedades físicas.
- Propiedades químicas
- Peligros asociados
- Medidas de prevención y control
- Procedimiento de emergencia
- Procedimiento de primeros auxilios
- Condiciones de almacenamiento
- Control de incendios.

En este trabajo se efectuó la revisión de las HDS, de todas las sustancias peligrosas de la SPPC, con el objetivo de advertir no conformidades con respecto a su almacenamiento, medidas de control y los peligros químicos asociados. También se revisó el procedimiento para el manejo de derrames y se propusieron alternativas para un mejor control.

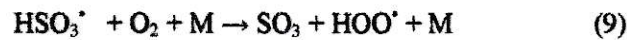
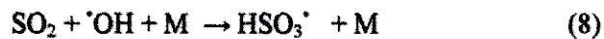
4.5.3 Monitoreo ácido sulfhídrico

El ácido sulfhídrico es un gas con un fuerte olor, no obstante, esta característica solo se puede percibir en concentraciones bajo 17 mg/m^3 , sobre esta concentración se produce una saturación de los receptores olfativos del organismo, por lo que la presencia del gas no puede ser advertida⁴. Esto presenta un peligro para lo trabajadores, puesto que, altas concentraciones del gas en las instalaciones tendrían consecuencias fatales. Otro aspecto que debe ser considerado es que el ácido sulfhídrico es un precursor de aerosoles de ácido sulfúrico los que poseen un diámetro menor a $2,5 \mu\text{m}^{12}$, lo que los convierte en un contaminante 100 % respirable, también estos aerosoles pueden causar deterioro de la infraestructura e instrumentos. A continuación se muestra el mecanismo de formación de aerosoles de ácido sulfúrico a partir de H_2S .

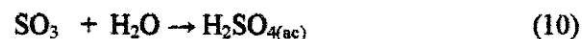
El ácido sulfhídrico es oxidado por el oxígeno del aire para producir SO_2 ,



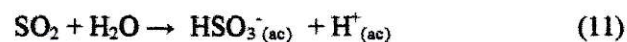
Luego este se puede convertir en ácido sulfúrico en fase gas o en solución acuosa, (Niebla). La oxidación en la fase gas implica, reacción con el radical hidroxilo.



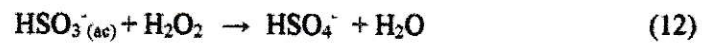
El SO_3 al solubilizarse en agua produce el ácido sulfúrico¹⁰.



La otra vía es la disolución del SO_2 en el agua originando $\text{HSO}_3\cdot$



Posteriormente el HSO_3^- (ac) puede seguir varios caminos de oxidación, el más común es la oxidación por el peróxido disuelto formado a partir de ozono.¹⁰



Para verificar la presencia de H_2S en la planta se realizaron mediciones utilizando un sensor electroquímico, (ver Anexo 4).

Se escogieron tres puntos de muestreo y se realizaron mediciones cada 60 minutos, en la Tabla 11 se muestran las concentraciones medidas.

Tabla 11: Mediciones ácido sulfhídrico.

Sector	Nº muestra	Fecha	Hora	Concentración (mg/m ³)
Tanque Almacenamiento NaHS	1	02-oct	08:30	0,00
	2	02-oct	09:30	0,00
	3	02-oct	10:30	0,00
	4	02-oct	11:30	0,00
	5	02-oct	12:30	0,00
	6	02-oct	13:30	0,00
	7	02-oct	14:30	2,78
	8	02-oct	15:30	4,17
	9	02-oct	16:30	4,17
	10	02-oct	17:30	1,39
Flotación Molibdeno	1	04-oct	08:30	0,00
	2	04-oct	09:30	1,39
	3	04-oct	10:30	2,78
	4	04-oct	11:30	0,00
	5	04-oct	12:30	1,39
	6	04-oct	13:30	4,17
	7	04-oct	14:30	0,00
	8	04-oct	15:30	1,39
	9	04-oct	16:30	2,78
	10	04-oct	17:30	0,00
Oficinas Generales	1	06-oct	08:30	0,00
	2	06-oct	09:30	0,00
	3	06-oct	10:30	0,00
	4	06-oct	11:30	0,00
	5	06-oct	12:30	0,00
	6	06-oct	13:30	0,00
	7	06-oct	14:30	0,00
	8	06-oct	15:30	2,78
	9	06-oct	16:30	1,39
	10	06-oct	17:30	1,39

En las siguientes figuras se presentan los gráficos correspondientes a las concentraciones de ácido sulfhídrico que se midieron en los tres puntos de muestreo establecidos en la SPPC.

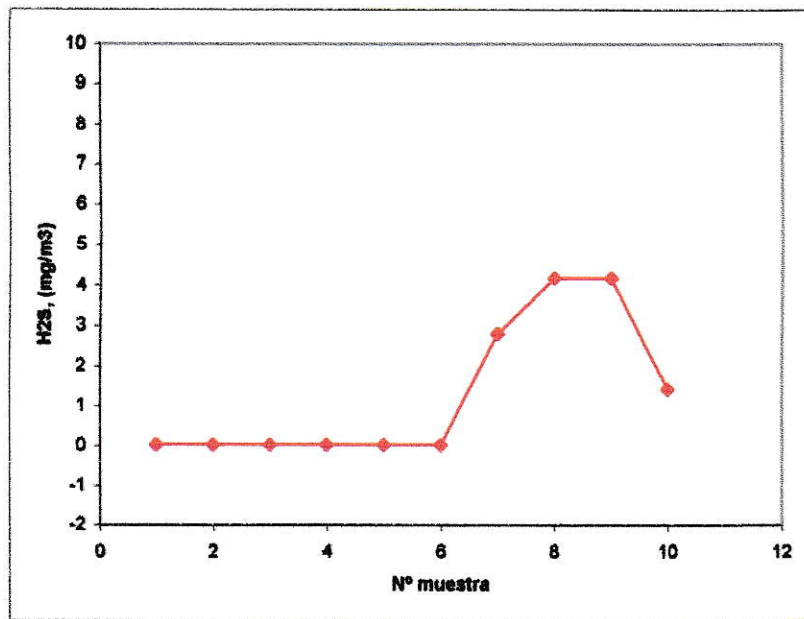


Figura 9: Concentración H₂S, sector tanque almacenamiento NaHS.

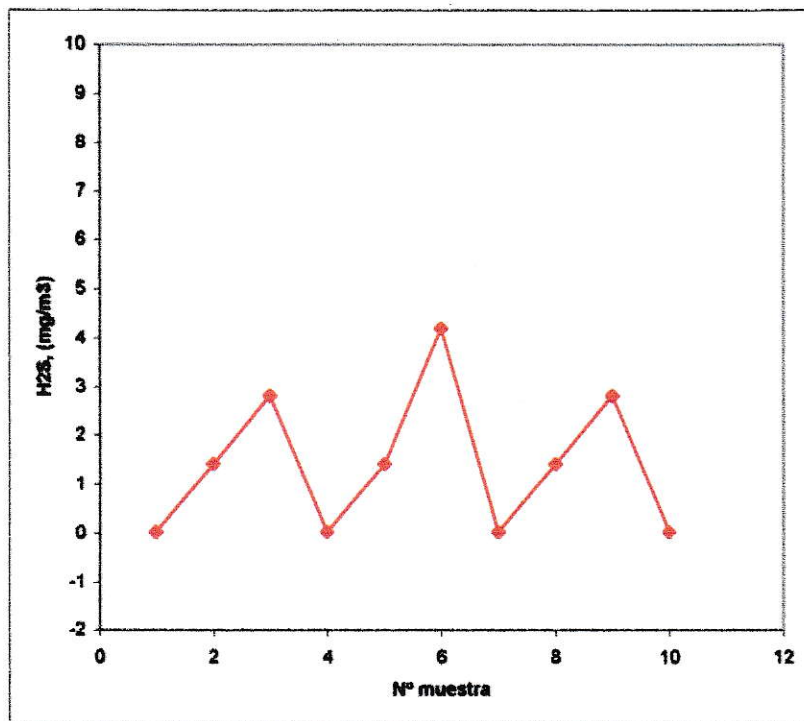


Figura 10: Concentración H₂S, sector flotación molibdeno.

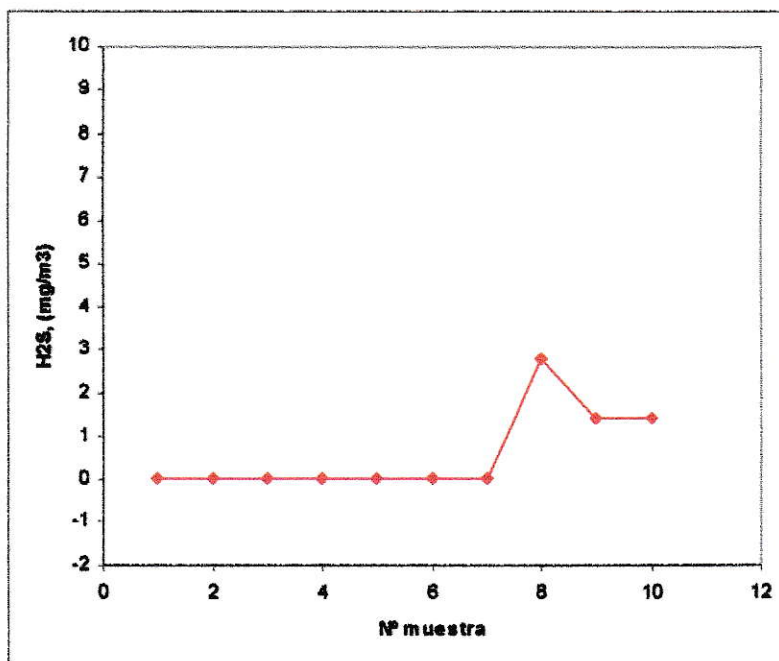


Figura 11: Concentración H₂S, sector oficinas generales.

En la Figura 9 se puede observar que en el sector de muestreo tanque almacenamiento NaHS es donde se registran las mayores concentraciones de H₂S, con una concentración máxima de 4,17 mg/m³, se observa también que a partir de las 13:00 hrs, es cuando se comienzan a registrar concentraciones de H₂S, esto se debe a que en ese horario es donde se efectúa en forma diaria la descarga del sulfhidrato de sodio, y producto de fugas desde el sistema de traspaso del camión al tanque de almacenamiento es donde se registran las emisiones de H₂S, ya que el NaHS, en presencia de aire se descompone para formar H₂S, en la ecuación 14 se muestra la descomposición del sulfhidrato de sodio.



