

UCH-FC.
Q. Ambiental
1587
C. 1



**FACULTAD DE CIENCIAS
UNIVERSIDAD DE CHILE**

“EVALUACIÓN DE CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS EN LA CUENCA DEL ESTERO LOS PUERCOS POSTERIOR AL COLAPSO POST-TERREMOTO DE UN TRANQUE DE RELAVE EN LA LOCALIDAD DE LAS PALMAS, COMUNA DE PENCAHUE, VII REGIÓN DEL MAULE”

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

Químico Ambiental

Nicolás Antonio Inostroza Codoceo

Director de Seminario de Título: Dra. Isel Cortés Nodarse
Co-Director de Seminario de Título: Prof. María Inés Toral

Noviembre de 2011
Santiago – 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 candidato:

NICOLÁS ANTONIO INOSTROZA CODOCEO

“EVALUACIÓN DE CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS EN LA CUENCA DEL ESTERO LOS PUERCOS POSTERIOR AL COLAPSO POSTERREMOTO DE UN TRANQUE DE RELAVE EN LA LOCALIDAD DE LAS PALMAS, COMUNA DE PENCAHUE, VII REGIÓN DEL MAULE”

Ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Químico Ambiental:

COMISIÓN DE EVALUACIÓN

Dra. Isel Cortés Nodarse
Director Seminario de Título

Prof. María Inés Toral
Co-Director Seminario de Título

M. Cs. Ricardo Serrano Rojas
Corrector

Mag. Julio Hidalgo Carvajal
Corrector

[Firma]
Isel Cortés
Isel Cortés
Hidalgo

Un sello circular con el texto "FACULTAD DE CIENCIAS", "BIBLIOTECA CENTRAL" y "U. DE CHILE" rodeado por dos estrellas.

Santiago de Chile, Noviembre de 2011



RESEÑA

Nicolás Antonio Inostroza Codoceo nace un día 5 del mes de Noviembre, en 1985, en la ciudad de Santiago. Su infancia transcurre mayoritariamente en la comuna de Recoleta, frente a la humilde plaza de un barrio tranquilo donde cada pasaje evoca a Caciques y *pu weichafe* Mapuche.

Completa sus estudios de enseñanza básica y media en el Colegio Academia de Humanidades, Padres Dominicos. Casi por azar, en el año 2004 ingresa a la carrera de Química Ambiental motivado por el estudio de la ciencia en armonía con el medio ambiente. Durante su paso por la Universidad, además de conocer y comprender la Química, desarrolla y se perfecciona el rubro de la artesanía, y se descubre como un amante sin límites de la Montaña. Hacia el final de su carrera concreta una idea que había nacido un par de años antes: funda la Corporación para el Desarrollo de Ciencias Ambientales (CODECIAM), una organización sin fines de lucro que permitirá transmitir y dar sentido al conocimiento adquirido en la Universidad, en vista de colaborar con el desarrollo social y económico de un país en aparentes vías de desarrollo.



Dedicatoria

Dedicada esta obra concluida a mis padres y hermanos,
con Amor y profundo agradecimiento.

A Francisca Soledad.

Tañi Mawiza mew.

(A mi Montaña).

Agradecimientos

Agradezco a mis profesoras directoras Isel Cortés y María Inés Toral, quienes me han apoyado y criticado constructivamente durante todo este proceso, orientándome para llevar a buen término el presente trabajo de investigación.

Gracias a quienes han colaborado desinteresadamente en este proyecto: gracias Mauricio Cartes por el apoyo, las ideas y críticas; gracias al profesor Patricio Jara y a María Inés Polanco por facilitarme materiales de laboratorio cuando los necesité.

En la etapa de muestreo, gracias a Claudio Letelier de la Asociación de Canalistas de Penciahue, a don Hernán Sepúlveda y a su familia por abrir las puertas de su hogar, y a María Ercilia Araya por el alojamiento ofrecido en Talca.

Gracias a CODECIAM, por no abandonarme como inspiración.

Gracias a los que han creído en mí.

INDICE DE CONTENIDO

I. INTRODUCCION	1
1.1. Depósitos de relave y problemática ambiental	1
1.1.1. Tranques de Relaves	2
1.1.2. Embalses de Relaves	2
1.1.3. Depósito de Relaves Espesados	3
1.1.4. Depósito de Relaves Filtrados	3
1.1.5. Depósito de Relaves en Pasta	3
1.2. Extracción, procesamiento y residuos de la minería	4
1.3. Riesgos ambientales asociados a depósitos de relave	8
1.3.1. Riesgo Sísmico	9
1.3.2. Riesgo Hidrológico	9
1.3.3. Riesgo por generación de polvo	10
1.3.4. Contaminación de suelo y uso alternativo del terreno	10
1.3.5. Riesgo por consumo de agua	10
1.3.6. Riesgos por fallas en el sistema de disposición	11
1.4. Contaminación por metales pesados	12
1.4.1. Origen de la contaminación por metales pesados	13
1.4.2. Disponibilidad de metales pesados en suelos	14
1.5. Normativa relacionada	17
1.6. Caso de estudio	18
1.6.1. Productividad y usos del suelo	19
1.6.2. Sistema hidrológico	21
1.6.3. Formación geológica	26
1.6.4. Condiciones atmosféricas	27
1.6.3. Otros antecedentes	28
HIPOTESIS	30
OBJETIVOS	30
Objetivo general	30
Objetivos específicos	30
II. PARTE EXPERIMENTAL	31
2.1. Muestras	31

2.1.1. Criterios de selección de zonas de muestreo en la cuenca del Estero Los Puercos	31
2.1.2. Campañas de muestreo	32
2.1.3. Toma y preservación de muestras de agua y suelo	35
2.2. Análisis de muestras en laboratorio	36
2.2.1. Preparación de muestras de agua	36
2.2.2. Determinación de Zinc, Cadmio y Plomo en muestras de agua	37
2.2.3. Determinación de metales totales en muestras de agua y suelo	40
2.2.4. Comparación y alcances de las técnicas utilizadas para la determinación de metales pesados	44
2.2.5. Determinación de cationes y aniones solubles en muestras de agua	45
2.3. Procesamiento de información	50
III. RESULTADOS	51
3.1. Caracterización in-situ de pH y Conductividad Eléctrica	51
3.2. Contenido de cationes y aniones en agua superficial y subterránea	55
3.3. Contenido de Zinc, Cadmio y Plomo disueltos en agua superficial y subterránea por Voltametría de Redisolución Anódica	56
3.4. Contenido de metales en agua superficial y subterránea	57
3.4.1. Sector Tapihue	57
3.4.2. Sector Botalcura	60
3.4.3. Sector Pencahue	60
3.5. Contenido de metales totales en suelos	63
3.6. Evaluación según normas chilenas	67
IV. DISCUSION	70
4.1. Síntesis de resultados	70
4.1.1. pH y CE	70
4.1.2. Cationes y aniones por Cromatografía Iónica	70
4.1.3. Zn, Cd, Pb por VRA	70
4.1.4. Metales pesados en agua por ICP-OES	70
4.1.5. Metales pesados en suelos por ICP-OES	71
4.1.6. Comparación con normas de referencia	72
4.2. Análisis de resultados	72

4.2.1. Hierro, Aluminio y Manganeso	73
4.2.2. Zinc y Cadmio	77
4.2.3. Plomo y Arsénico	79
4.2.4. Elementos de menor impacto	81
4.3. Análisis general y recomendaciones	83
V. CONCLUSIONES	87
VI. REFERENCIAS	90
VII. ANEXOS	96