En el sector flotación molibdeno se registran concentraciones variables de H₂S con un máximo de 4,17 mg/m³, esto se debe a que desde las celdas de flotación se producen pequeñas fugas de este gas. Debido a que en la SPPC, se encuentran concentraciones variables de ácido sulfhídrico, existe la posibilidad que se estén produciendo aerosoles de ácido sulfúrico, por lo tanto se recomienda realizar mediciones de estos con metodología NIOSH u OSHAS, con el propósito de evaluar si las concentraciones registradas sobrepasan los límites establecidos por la legislación Chilena.

4.6 Aspectos e impactos ambientales

El manejo de sustancias peligrosas en la SPPC, tiene asociado riesgos ambientales, que producto de un accidente o un evento inesperado puede causar considerables impactos a la cuenca del Río Aconcagua afectando a sus comunidades de plantas, animales y asentamientos humanos. A continuación se describe la metodología utilizada para identificar y evaluar los aspectos ambientales relacionados al uso y manipulación de sustancias peligrosas.

4.6.1 Identificación de aspectos ambientales

En la identificación de aspectos ambientales se incluyen todos los procesos y actividades de la SPPC, en los que se utilizan sustancias peligrosas, se consideran condiciones de operación normales y anormales, también aquellos aspectos potenciales derivados de situaciones de emergencia y accidentes como: emisiones y vertidos accidentales, derrames, incendios, etc. Los aspectos ambientales futuros también son

incluidos con el propósito de establecer las medidas mas adecuadas para su control. En la ejecución de esta actividad los aspectos a registrar e identificar son los siguientes:

1. Contaminación de suelos y napas freáticas.
2. Derrames de productos químicos y situaciones de emergencia.
3. Descargas de sustancias peligrosas a cauces y sistema de alcantarillado.
4. Emisiones a la atmósfera procedentes de fuentes fijas y móviles.

4.6.2 Evaluación de aspectos ambientales

Para la evaluación de los aspectos ambientales identificados se utilizan los criterios de consecuencia, riesgo de ocurrencia, extensión, reversibilidad, percepción pública y costo de mitigar mostrados en la Tabla 12, con los que se asigna un valor numérico a cada aspecto ambiental con el propósito de obtener su calificación ambiental y determinar el nivel de criticidad que posee.

Para identificar los aspectos e impactos ambientales se utiliza la siguiente matriz de evaluación y los criterios mencionados anteriormente.

Código: Nombre y Firma: Fecha:		Matriz de identificación de aspectos e impactos ambientales Manejo sustancias peligrosas SPPC							Hoja 1 de x	
									Fecha de Realización:	
Proceso	Elemento ambiental	Aspecto ambiental	Impacto Ambiental	Consecuencia	Riesgo de ocurrencia	Extensión	Reversibilidad	Percepción Pública	Costo de mitigar	Calificación ambiental

Tabla 12: Criterios utilizados para la evaluación ambiental

Parámetro	Descripción	Rango	Calificación
Consecuencia (C)	Vertidos y derrames accidentales de cualquier sustancia en los que el impacto al agua o al suelo son tales que requerirían uso de recursos técnicos, maquinaria, monitoreos extraordinarios u otro medio análogo para controlar y mitigar el impacto	Grave	4,0
	Vertido accidental de sustancias peligrosas en cantidad menor a 1 m ³ afectando a cauce público o en los que no es posible confinar el derrame	Serio	2,0
	En general cualquier incidente ambiental confinado al interior de la División y para el que se disponen de los medios necesarios para su adecuado tratamiento y que sobre la base de datos históricos no se han reportado impactos ambientales graves	Leve	1,0
Riesgo de Ocurrencia (Ro)	Mayor a 6 emergencias en un año	Cierto	4,0
	Entre 5 y 6 emergencias en un año	Muy probable	3,0
	Entre 3 y 4 emergencias en un año	Probable	2,0
	Menor o igual a 2 emergencias en un año	Poco probable	1,0
Extensión (E)	Define la magnitud del área afectada por el impacto, entendiéndose como la superficie relativa donde se resiente el impacto	Regional	1,0
		Local	0,7
		Puntual	0,5
Reversibilidad (Re)	Las condiciones originales son irrecuperables. El impacto ambiental es permanente	Irreversible	2,0
	Las condiciones originales pueden recuperarse únicamente con intervención humana	Parcialmente reversible	1,5
	Las condiciones originales pueden recuperarse sin intervención humana en un periodo menor a 30 días	Reversible	1,0
Percepción pública (Pu)	Evalúa la opinión que presenta la comunidad ante la ocurrencia de un impacto ambiental y como esta, afecta la imagen de la empresa.	Muy negativa	4,0
		Negativa	2,0
		Sin opinión	1,0
Costo de mitigar (Co)	Evalúa los recursos destinados a mitigar un impacto ambiental	Altos	1,0
		Medios	0,7
		Bajos	0,5

Para obtener la calificación ambiental, (CA), se utiliza la siguiente ecuación.

$$CA = C * Ro * E * Re * Pu * Co \quad (15)$$

Donde: C, Ro, E, Re, Pu y Co, se encuentran definidos en la Tabla 12.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se obtiene un nivel de criticidad para cada aspecto ambiental.

Tabla 13: Nivel de criticidad de aspectos ambientales.

Nivel de Criticidad	Rango (CA)
Alto	64 - 128
Medio	32 - 64
Bajo	0 - 32

4.6.3 Aspectos ambientales significativos

Como se puede observar en la Tabla 13, aquellos aspectos ambientales que sean evaluados con una calificación ambiental mayor a 64 presentaran un nivel de criticidad alto. Por lo tanto, para mejorar el desempeño ambiental de la empresa se proponen medidas de control para aquellos aspectos que presenten este nivel de criticidad. En la Tabla 14 se presenta un listado de los aspectos ambientales evaluados.

Tabla 14: Aspectos ambientales evaluados.

PROCESO	ELEMENTO AMBIENTAL	ASPECTO AMBIENTAL	IMPACTO AMBIENTAL PREVISTO	Consecuencia	Riesgo de ocurrencia	Extensión	Reversibilidad	Percepción Pública	Costo de mitigar	Calificación Ambiental
Flotación Molibdeno	Suelo	Derrame de productos químicos ácido sulfúrico	Deterioro calidad del suelo, contaminación napas freáticas	1	1	0,7	2	2	1	3,0
Lixiviación y Recuperación	Suelo	Derrame de productos químicos cloruro ferroso	Deterioro calidad del suelo, contaminación napas freáticas	1	1	0,7	2	1	1	1,5
Lixiviación y Recuperación	Suelo	Derrame de productos químicos cloruro férrico	Deterioro calidad del suelo, contaminación napas freáticas	1	1	0,7	2	1	1	1,5
Tratamiento de efluentes	Suelo	Derrame de productos químicos hidróxido de sodio	Deterioro calidad del suelo, contaminación napas freáticas	1	1	0,7	2	2	1	3,0
Tratamiento de efluentes	Suelo	Derrame de productos químicos (peróxido de hidrógeno)	Deterioro calidad del suelo, contaminación napas freáticas	1	1	0,7	2	1	1	1,5
Flotación Molibdeno	Suelo	Derrame de productos químicos, (Sulfhidrato de sodio)	Deterioro calidad del suelo, contaminación napas freáticas	1	1	0,7	2	2	1	3,0

Filtrado convencional	Suelo	Derrame de petróleo	Deterioro calidad del suelo, contaminación napas freáticas	1	1	0,7	2	2	1	3,0
Lixiviación y Recuperación	Aire/Población	Fuga de gas cloro	Contaminación atmosférica	4	1	0,7	2	4	1	22
Lixiviación y Recuperación	Agua	Vertido de RILES de proceso fuera de norma/cloruro ferroso	Contaminación aguas Rio Blanco	4	4	1,0	1,5	4	1	96
Filtrado convencional	Aire/Población	Emisión de gases producto de proceso	Producción de aerosoles de ácido sulfúrico	2	4	0,5	2	1	1	8,0
Flotación Molibdeno	Aire/Población	Emisión de gases producto de proceso	Emisión de H ₂ S	1	1	0,7	2	2	1	3,0

Continuación Tabla 14

Como se puede observar en la Tabla 14, el aspecto ambiental, vertido de riles con cloruro ferroso/fuera de norma, presenta una calificación ambiental de 96 lo que corresponde a un nivel de criticidad alto, por lo tanto es el aspecto que se abordara en el capitulo 5 y 6 de este trabajo con el propósito de diseñar un sistema de tratamiento que minimice el riesgo ambiental asociado.

4.7 Competencia, capacitación y sensibilización

Para lograr un buen manejo de las sustancias peligrosas, es indispensable que cada persona que trabaja o tiene contacto con ellas se encuentre capacitada en cuanto a su clasificación, riesgos asociados, formas correctas de uso, control de derrames, etc. así como también los diferentes aspectos ambientales asociados a su manejo. La capacitación garantiza una buena comprensión por parte de los empleados acerca de las medidas de seguridad que deben tomar al realizar su trabajo, también sensibiliza acerca de las consecuencias ambientales que puede ocasionar un manejo inadecuado de las sustancias peligrosas. En este trabajo se capacitó al personal de mantención de la SPPC, con respecto al manejo de sustancias peligrosas, riesgos de accidentes y ambientales.

V CONTROL DERRAMES DE LICOR RICO

El Licor rico proveniente del proceso de lixiviación y recuperación es transportado por cañerías de HDP al proceso de cementación de cobre, ahí es recibido en piscinas de 6 m³ de capacidad desde donde es enviado al cementador de cobre. Este licor posee un pH ácido y una cantidad variable de sólidos, los que se van depositando en las singularidades de las cañerías produciendo su obstrucción, la que posteriormente produce su rotura. Cabe señalar, que los derrames de Licor rico, es un aspecto poco frecuente en la SPPC, sin embargo, el riesgo ambiental que presenta este aspecto es alto. A continuación en la Figura 12 se presenta un diagrama del sector en que habitualmente ocurren los derrames.