Índice de Tablas

Tabla 1. Residuos asociados a los procesos de la extracción de oro.	7
Tabla 2. Casos nacionales de contaminación por relaves mineros.	11
Tabla 3. Actividades productivas en las zonas de la cuenca del Estero Los Puercos.	21
Tabla 4. Fechas y alcances de las campañas de muestreo	32
Tabla 5. Ubicación y fuente de los puntos de muestreo de agua.	33
Tabla 6. Ubicación y fuente de los puntos de muestreo de suelos (7/10/10).	33
Tabla 7. Criterios de aceptabilidad para lecturas de ICP-OES.	42
Tabla 8. Protocolo de calidad para la lectura 5 y 10 muestras en ICP-EOS.	43
Tabla 9. Límites de detección de ICP y VRA. Comparación con normativas de calidad de agua utilizadas	45
Tabla 10. Condiciones de trabajo para la determinación de Cationes y Aniones utilizando el equipo DIONEX 120.	47
Tabla 11. Criterios de aceptabilidad para lecturas de Cromatografía Iónica.	48
Tabla 12. Protocolo de calidad para la lectura de muestras por Cromatografía Iónica	49
Tabla 13. Resultados de pH y CE para muestras de agua, medidos en terreno.	52
Tabla 14. Fracción molar según pH para muestras de agua.	55
Tabla 15. Resultado para iones en muestras de agua (22/7/10).	56
Tabla 16. Contenido de metales pesados en agua superficial y subterránea. Comparación con NCh409/1.Of2005 y NCh1.333.Of1978.	68
Tabla 17. Contenido de metales pesados en suelos y material de relave. Comparación con rangos normales en litósfera y normas internacionales.	69

Índice de Figuras

Figura 1. Concentración media de metales en suelos	14
Figura 2. . Ubicación de la comuna de Penciahue y sus principales centros urbanos	19
Figura 3. Delimitación esquemática de la cuenca del Estero Los Puercos en la comuna de Penciahue.	20
Figura 4. Cuenca del Estero Los Puercos y ubicación del tranque de relaves y de los principales poblados	23
Figura 5. Régimen pluvial anual y causales medios mensuales del Estero Los Puercos en el período 1990-2001	25
Figura 6. Zona de estudio e identificación de puntos de muestreo de agua y suelos en la Cuenca del Estero Los Puercos	34
Figura 7. Fundamento esquemático de la VRA	38
Figura 8. Representación esquemática del montaje experimental para V.R.A.	39
Figura 9. Valores de pH y CE, obtenidos entre Marzo y Octubre de 2011 en agua superficial y subterránea de la cuenca del Estero Los Puercos.	53
Figura 10. Comparación de los valores de pH y C.E. obtenidos en Marzo y Octubre en los sectores Tapihue, Botalcura y Penciahue.	54
Figura 11. Contenido de metales pesados en agua de vertiente en el sector Tapihue	58
Figura 12. Contenido de Fe, Al, Mn y Zn en agua de distinta fuente en el sector Tapihue (muestras I-A y III-A).	59
Figura 13. Contenido de Fe, Al, Mn y Zn en agua superficial en el sector Botalcura.	60
Figura 14. Contenido de Fe, Al, Mn y Zn en agua superficial y subterránea en el sector Penciahue.	62
Figura 15. Contenido de metales pesados en suelo superficial comparados con el material de relave	65
Figura 16. Contenido de metales pesados en suelo profundo comparados con el material de relave	66
Figura 17. Contenido de cadmio en el material de relave y suelos superficiales (S) y profundos (P).	67

Lista de abreviaturas y convenciones

DAM	Drenaje ácido de minas
LMP	Límite máximo permitido
NCh 409	Norma Chilena 409, para agua potable
NCh 1.333	Norma Chilena 1.333, de calidad de agua para distintos usos
DFL	Decreto con Fuerza de Ley
SEIA	Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental
EIA	Estudio de Impacto Ambiental
M.T.	Millones de toneladas
NNW	Nor.nor-weste
PLADECO	Plan de Desarrollo Comunal
CENMA	Centro Nacional del Medio Ambiente
LSSV	Linear Sweep Stripping Voltametry

Técnicas

ICP-OES	Espectrómetro de Emisión Óptica con Plasma de Argón Acoplado Inductivamente
VRA	Voltamperometría de Redisolución Anódica

RESUMEN

Desde la década de los ochenta a la fecha, un sector productivo que se ha desarrollado con fuerza en Chile, trayendo consigo tanto crecimiento económico como deterioro ambiental, es la minería.

Producto del terremoto del 27 de Febrero del 2010, el tranque de relave de la minera Las Palmas, ubicado en la VII Región del Maule, colapsó vertiendo el 80% del material sobre suelos aledaños, manteniéndose el contacto directo entre el relave y los cursos de agua adyacentes durante varias semanas.

Se tomó muestras de agua y suelo entre Marzo y Octubre del mismo año en tres puntos de la cuenca, que fueron analizadas en busca de metales pesados utilizando los métodos de ICP-OES y VRA.

En agua superficial se observó un crecimiento sostenido de hierro y aluminio y tendencia a la estabilidad de manganeso en torno al LMP por la NCh1.333/78 para agua de regadío ($0,2 \text{ mgL}^{-1}$). En suelos, la mayoría de los metales pesados no representan un peligro directo para la salud humana, a pesar de encontrarse zinc, plomo, cobre y cadmio en altas concentraciones en el material de relave; sólo el cadmio presenta concentraciones relativamente altas al ser comparadas con valores de referencia, lo que podría generar efectos cancerígenos y nocivos para el sistema respiratorio, entre otros.

En Las Palmas, la explotación de yacimientos durante las décadas ochenta y noventa, y el posterior almacenamiento de relaves, pudo generar un contacto sistemático entre metales pesados y ecosistemas circundantes. Es probable que esta incorporación progresiva de metales a la cuenca, atenuase la gravedad de la contaminación posterior al colapso del tranque y su impacto en el medio ambiente.

ABSTRACT

Since the 1980s until today, a productive sector that has developed strongly in Chile, bringing both economic growth and environmental degradation, is mining.

As a consequence of the earthquake on February 27th, 2010, the deposit of tailings, property of Las Palmas mining, located in the VIIR of Maule, collapsed poured 80% of the material on the surrounding soils, maintaining direct contact between the tailings and adjacent waterways for several weeks.

Samples of water and soil were taken between March and October of that year at three points in the basin, which were analyzed for heavy metals using ICP and VRA methods.

In surface water was observed a sustained growth of iron and aluminum, and a tendency to stability over time of manganese near to the maximum level allowed by the Chilean norm NCh1.333/78, regarding irrigation water (0.2 mgL^{-1}). In soils, most of heavy metals do not represent a direct menace to human health, despite the finding of Zn, Pb, Cu and Cd in high concentrations in tailing material; only Cd was found in high concentrations when compared to reference values, which could lead to harmful and even carcinogenic effects in the respiratory system, among others.

In Las Palmas, the exploitation of deposits during the 1980s and 1990s, and the subsequent storage of tailings could have generated a systematic contact between heavy metals and ecosystems. It is likely that this progressive incorporation of metals into the basin, reduced the severity of the pollution after the collapse of dams and their impact on the environment.

I. INTRODUCCION

1.1.- Depósitos de relave y problemática ambiental

Es de amplio conocimiento que una de las principales actividades económicas en Chile es la minería, destacándose la extracción y concentración de cobre y, en menor medida, de otros minerales como oro, plata y molibdeno. Del total de mineral extraído en una mina metálica, sólo el 2% corresponde al metal deseado, el resto corresponde a material de descarte conformado por estériles (50%), relaves (44%) y escorias (4%) (López, 2003). Si como ejemplo se piensa en la minería del cobre, la producción de 3.200.000 toneladas de cobre fino genera aproximadamente 300 millones de toneladas de material de descarte, que en su gran mayoría no puede ser reprocesado ni reutilizado en el proceso productivo, y que por lo tanto debe ser almacenado en los denominados tranques de relave (Andía & Lagos, 2001).

El Decreto Supremo N° 248 (2006), Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves, define relave como una "suspensión de sólidos en líquidos, formando una pulpa, que se generan y desechan en las plantas de concentración húmeda de especies minerales que han experimentado una o varias etapas en circuito de molienda fina. El vocablo se aplicará, también, a la fracción sólida de la pulpa que se ha descrito precedentemente". Según la forma de disposición del material se consideran factores como cercanía al concentrador, capacidad de almacenamiento de relaves y topografía del lugar. La misma normativa denota la existencia de distintos tipos de depósitos de relave, que se describen a continuación.