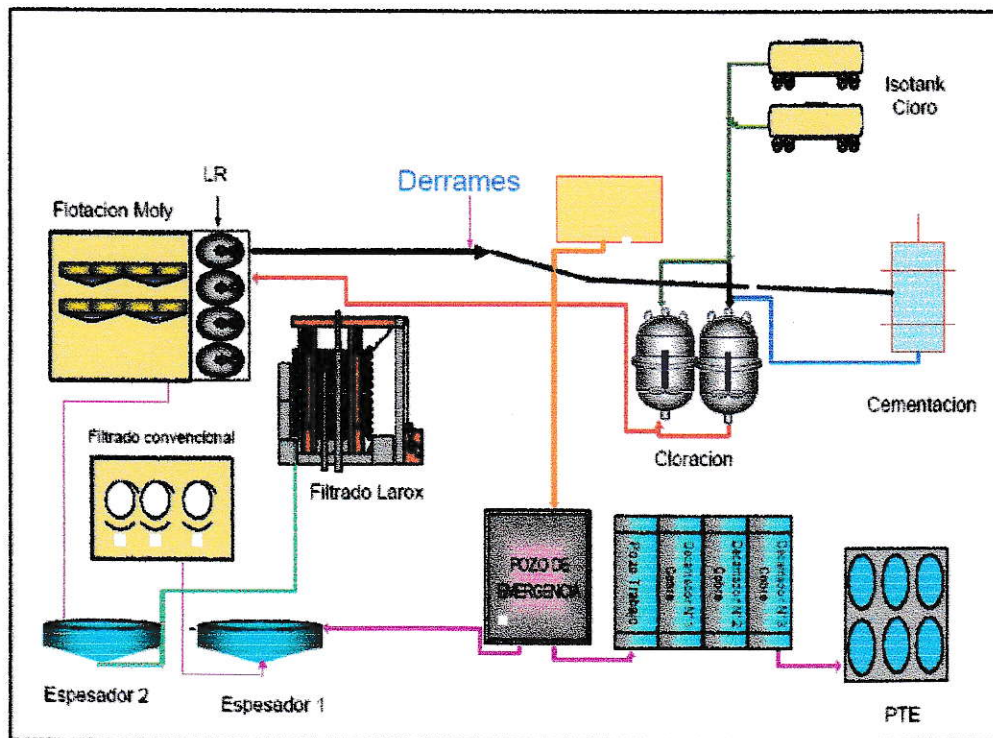
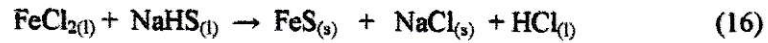


Figura 12: Diagrama derrames Licor rico

Cuando se produce un derrame, la solución es transportada por un drenaje a una sentina, de ahí la solución es bombeada al pozo de emergencia en donde el cloruro ferroso reacciona con el sulfhidrato de sodio residual produciendo un precipitado cristalino negro coloidal de Pirrotita, (FeS), de acuerdo a la siguiente ecuación.



El precipitado de pirrotita formado produce una coloración negra de las aguas, estos coloides no pueden ser sedimentados por los floculantes y coagulantes utilizados en la SPPC, ni tampoco pueden ser retenidos por los filtros de arena de la planta de tratamiento de efluentes, ya que poseen un diámetro menor a 50 μm , lo que los hace muy difícil de filtrar. En la Figura 13 se muestra una micrografía electrónica del precipitado de pirrotita formado.

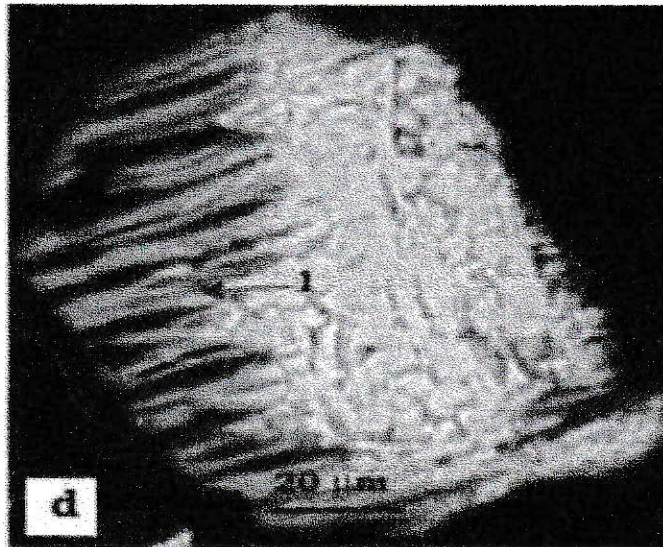


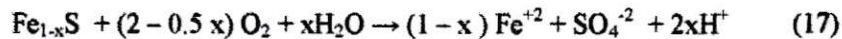
Figura 13: Cristal de pirrotita formado a pH ácido. Fuente: Codelco Chile.

En la eventualidad que el precipitado de pirrotita alcance el Rio Blanco este se oxidaría para producir $\text{Fe}(\text{OH})_3$ sólido, el que otorga a medida que se produce una coloración café-rojiza a las aguas, lo que se puede traducir en problemas con las comunidades vecinas al Rio Blanco y las autoridades de la región.

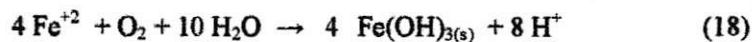
A continuación se describe el mecanismo de oxidación de la pirrotita por el oxígeno disuelto en las aguas del Rio blanco.

5.1 Mecanismo de oxidación del hierro en el Rio Blanco

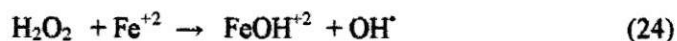
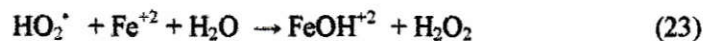
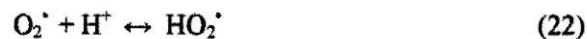
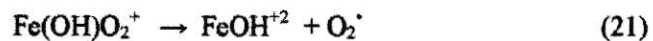
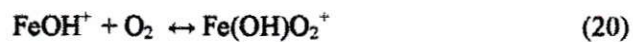
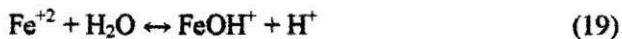
La pirrotita en contacto con el agua y oxígeno del rio, se oxida de acuerdo a la siguiente ecuación.



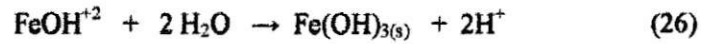
Posteriormente el Fe^{++} continúa su oxidación hasta producir $\text{Fe}(\text{OH})_{3(s)}$. De acuerdo a la ecuación anterior, la rapidez de la oxidación del hierro por el oxígeno depende de varios factores, en especial: temperatura, pH, contenidos de hierro y de oxígeno disuelto¹¹. La ecuación anterior puede escribirse como:



El mecanismo de formación del $\text{Fe}(\text{OH})_{3(s)}$ se muestra a continuación:



Luego la hidrólisis del FeOH^{+2} genera $\text{Fe(OH)}_{3(s)}$, el que es un precipitado rojizo, el que produce la coloración rojiza- oscura de las aguas¹¹.



5.2 Diseño del sistema de tratamiento

Para determinar cual es el mejor sistema de eliminación de hierro se hace un breve análisis de las técnicas comúnmente usadas en la industria. Los procesos unitarios para eliminar el hierro en solución son los siguientes: Intercambio iónico, Oxidación/filtración, y precipitación.

5.2.1 Intercambio iónico

Este proceso es efectivo para eliminar pequeñas cantidades de hierro. El límite de efectividad de este proceso es de 5 a 7 mg/L. El intercambio de iones involucra el uso de resinas sintéticas las que generalmente corresponden a polielectrolitos, donde un ión pre-saturador en la fase sólida, (sodio, potasio), es intercambiado por los iones no deseados en el agua. Una de las dificultades mayores en utilizar este sistema para abatir hierro, es que, cuando la concentración de hierro esta sobre 6 mg/L, este método no es recomendable, pues se produce una saturación muy rápida del medio intercambiador de iones, en el Licor rico, las concentraciones de hierro son del orden de 100.000 mg/L, es por ello que este método no se puede aplicar.

5.2.2 Oxidación / Filtración

El proceso de oxidación seguido de filtración es relativamente simple, se produce la oxidación del hierro formando un complejo insoluble, el que posteriormente precipita, y puede ser filtrado. Los oxidantes habitualmente utilizados en este proceso son cloro, ozono y aire. El inconveniente de este método es que requiere la generación de ozono, para lo cual se necesitan instrumentos especiales los que encarecen el sistema de tratamiento, por otro lado la adición de cloro, puede generar especies organocloradas, que pueden causar un problema posterior a los sistemas de tratamiento, por ultimo la aireación requiere la instalación de bombas aireadoras sumergibles las que poseen un elevado costo.

5.2.3 Precipitación.

Este método consiste en agregar a la solución a tratar hidróxido de sodio, óxido de calcio o bicarbonato de sodio, con el propósito de formar un hidróxido de hierro el que precipita y puede ser eliminado por sedimentación. La ventaja de este método radica en que es simple de implementar, es económico y puede ser automatizado. En la Figura 14 se muestra un diagrama de solubilidad del hierro a distintos valores de pH y potencial de oxidorreducción.

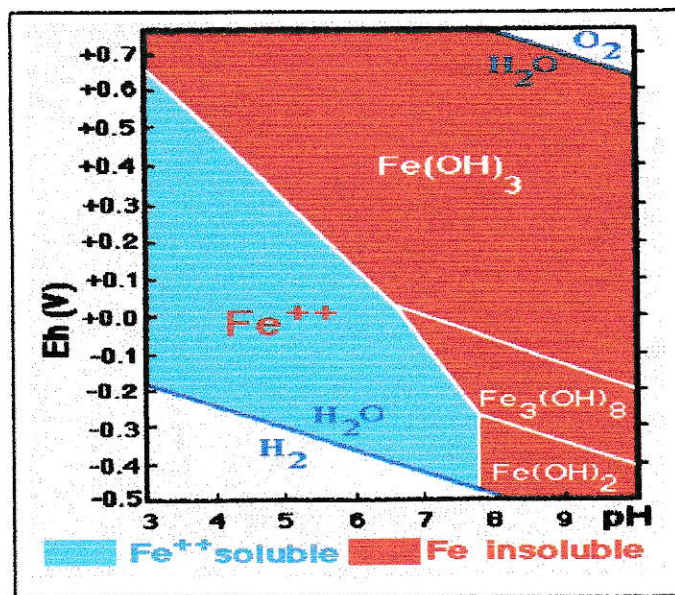


Figura 14: Diagrama solubilidad del hierro. Fuente: www.uclm.es/users/higueras

Las especies de hierro pueden pasar de una especie disuelta como FeOH^+ , que encontramos a pH ácidos, a una especie precipitada como $\text{Fe(OH)}_{3(s)}$ que se encuentra a valores de pH superiores a 6 y valor de potencial de 0,1 V, sin embargo, a pH muy alcalino el $\text{Fe(OH)}_{3(s)}$ puede volver a solubilizarse debido a la formación del Fe(OH)_4^- como complejo, debido a esto, es necesario realizar pruebas para determinar el pH óptimo de precipitación y evitar un sobreconsumo del material precipitante y la formación de Fe(OH)_4^- . También es necesario determinar si el sistema de tratamiento requerirá del empleo de coagulantes que ayuden a sedimentar el precipitado de hierro formado, ya que este se encuentra en estado coloidal y su sedimentación por gravedad no ocurre en un periodo de tiempo breve.

Considerando estos antecedentes, para el control de los derrames de Licor rico en la SPPC, se escogió como medio de tratamiento la precipitación química, principalmente

por que este sistema como se menciono anteriormente puede ser automatizado y controlado fácilmente instalando un sensor de pH y acoplándolo a un controlador electrónico. Además los materiales usados para precipitar son de menor costo que el ozono y las resinas de intercambio iónico. Se escogió NaOH al 20 %, como material precipitante debido a la disponibilidad de este reactivo en la SPPC.

En la eventualidad que se produzca un derrame de Licor rico y después que este haya sido precipitado, será bombeado mediante una bomba centrifuga al pozo de emergencia de la SPPC, (ver Figura 12), después junto con los demás sólidos el precipitado será conducido al espesador 1, donde mediante la adición del coagulante “Ferralyte”, ($\text{Fe}_3(\text{SO}_4)$), será sedimentado.

5.3 Precipitación Licor Rico

Para realizar las pruebas de precipitación de hierro se tomaron muestras del Licor rico que entra al proceso de cementación, de acuerdo al procedimiento establecido en la Figura 15.

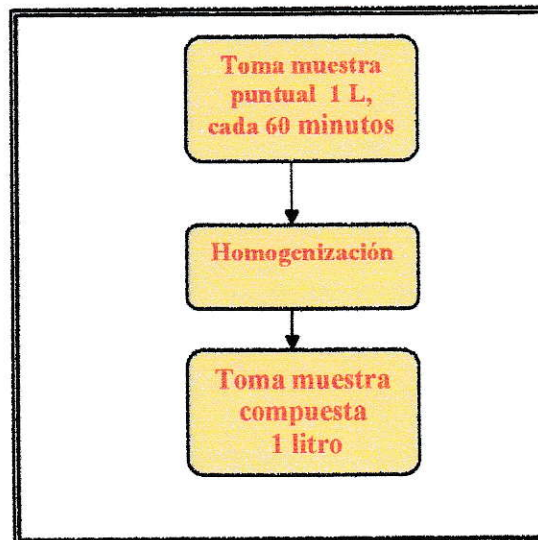


Figura 15: Procedimiento toma de muestra Licor rico

En el Anexo 5 se muestran los equipos utilizados para determinar el contenido de hierro en las muestras.

Se evaluó el efecto del volumen de hidróxido de sodio adicionado al Licor rico, sobre el valor del pH, para determinar el volumen en el que se alcanzan pH básicos en los que se pueda obtener la precipitación del hierro.

A 150 mL de Licor rico se agregó distintos volúmenes de hidróxido de sodio al 20 %, para determinar el pH alcanzado, en la Figura 16 se muestran los resultados obtenidos.

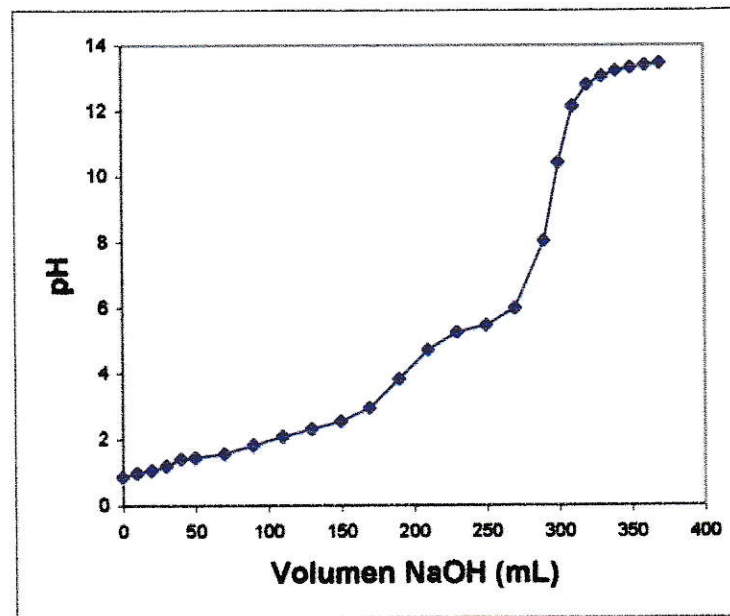


Figura 16: Curva de precipitación de Licor rico con hidróxido de sodio

En la Figura 16 se observa que para alcanzar un valor de pH neutro de la solución, se necesitan cerca de 300 mL de hidróxido de sodio, lo que equivale al doble del volumen de la solución original tratada. En la Tabla 15, se muestran las concentraciones de hierro y cobre en solución a distintos valores de pH, después que el Licor rico ha sido tratado con hidróxido de sodio.

Tabla 15: Concentración de hierro a distintos valores de pH.

pH	Fe (g/L)
0,90	128,0
3,02	32,00
4,80	15,00
7,40	0,029
8,30	0,005
10,1	0,002
11,1	0,004
12,6	0,010
13,2	0,030

En la Tabla 15 se puede observar que a $\text{pH} = 10,1$ se alcanza la menor concentración de hierro en solución, sin embargo a partir de $\text{pH} = 11,1$ la concentración de hierro se incrementa, esto se debe a que a partir de ese pH el precipitado de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ se comienza a redissolver produciendo $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$. En la Figura 17 se muestra la curva de precipitación de hierro.

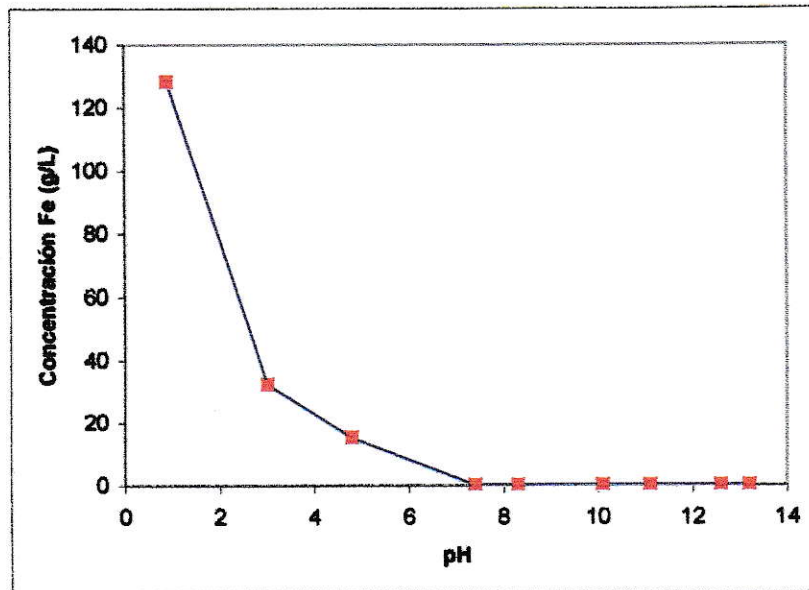


Figura 17: Curva de precipitación de hierro

En la Figura 17 se puede observar que a valores de pH mayores a 7, no se encuentra hierro en solución. En la Figura 18 se muestra el porcentaje de remoción de hierro a distintos valores de pH, este se calculó de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$\% \text{Remoción}(Fe) = \frac{(C_i - C_f) * 100}{C_i} \quad (27)$$

Donde:

C_i : es la concentración de hierro inicial

C_f : es la concentración de hierro final

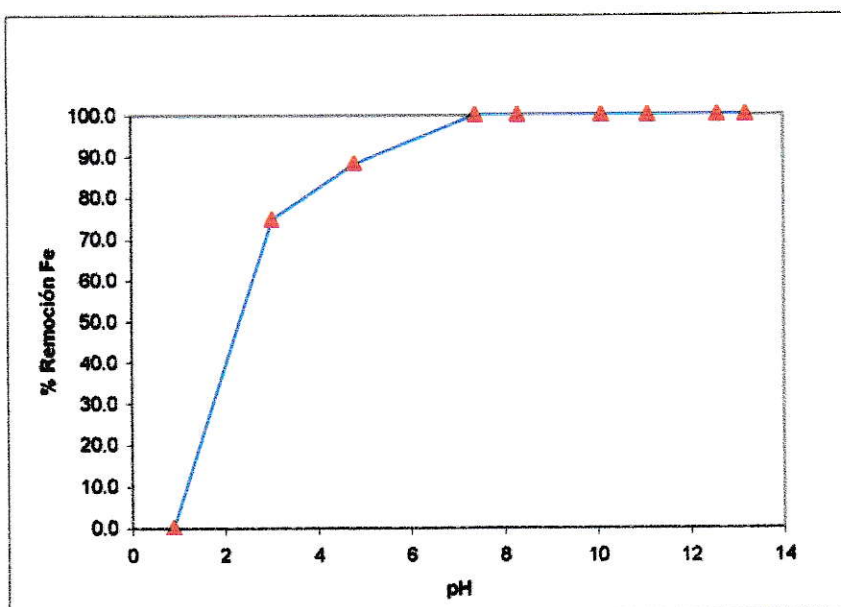


Figura 18: Porcentaje de remoción de hierro en función del pH.

En la Figura 18 se puede observar que a partir de pH = 7,3 se consigue una remoción del 100 % del hierro presente en el Licor rico, es por ello que el valor del “Set- point” para el sistema de control se establecerá por sobre este valor de pH.

5.4 Diagrama sistema de tratamiento

En la Figura 19 se muestra el diagrama del sistema de control automático diseñado para controlar los derrames del Licor rico. El sistema esta constituido por un sensor de pH conectado a un analizador interpretador transmisor, (AIT), el que transfiere la información a un controlador lógico programable⁹, (PLC), el que envía la señal al actuador final que corresponde a una electro-válvula de tipo “pinch⁹”, la que tiene la función de regular el suministro de hidróxido de sodio a la sentina con el propósito de modificar el valor de pH.