1.1.1. Tranque de Relaves

Consiste en un muro construido inicialmente con material de empréstito compactado, sobre el cual se inicia la depositación de los relaves, depositándose la fracción arenosa junto al muro y sedimentando la lamosa¹ en un punto más lejano; en el extremo final se encuentra el pozo de decantación, donde decanta el agua. Cuando el tranque se acerca a su máxima capacidad de almacenaje, es posible incrementar su volumen progresivamente levantando el muro de contención, pudiendo alcanzar alturas de hasta 25 metros. Existen tres métodos de construcción según la ubicación: sistema aguas arriba, aguas abajo y método eje central.

Estos métodos constructivos son ampliamente conocidos en Chile, siendo los métodos de aguas abajo y eje central los que contempla hoy la legislación en los proyectos de Tranques de Relaves que se presentan al Servicio Nacional de Geología (SERNAGEOMIN) para su aprobación.

1.1.2. Embalse de Relaves

Consiste en una presa construida totalmente con material de empréstito compactado e impermeabilizado. Sus características son similares a las presas de embalse de agua, es decir, cuentan con un muro resistente, pero con diferencias en relación a sus parámetros de diseño.

Por otra parte, al igual que los tranques de relaves descritos anteriormente, es posible incrementar por etapas el volumen de almacenamiento. Sin embargo, desde un punto de vista sísmico, los embalses de relaves son más resistentes.

¹ Fracción lamosa: sólidos de granos más gruesos.

1.1.3. Depósito de Relaves Espesados

Consiste en un sistema de depósito que no requiere de un dique o muro de contención. Su proceso de construcción se basa en la viscosidad de la pulpa, disponiendo los relaves en forma de cono de modo que la pendiente será la correspondiente a la respectiva concentración de sólidos

1.1.4. Depósito de Relaves Filtrados

Tiene características similares a las de los relaves espesados, pero con menor contenido de agua (20-30%) debido al proceso de filtrado. Su disposición puede ser utilizando el método descrito anteriormente o construyendo módulos de material compactado, los cuales permiten conformar un depósito aterrazado de gran volumen.

1.1.5. Depósito de Relaves en Pasta

Corresponden a una mezcla de agua con sólido con abundantes partículas finas y bajo contenido de agua, de modo que esta mezcla tenga una consistencia espesa, similar a una pulpa de alta densidad (15% de concentración en peso de partículas de tamaño menor a 20 micrones). Dicha propiedad permite que sean eficientemente transportadas en tuberías sin los problemas de segregación o sedimentación que ocurren normalmente en las pulpas. Una vez depositados los relaves, se dejan secar y luego acopiar, permitiendo así minimizar la superficie de suelo cubierto con relaves.

La flexibilidad que permiten las pastas en cuanto al desarrollo del lugar de emplazamiento del depósito puede ser extendida al uso de técnicas de

construcción aguas arriba, además, con la alternativa de pasta no se requiere una solución tipo embalse.

Este tipo de depósitos reducen significativamente i) la necesidad de diseñar y construir grandes depósitos; ii) el volumen de materiales involucrados en la construcción de depósitos; iii) los riesgos de falla geomecánica asociados a los tranques convencionales; iv) los riesgos de generación de aguas ácidas y lixiviación de metales; v) las pérdidas de agua por infiltración y evaporación y; vi) la emisión de material particulado, entre otros (Ramirez, 2007).

Previo a la construcción de un tranque de relaves y con el objetivo de minimizar los riesgos, proteger la salud de las personas y prevenir daños a bienes físicos y al medio ambiente, se deben considerar los siguientes aspectos (SERNAGEOMIN, 2003):

1. la selección del sitio adecuado,
2. las condiciones climáticas del lugar,
3. la elección de un método seguro para depositar los relaves y
4. la aprobación por parte del SERNAGEOMIN.