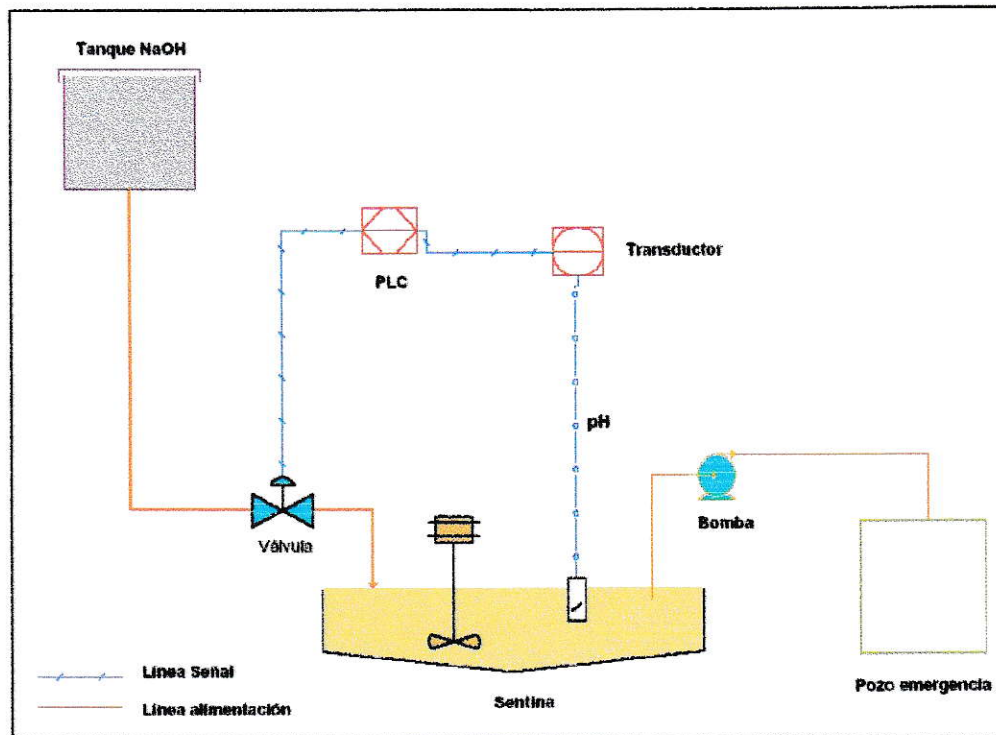


Figura 19: Diagrama sistema de control.

El valor de “Set-point”, fue establecido a $\text{pH} = 9$, pues de acuerdo a los resultados mostrados en la Figura 18, a este valor de pH se consigue la precipitación del 100 % del hierro presente en el Licor rico, por tanto se evita la producción del precipitado de pirrotita y no se afecta el pH del pozo de emergencia que es el lugar donde se descargará la solución tratada.

De acuerdo a los resultados mostrados en la Figura 16, para precipitar 150 mL de Licor rico y alcanzar un valor de $\text{pH} = 7,4$ en el que la concentración de hierro es de 0,029 g/L se necesitan 300 mL de hidróxido de sodio lo que equivale al doble del volumen original de Licor rico, esto se debe a que el NaOH además de precipitar el hierro presente para formar $\text{Fe}(\text{OH})_{3(s)}$, también neutraliza la acidez y precipita el cobre en forma de $\text{Cu}(\text{OH})_{2(s)}$ del Licor rico.

VI MANEJO RILES FUERA DE NORMA

La SPPC sometió a declaración de impacto ambiental, (DIA), el proyecto “Mejoramiento del Proceso de Tratamiento de Efluentes Planta Área Superficie Codelco Andina”, y fue aprobada por la Comisión Regional del Medio Ambiente, (COREMA), de la V Región a través de la Resolución de Calificación Ambiental, (RCA), N° 028 del 4 febrero del 2002, y modificada por la RCA N° 172 del 29 de diciembre del 2003. El proyecto consiste en la modificación de la planta de tratamiento de efluentes que actualmente se encuentra operativa, para aumentar su capacidad de tratamiento de efluentes a 600 m³/h y el mejoramiento de algunas operaciones, con el propósito de mejorar la calidad del efluente que es descargado al Río Blanco. En la Figura 20 se muestra la PTE ampliada.

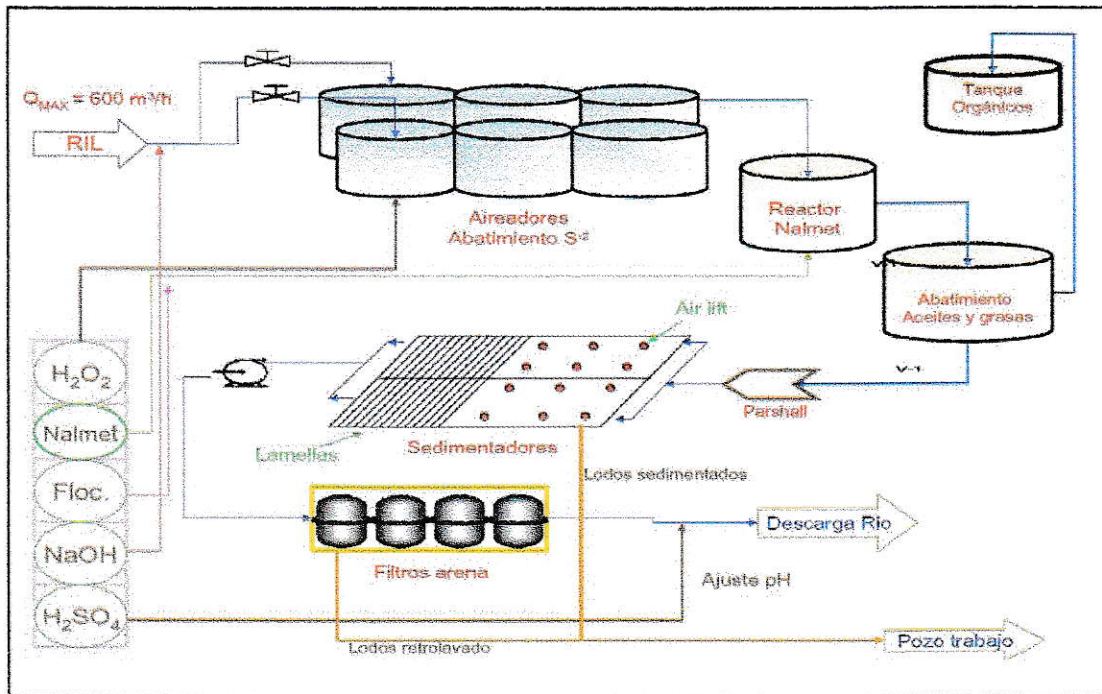


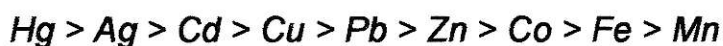
Figura 20: Planta tratamiento de efluentes ampliada.

Con la ampliación, la PTE de la SPPC, tendrá la capacidad de tratar los siguientes parámetros.

Tabla 16: Capacidad de tratamiento PTE modificada.

Parámetro	Cantidad	
	m ³ /h	mg/L
Aceites y grasas		100
Caudal	600	
Cobre total		7
Sulfuros		35
TDS		1.000

Para controlar el cobre en el efluente, se escogió como medio de tratamiento la precipitación de este metal mediante el uso del reactivo precipitador de metales Nalmet[®], producto patentado y suministrado por la empresa Nalco. Este reactivo es un polielectrolito aniónico el que posee un doble efecto, ya que además de captar el metal en solución, también posee un efecto coagulante. La afinidad de Nalmet[®], por los metales en solución es la siguiente.



Una vez que se consigue la captación del metal de interés y la formación del coagulo, es necesario utilizar un floculante con el propósito de aumentar el tamaño de los agregados y facilitar su sedimentación por gravedad. En la Figura 21 se muestra un ejemplo de formación de floculos mediante la adición de un floculante.

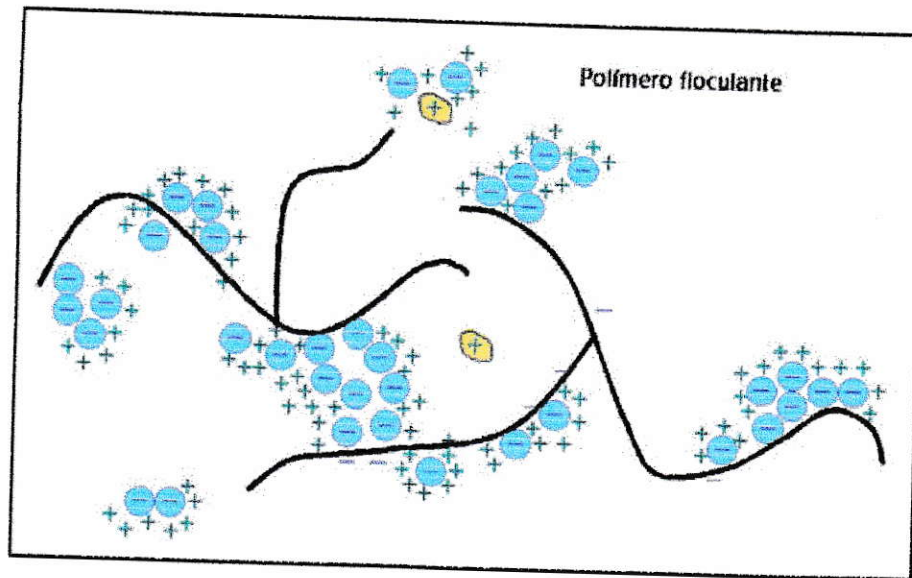


Figura 21: Formación de flóculos mediante adición de floculante. Fuente: www.puc.cl/química/aguas.

Antes del empleo de Nalmet[®], es necesario realizar pruebas con el RIL a tratar de modo tal de establecer bajo que parámetros se produce la mejor remoción de las especies de interés.

Las variables más importantes que deben ser estudiadas son:

- Determinar la dosificación óptima de Nalmet[®]
- Determinar el pH óptimo de trabajo
- Optimizar la energía y tiempos de mezclado
- Determinar efectos de dilución Nalmet[®]
- Optimizar el reciclaje de lodos

En este trabajo se efectuaron pruebas para optimizar estas variables, con el propósito de lograr un buen control del cobre en el RIL de la SPPC, mediante el empleo de la dosis mas adecuada de reactivo precipitante.

6.1 Pruebas precipitación de cobre

Para efectuar estas pruebas se utilizó el “Test de jarras”, este es usado comúnmente para determinar la dosis mas efectiva de un reactivo para un RIL específico en un determinado proceso de tratamiento¹, especialmente cuando la calidad del efluente fluctúa rápidamente. Se puede utilizar también con objeto de determinar las velocidades de sedimentación para el diseño de tanques de sedimentación y determinar el tiempo de residencia óptimo de un efluente. En la Figura 22 se muestra el equipo utilizado para realizar las pruebas.