1.2.- Extracción, procesamiento y residuos de la minería

En términos generales, para la obtención de minerales desde la litósfera se deben realizar los siguientes procesos:

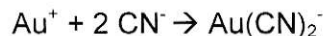
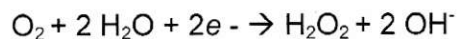
- Extracción del mineral desde las rocas de la litósfera.
- Molienda o trituración de material grueso en partículas pequeñas, de diámetros del orden de los centímetros.
- Procesamiento y obtención del mineral desde las rocas utilizando mecanismos químicos.

- Concentración del mineral deseado, utilizando mecanismos físicos y químicos.
- Refinación o eliminación de metales no desados que constituyen impurezas.

En el caso particular de este estudio se pondrá especial atención a los procesos de la minería aurífera, debido a que la zona de estudio se encuentra en las cercanías de un de una faena minera de oro abandonada. Así, los procesos para la obtención del mineral son:

- **Gravimetría:** procesos basado en las diferencias de densidad entre el mineral y los estériles. La separación se hace utilizando la fuerza de gravedad.
- **Amalgamación:** proceso que utiliza la capacidad del oro (y la plata) para alearse con mercurio, dicha amalgama se forma al poner en contacto el mineral con mercurio líquido.
- **Flotación:** se utiliza cuando el mineral está asociado a sulfuros y corresponde a un proceso fisico-químico que se utiliza para la separación de las especies minerales valiosas de las no valiosas mediante la adhesión selectiva de burbujas de aire a las partículas de los minerales. Se utilizan reactivos químicos conocidos como espumantes, colectores, depresores y modificadores de pH (Linares, 2010).
- **Cianuración:** se basa en la solubilidad del oro en disoluciones de cianuro, utilizando procesos de lixiviación. El mecanismo está regido por los principios electroquímicos de la corrosión, consistente en reducir el oxígeno y oxidar el oro metálico para formar un complejo aurocianuro estable.

Se describe a continuación el proceso químico utilizando cianuro de sodio:



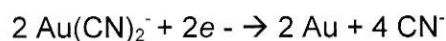
Reacción global o de Elsner:



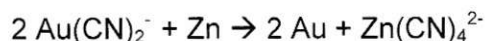
Existen distintos métodos de cianuración, obteniéndose en todos una disolución concentrada de oro (SAAC, 2004).

- **Recuperación:** desde la solución concentrada se puede recuperar el mineral utilizando distintas técnicas y materiales. Entre ellos el Carbón activado presenta la ventaja de que su gran área superficial favorece la capacidad de adsorción. El Carbón activado puede utilizarse de 3 formas: en columna (CIC), en pulpa (CIP) y en lixiviación (CIL).

Otra forma de recuperar el oro es mediante la solución Merrill Crowe, que involucra la oxidación de zinc y la reducción del anión cianuro de oro (SAAC, 2004). A continuación se detallan las reacciones incluidas:



Reacción global:



Existen técnicas de recuperación más modernas como las resinas de intercambio iónico, que adsorben los iones $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ utilizando bases fuertes o débiles, o la extracción por solventes, donde se extrae el anión aurocianuro mediante un solvente orgánico inmiscible en la fase acuosa, donde la separación se produce por diferencia de densidades (Ortega, 2009).

- **Refinación:** corresponde a la última etapa del tratamiento de los metales, donde se eliminan las impurezas que aún se encuentran en el concentrado. Los métodos utilizados dependerán tanto de los procesos utilizados como de los recursos disponibles, entre ellos se encuentran la fundición, basada en las diferencias de puntos de ebullición de los distintos minerales, y la electrólisis, que utiliza corriente eléctrica para la separación.

Dependiendo de los procesos de extracción, obtención y purificación del mineral, es posible identificar los residuos que se generarán, según se señala en la Tabla 1.