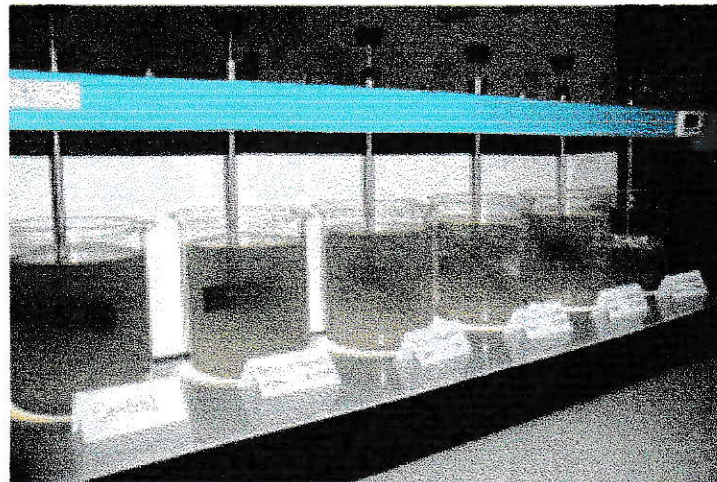


Figura 22: Equipo de jarras utilizado

A continuación en la Figura 23 se muestra la metodología utilizada para realizar las pruebas de precipitación de cobre con Nalmet®

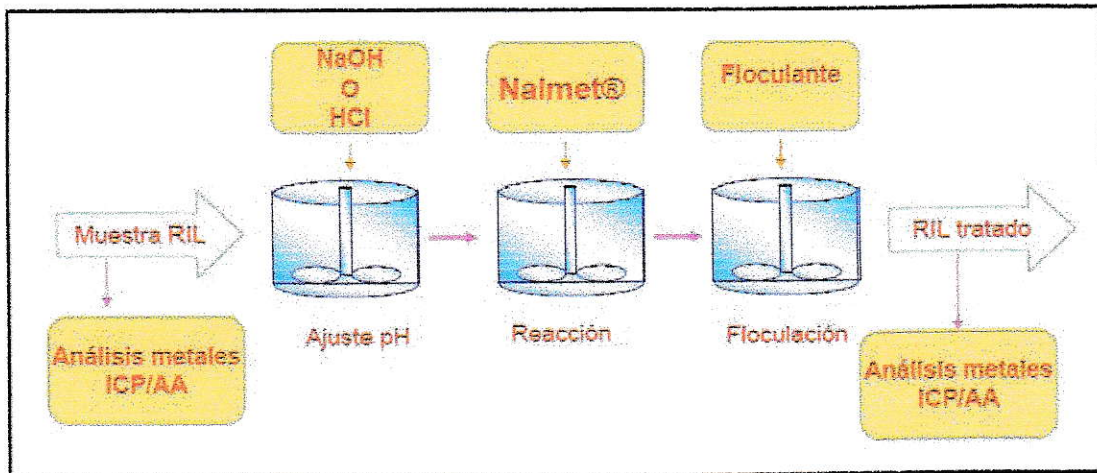


Figura 23: Metodología utilizada para pruebas de precipitación

Las pruebas se realizaron con Nalmet® al 1 %, y se estudió el efecto de tres polielectrolitos floculantes el Nalco 83400, Nalco 71325 y el Nalco 625.

Los resultados obtenidos al realizar el test de jarras fueron los siguientes:

1. El pH óptimo, de trabajo para precipitar el cobre en el efluente de la SPPC, resultó encontrarse en el rango entre 8,0 – 8,5.

A continuación se muestran las pruebas realizadas para determinar la dosis y el tipo de floculante que presenta los mejores resultados en la remoción de cobre en el efluente.

Tabla 17: Pruebas de selección de floculante

Prueba	Floculante	Dosis floculante (mg/L)	Dosis Nalmet® (mg/L)	Cu inicial (mg/L)	Cu final (mg/L)
1	83400	0,4	60	6,25	1,52
2	71325	0,4	60	6,25	2,80
3	625	0,4	60	6,25	1,64
4	83400	0,6	60	6,25	0,41
5	71325	0,6	60	6,25	0,70
6	625	0,6	60	6,25	0,64

En la Tabla 17 se puede observar que la prueba 4 en la que se usa 0,6 mg/L de floculante Nalco 83400 fue la que presentó los mejores resultados, logrando un concentración de cobre de solo 0,4 mg/L en el efluente, es por ello que este floculante es seleccionado para el tratamiento del efluente de la planta. A continuación se presentan los resultados obtenidos para determinar la dosis óptima de Nalmet®. En estas pruebas realizadas, se varió la dosis de Nalmet® y la dosis de floculante Nalco 83400, para determinar el punto óptimo en el que se logran los mejores resultados.

Tabla 18: Pruebas determinación dosis de Nalmet®.

Prueba	Floculante	Dosis floculante (mg/L)	Dosis Nalmet® (mg/L)	Cu _{inicial} (mg/L)	Cu _{final} (mg/L)
7	83400	0,4	30	6,25	1,25
8	83400	0,4	60	6,25	0,81
9	83400	0,4	90	6,25	0,49
10	83400	0,6	30	6,25	1,34
11	83400	0,6	60	6,25	0,42
12	83400	0,6	90	6,25	0,20

En la Tabla 18 se puede observar que la prueba 12, en la que se utiliza 90 mg/L de Nalmet® presenta una concentración de cobre final de solo 0,2 mg/L, sin embargo esta solución presenta una intensa coloración roja, lo que indica un exceso de Nalmet®, por lo tanto no es viable, pues al tratar el efluente habría que eliminar la coloración de las aguas lo que encarece el tratamiento. Considerando que la norma establecida en el DS-90, para cobre en efluentes industriales es de 1 mg/L y de acuerdo a los resultados obtenidos anteriormente con los parámetros de la prueba 11 se logran concentraciones de cobre bajo la norma. En resumen las dosis óptimas de trabajo son las siguientes:

- La dosis de Nalmet® óptima resulto ser de 60 mg/L
- El floculante Nalco 83400 presento los mejores resultados
- la dosis óptima de floculante Nalco 83400 resulto ser de 0,6 mg/L

Cabe señalar que las pruebas se realizaron con concentraciones de cobre iniciales de 6,25 mg/L, esto se efectuó para estudiar el comportamiento del sistema de tratamiento del efluente simulando las peores condiciones de calidad de este, sin embargo las concentraciones medias de cobre en el efluente de la SPPC, antes de entrar al proceso de tratamiento de aguas son de alrededor de 1,3 mg/L, por lo que, también se efectuaron pruebas para evaluar el comportamiento del sistema frente a estas concentraciones, a continuación en la Tabla 19 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 19: Pruebas de precipitación de cobre efluente SPPC.

Prueba	Floculante	Dosis floculante (mg/L)	Dosis Nalmet[®] (mg/L)	Cu_{inicial} (mg/L)	Cu_{final} (mg/L)
13	83400	0,6	11	1,1	0,10
14	83400	0,8	11	1,1	0,07
15	83400	1,0	11	1,1	0,10

En la Tabla 19 se puede observar que en todas las pruebas se consiguieron concentraciones de cobre bajo la norma. Comparando estos resultados con los obtenidos en las pruebas 4 y 11, se puede apreciar que para precipitar 1 mg/L de cobre y alcanzar niveles de concentración bajo los establecidos en el DS-90, en el efluente de la SPPC, se necesitan 11 mg/L de Nalmet[®] y 0,6 mg/L de floculante Nalco 83400.

Debido a que el efluente de la SPPC presenta importantes variaciones de caudal y concentración de cobre a través del día, la dosificación de Nalmet será calculada de acuerdo a la siguiente ecuación. La que incluye el valor de la concentración de cobre del efluente y su caudal, además de la dosis necesaria de Nalmet para precipitar 1 mg/L de cobre.

$$Nalmet (mL / min) = \frac{(C_{Cu} * 11 * Q)}{60} \quad (28)$$

Donde:

C_{Cu} = Concentración de cobre en mg/L medida cada 1 hora

Q = Caudal promedio del efluente en m³/h medido cada 1 hora.

De esta forma se obtiene un mejor control de las operaciones y se evita un sobreconsumo de Nalmet® lo que incrementaría los costos de tratamiento, también se controla un repentino incremento en la concentración de cobre en el efluente. A continuación en la Figura 24 se muestra el diagrama del sistema de dosificación de Nalmet.

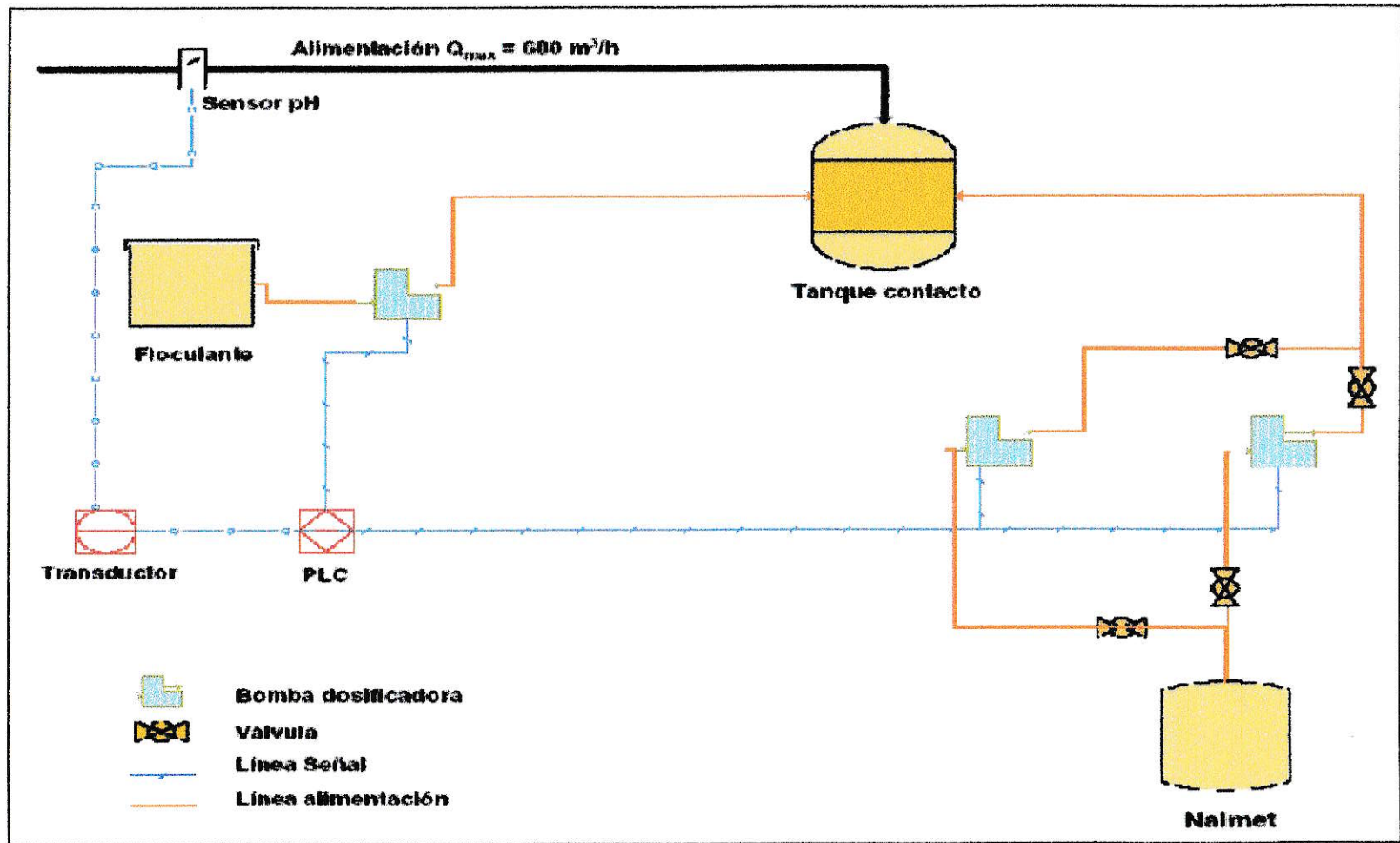


Figura 24: Diagrama sistema de dosificación de Nalmet.

A continuación se presenta el análisis químico del efluente de la SPPC descargado al Río Blanco. La toma de muestras y el análisis fue realizado por la empresa SGS, de acuerdo a los procedimientos establecidos en el DS-90.

Tabla 20: Análisis químico efluente SPPC, mes de noviembre

Parámetro	Concentración (mg/L)	Limite DS-90⁵ (mg/L)
Aceites y grasas	<10,00	20,00
Aluminio total	0,110	5,000
Arsénico total	0,020	0,500
Boro	0,040	0,750
Cadmio total	<0,010	0,010
Cobre total	0,880	1,000
Cromo hexavalente	<0,050	0,050
Hierro disuelto	0,560	5,000
Índice de fenol	0,300	0,500
Manganeso total	0,030	0,300
Mercurio total	<0,001	0,001
Molibdeno total	0,360	1,000
Níquel total	<0,050	0,200
Plomo total	<0,050	0,050
Selenio total	<0,001	0,010
Sólidos suspendidos totales	24,00	80,00
Sulfatos	345,0	1.000
Sulfuros	<0,200	1,000
Tetracloroetano	<0,010	0,040
Tolueno	<0,200	0,700
Triclorometano	<0,010	0,200
Xileno	<0,200	0,500
Zinc total	0,060	3,000

Tabla 21: Análisis químico efluente SPPC, mes de diciembre.

Parámetro	Concentración (mg/L)	Limite DS-90⁵ (mg/L)
Aceites y grasas	<10,00	20,00
Aluminio total	<0,500	5,000
Arsénico total	0,014	0,500
Boro	<0,500	0,750
Cadmio total	<0,010	0,010
Cobre total	0,9200	1,000
Cromo hexavalente	<0,050	0,050
Hierro disuelto	0,1200	5,000
Índice de fenol	<0,010	0,500
Manganeso total	0,1400	0,300
Mercurio total	<0,001	0,001
Molibdeno total	0,3200	1,000
Níquel	<0,050	0,200
Plomo total	<0,050	0,050
Selenio total	<0,001	0,010
Sólidos suspendidos totales	16,00	80,00
Sulfatos	95,00	1.000
Sulfuros	<0,200	1,000
Tetracloroetano	<0,010	0,040
Tolueno	<0,200	0,700
Triclorometano	<0,010	0,200
Xileno	<0,200	0,500
Zinc total	0,030	3,000

Como se puede observar en la Tabla 20 y Tabla 21, todas las concentraciones de metales pesados como: cadmio, cobre, manganeso, molibdeno, mercurio, níquel, plomo, se encuentran bajo los niveles permitidos en el DS-90, lo que demuestra que el empleo de Nalmet[®], como precipitador de metales ha originado resultados positivos. La concentración de sulfuros también se encuentra bajo los niveles de 1 mg/L establecidos en el DS-90, lo que implica que el proceso de aireación instalado en la PTE, ha resultado ser eficiente, oxidando la mayor parte de los sulfuros a sulfatos.

VII DISCUSIÓN

Con el propósito de que la Superintendencia Plantas Productos Comerciales cumpla con los requisitos del reglamento interno de sustancias peligrosas de la División Andina, durante la ejecución de este estudio se elaboraron: fichas de control en terreno, listas de chequeo y otros documentos que ayudaron a mejorar y regularizar el control de las sustancias peligrosas en las plantas, también se capacitó al personal en relación a: uso, control de derrames, medidas de seguridad y riesgos ambientales que la utilización de sustancias peligrosas genera, sin embargo, recomendamos que estos documentos se revisen periódicamente con el objetivo de mejorar en forma continua su contenido y sus alcances, también es necesario que se realicen mas capacitaciones tanto teóricas como practicas a los trabajadores para que aumenten sus conocimientos y competencias, que los ayudaran a realizar un trabajo mas seguro.

En este estudio se caracterizó el mecanismo de formación de aerosoles de ácido sulfúrico a partir del ácido sulfhídrico, (H_2S), que se encuentra presente en pequeñas concentraciones en las plantas, producto de la descomposición del sulfhidrato de sodio, ($NaHS$). Estos aerosoles producen daños en las estructuras e instrumentos presentes en las plantas, también pueden ocasionar daños a la salud de los trabajadores, es por ello que recomendamos realizar mediciones de aerosoles de ácido sulfúrico y determinar si exceden los niveles establecidos en la legislación Chilena. También recomendamos mejorar el procedimiento de descarga del sulfhidrato de sodio desde el camión de transporte a los tanques de almacenamiento, puesto que, de acuerdo a las mediciones mostradas en la Figura 9, esta es la principal fuente de H_2S en la planta.

El sistema de control automático de derrames de Licor rico diseñado y propuesto en este estudio, resulto ser una buena alternativa para controlar un futuro incidente que puede ocasionar daños en la SPPC, sin embargo, al precipitar el hierro presente en el Licor rico con hidróxido de sodio se forman precipitados que se encuentran en estado coloidal, por lo que es necesario utilizar un coagulante para ayudar a sedimentarlos, lo que aumenta el costo del sistema de tratamiento, es por ello que recomendamos en un futuro trabajo estudiar y evaluar otra alternativa mas económica, como puede ser bombear estos derrames al sector de cementación de cobre con el propósito de recuperar el Licor rico y evitar la utilización de hidróxido de sodio y coagulante.

Para controlar el cobre en el efluente de la SPPC y dar cumplimiento al DS-90, en este estudio utilizamos el precipitador de metales Nalmet[®], escogimos este reactivo debido a los buenos resultados que otras empresas mineras han obtenido con él, también debido a su baja toxicidad para organismos acuáticos, buena disponibilidad en el mercado y poca producción de lodo que genera.

Los monitoreos realizados al efluente, (ver Tabla 20 y Tabla 21), nos indican que la concentración de cobre se encuentra bajo norma, por lo que el empleo de Nalmet[®] dió los resultados que se esperaban. Con el propósito de optimizar la dosificación de Nalmet[®] se automatizó el proceso de inyección al efluente, (ver Figura 24), y se estableció que de acuerdo a la Ecuación 28 el operador de la planta de efluentes determinará la cantidad de Nalmet[®] que debe dosificarse al efluente.

VIII CONCLUSIONES

Las sustancias peligrosas que son utilizadas en la SPPC, de la División Andina, cumplen con el reglamento interno de la División Andina y la legislación nacional que aplica a la manipulación de estas sustancias.

El aspecto vertido de riles de proceso fuera de norma y con Licor rico resultó tener una calificación ambiental de 96, lo que equivale a un aspecto crítico, es por ello que, con el objetivo de minimizar el riesgo ambiental que este aspecto presenta se diseñó un sistema para tratar en forma automática los derrames en la eventualidad que sucedan. El sistema de control consiste en precipitar el hierro presente en el Licor rico mediante la adición de hidróxido de sodio al 20 % hasta alcanzar un valor de $\text{pH} = 9$, el que corresponde al valor de "Set-point" del sistema. Se escogió este valor de pH , pues de acuerdo a los resultados obtenidos en las pruebas de precipitación a $\text{pH} = 9$, se consigue una remoción del 99 % del hierro presente en el Licor rico, con lo que se evita la producción del precipitado cristalino de pirrotita el que puede ser vertido al Río Blanco y contaminar sus aguas producto de la formación de hidróxido de hierro (III).

Para abatir el cobre en el efluente de la SPPC, fue seleccionado como medio de tratamiento el precipitador de metales Nalmet[®], se determinó que el pH óptimo de trabajo para precipitar el cobre está entre 8,0 y 8,5, en otros valores de pH la remoción de cobre no resultó ser efectiva. Se determinó que con una dosis de 11 mg/L de Nalmet[®] por cada 1 mg/L de cobre en el efluente, se consiguen concentraciones que se encuentran bajo la norma de 1 mg/L establecida en el DS-90, también se determinó que el floculante Nalco

83400 con una dosis de 0,6 mg/L presenta la mejor eficiencia en el proceso de remoción de los coágulos formados por la acción del Nalmet®.

La utilización de floculante Nalco 83400 en el proceso de tratamiento del RIL y debido también a las propiedades coagulantes del Nalmet® se redujeron los niveles de sólidos disueltos, aceites y grasas en el efluente de la SPPC, también el empleo Nalmet® contribuyó a que las concentraciones de otros metales pesados como molibdeno, níquel, selenio, manganeso, plomo, presentes en el efluente se encuentren en niveles de concentración bajo norma.

IX BIBLIOGRAFÍA

1. Biblioteca del sistema de gestión integral de la Gerencia de Sustentabilidad, División Andina, Codelco Chile.
2. [Http://www.codelcoeduca.cl/divisiones/andina/f_andina.html](http://www.codelcoeduca.cl/divisiones/andina/f_andina.html).
3. [Http://www.codelcoeduca.cl/tecnico_profesional/metalurgia_extractiva/f_metalurgia.html](http://www.codelcoeduca.cl/tecnico_profesional/metalurgia_extractiva/f_metalurgia.html).
4. [Http://www.paritarios.cl/especial_simbolo_peligro](http://www.paritarios.cl/especial_simbolo_peligro).
5. Ministerio secretaria general de la presidencia de la república. 2000. D.S N°90. Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales.
6. Norma Chilena Oficial. Nch-382. Sustancias peligrosas, clasificación general.
7. Norma Chilena Oficial. Nch-2245. Sustancias químicas, hojas de datos de seguridad.
8. Norma Chilena Oficial. Nch- 2190. Transporte de sustancias peligrosas - Distintivos para identificación de riesgos.
9. Perry. 1994. Manual del Ingeniero Químico. Mc. Graw-Hill. Cap 8: Pp 1- 84.
10. Seinfeld, J. H. 1986. Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution. Wiley Interscience. Pp 216 – 300.
11. Stumm & Morgan. 1970. Aquatic Chemistry. Wiley Interscience. Pp 534 – 538.
12. Whitby y col. 1972. The aerosol size of distribution of Los Angeles smog. Journal of Colloid and Interface Science. Rev 39: 177-204.

X ANEXOS

ANEXO 1

Características para la clasificación de sustancias peligrosas

Clasificación	Característica	Clasificación	Característica
E Explosivo	Sustancias químicas que reaccionan exotérmicamente y pueden explotar al calentarse.	T Tóxico	La inhalación y la ingestión o absorción cutánea en pequeña cantidad, pueden conducir a daños para la salud eventualmente con consecuencias mortales
O Comburente	Sustancias que, en contacto con otras, en especial con sustancias inflamables, producen reacción fuertemente exotérmica, (peróxidos orgánicos).	C Corrosivo	Sustancias químicas que provocan la destrucción del tejido cutáneo en todo su espesor.
F+ Extremadamente inflamable	Líquidos con un punto de inflamación inferior a 0°C y un punto de ebullición de máximo de 35°C. Gases y mezclas de gases, que a presión normal y a temperatura usual son inflamables en el aire.	X_i Irritante	Pueden producir inflamaciones en caso de contacto breve, prolongado o repetido con la piel o en mucosas.
F Fácilmente inflamable	Son altamente inflamables. y por acción breve de una fuente de inflamación pueden inflamarse fácilmente y luego pueden continuar quemándose ó permanecer incandescentes	N Peligro para el medio ambiente	En el caso de ser liberado en el medio acuático y no acuático puede producirse un daño del ecosistema por cambio del equilibrio natural.
T+ Muy Tóxico	La inhalación y la ingestión o absorción cutánea en pequeña cantidad, pueden conducir a daños de considerable magnitud para la salud.	X_N Nocivo	La inhalación, la ingestión o la absorción cutánea pueden provocar daños para la salud agudos o crónicos.

Fuente: Norma Nch-382

ANEXO 2

Lista de chequeo sustancias peligrosas



Lista de chequeo

Rombo seguridad



Sustancia peligrosa : _____
 Formula química : _____

ITEM	SI	NO	OBSERVACIONES
-Reglamento interno			
Se revisa diariamente el estado de la ducha y lavajos.			
Lugar de almacenamiento dispone de las hojas de seguridad.			
Descarga del producto se efectúa en horarios de cambio de turno.			
Piso del tanque de almacenamiento es impermeable.			
Existen listas de personas autorizadas a trabajar con la sustancia peligrosa y están registradas en formulario interno			
Las personas que manipulan el ácido cuentan con capacitación.			
Se encuentra el lavajos a una distancia menor a 10 metros del tanque de almacenamiento.			
Tanque almacenamiento se encuentra a una distancia mayor a 100 metros de tanque almacenamiento NaHS.			
La utilización del ácido esta autorizada por DAND.			
- Almacenamiento			
Hay fugas del ácido desde cañerías, codos, tanque almacenamiento.			
Sistema contención de derrames, bajo los estanques.			
Hay materiales para controlar un derrame.			
Lugar de almacenamiento cuenta con las hojas de seguridad.			
Lugar de almacenamiento cuenta con las fichas de seguridad.			
Cumple con lo establecido en la hoja de seguridad.			
- Transporte			
Transportista da aviso a la unidad de protección industrial			
Vehículo de transporte cuenta con sistema de radiofrecuencia.			
Realizado por:	Hora:		
Fecha:	Firma		

ANEXO 3

Ficha control terreno sustancias peligrosas

Ubicación		Derrame de sustancia peligrosa		Contaminación del suelo		Gabinete cuenta con HDS		Observaciones	Acción correctiva
		Si	No	Si	No	Si	No		
Tanque almacenamiento NaHS.									
Tanque almacenamiento ácido sulfúrico.									
Tanque almacenamiento hidróxido de sodio.									
Tanque almacenamiento ácido sulfúrico, planta tratamiento efluentes.									
Planta de cloración.									
Sector compresores de aire.									
Sector tanque almacenamiento petróleo Enap 6.									
Sector cementador.									
Sector tanque almacenamiento Hidróxido de sodio superior.									
Sector secador Molibdeno.									
Sector reactores planta LR segundo piso.									
Realizado por :						Hora :			
Fecha :						Firma :			

ANEXO 4

Sensor utilizado medición ácido sulfhídrico

Las mediciones de ácido sulfhídrico se realizaron con un sensor electroquímico de "BW Technologies".



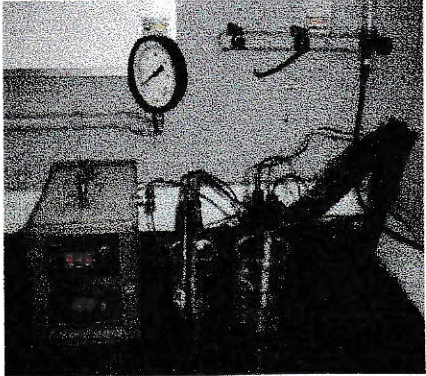
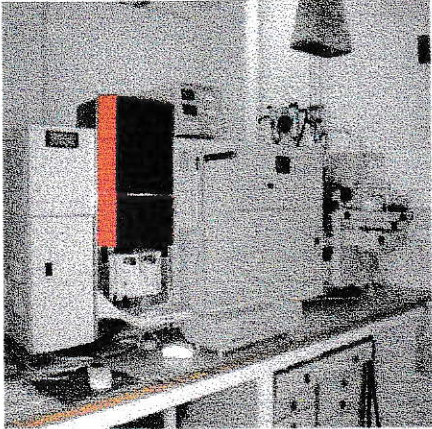
A continuación se muestran las características técnicas del sensor de ácido sulfhídrico.

Gas	Sensor Modelo	Limites detección (ppm)	Temperatura operación (°C)	Incremento (ppm)	Sensibilidad (ppm)
Ácido sulfhídrico	Demko 04	0 - 100	- 40 - 50	1	1

ANEXO 5

Equipo utilizado en las mediciones de hierro en el Licor rico

Para realizar las pruebas de precipitación del Licor rico y el análisis del contenido de metales en las muestras se utilizaron los siguientes equipos.

<p>Jemco modelo 375-ORP</p>	<p>Medición de pH y potencial redox</p>	
<p>Perkin Elmer</p>	<p>Determinación por AA de hierro.</p>	

ANEXO 6
Metodología “Test de jarras”

Las pruebas en jarras requieren un agitador de 4 o 6 paletas como el de la Figura 22 y seis vasos precipitados de 1 litro. El procedimiento desarrollado en este estudio para llevar a cabo las pruebas de precipitación de cobre y coagulación/floculación es el siguiente:

- Tomar una muestra de 1.000 mL de RIL y colocar en cada jarra, esta se ubica debajo de las paletas de agitación del equipo.
- Ajustar el pH con HCl 1 N, entre 8,0 y 8,5
- Agregar Nalmet[®], de acuerdo a la dosis que se quiere estudiar y agitar la muestra a 200 rpm durante 4 minutos
- Agregar el floculante que se estudiara y agitar la muestra a 200 rpm durante 30 segundos, posteriormente reducir la velocidad a 50 rpm y agitar la muestra durante 5 minutos.
- Reducir la velocidad a 0 rpm, y se dejar sedimentar los floculos durante 10 minutos, posteriormente del líquido sobrenadante tomar una alícuota de 20 ml y filtrar en un papel filtro de celulosa con un diámetro de poro de 0,45 µm y analizar el contenido de cobre en la muestra por AA o ICP.
- Determinar el color, pH final y la turbiedad del líquido sobrenadante.
- La jarra que proporcione los mejores resultados indicara la dosis adecuada de Nalmet[®], y floculante que debe utilizarse.

ANEXO 7

Calculo dosificación de Nalmet[®]

La dosificación de Nalmet se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{Nalmet} = (C_{Cu} * 11 * Q) \quad (1)$$

Donde:

C_{Cu} = Concentración de cobre en mg/L

Q = Caudal del efluente en m^3/h

11 = Cantidad de Nalmet para precipitar 1 mg/L de cobre

Al utilizar esta ecuación la dosis de Nalmet queda con las unidades $\frac{mg * m^3}{L * h}$, sin embargo es necesario expresar la dosis en mL/min para poder programarla en el sistema de control. Es por ello que se transforman las unidades de la ecuación anterior hasta llegar a un resultado en mL/min.

$$\text{Nalmet} = (C_{Cu} * 11 * Q) = \frac{mg}{L} * 11 * \frac{m^3}{h} = \frac{mg * 11 * m^3}{L * h}$$

Transformamos los mg a volumen utilizando las unidades de densidad

$$\rho = \frac{m g}{V} \rightarrow V = \frac{m}{\rho} \rightarrow V = \frac{1 m g}{\frac{g}{m L}} \rightarrow V = \frac{1 m g * m L}{g}$$

$$V = \frac{1 m g * m L}{1000 m g} = \frac{m L}{1000}$$

Reemplazo los mg y obtengo:

$$C_{Cu} = \frac{m g}{L} = \frac{m L}{1000 L} \quad (2)$$

Transformamos el caudal.

$$Q = \frac{m^3}{h} * \frac{1000 L}{1 m^3} * \frac{1 h}{60 \text{ min}} = \frac{1000 L}{60 \text{ min}} \quad (3)$$

Reemplazando las ecuaciones (2) y (3) en la ecuación (1):

$$Nalmet = (C_{Cu} * 11 * Q) = \frac{mL}{1000L} * 11 * \frac{1000L}{60 \text{ min}} \quad (4)$$

Simplificando las unidades obtenemos que la dosis final de Nalmet será determinada mediante la siguiente relación:

$$Nalmet (mL / \text{min}) = \frac{(C_{Cu} * 11 * Q)}{60} \quad (5)$$