Proceso	Residuo	Descripción
Extracción	Estériles	Material que ha sido removido y que no ha entrado al proceso
Flotación	Relaves	Material presente en el yacimiento desde el que se ha extraído el mineral valioso
Lixiviación	Ripios	Sólido que queda luego de extraer el mineral valioso mediante cianuración
Electrolítica	Barro arseniacal	Proveniente del tratamiento de purificación del electrolito mediante un proceso de electrodeposición
Electro-obtención	Borras de electroobtención	Formadas por la degradación de los ánodos, habitualmente de plomo
Fundición	Escorias	Óxidos de hierro y fundente
	Emisiones	Dióxido de carbono y material particulado que contiene metales pesados (As, Pb, etc).

Tabla 1. Residuos asociados a los procesos de la extracción de oro (Fuentes, 2005).

1.3.- Riesgos ambientales asociados a depósitos de relave

Riesgo ambiental se define como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno que afecta directa o indirectamente al medio ambiente. Para comprender el concepto de riesgo se deben considerar dos componentes esenciales: amenaza y vulnerabilidad. La amenaza se define como la probabilidad de ocurrencia de un evento, potencialmente desastroso, durante cierto período de tiempo en un sitio dado, mientras que la vulnerabilidad corresponde al grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo, resultado de la probable ocurrencia de un evento desastroso (Guerra, 2010). Así, en el caso de depósitos de relave, la amenaza corresponde a la posibilidad del colapso de los materiales de construcción, mientras que la vulnerabilidad se percibe en el eventual compromiso de la salud humana y en la disminución de calidad y producción agrícola y ganadera.

Conocer los riesgos ambientales asociados a los tranques de relave es fundamental si se desea realizar un diagnóstico, evaluación y planes de prevención y reacción ante eventuales emergencias en zonas determinadas. En términos generales los riesgos pueden estar asociados a fenómenos naturales, características propias del material de relave o a la estructura y tipo de construcción de los tranques. Otro factor determinante será la zona de potencial impacto dada por la movilidad de elementos nocivos a través de suelos, cursos de agua o de masas de aire

Según el Principio Precautorio (PP)², existen dos factores determinantes respecto a los riesgos: i) las consecuencias poco conocidas producto de la acción del hombre y, ii) la escasa probabilidad de conocimiento de dichos riesgos por parte de la población.

² **Principio Precautorio:** concepto acuñado en la Declaración de Río (1992) que puede definirse como un modelo de desarrollo de carácter preventivo que busca proteger a los seres humanos y su entorno de riesgos inciertos (UNESCO-COMEST, 2005).

Para evaluar los riesgos y posibles consecuencias se debe recopilar u obtener antecedentes respecto a la estructura y dinámica de las matrices y el entorno, por ejemplo, caudales de cursos de agua, variables meteorológicas, estructura de suelos, elementos biológicos, poblaciones aledañas, etc.

Los riesgos ambientales de los depósitos de relave pueden clasificarse como: riesgo sísmico, riesgo hidrológico, riesgo por generación de polvo, contaminación del suelo y uso alternativo del terreno, riesgo por consumo de agua y riesgos por fallas en el sistema de disposición (Guevara, 1999), los que se describen a continuación:

1.3.1. Riesgo Sísmico: producido por eventos naturales asociados a los terremotos, como movimientos de suelo, fallas del suelo de apoyo u ocurrencia de deformaciones tectónicas. Puede producir impactos catastróficos en cursos de agua, actividad agrícola o poblados e incluso poniendo en riesgo vidas humanas (Corvalán, 2000).

1.3.2. Riesgo hidrológico: referido, principalmente a aumento de las aguas lluvia y crecidas de ríos. Puede generar impactos asociados, por ejemplo, al arrastre de desechos, residuos y sedimentos, acidificación de aguas, solubilización de metales y contaminación de napas subterráneas (Corvalán, 2000). Puede generar contaminación de fuentes de agua potable, recursos para riego de zonas agrícolas o para uso recreativo. Por otra parte, la acidificación de aguas y solubilización de metales son procesos asociados al drenaje ácido de la mina (DAM), que corresponde a aguas con altos índices de acidez y carga de metales en disolución, generados cuando los sulfuros metálicos minerales son oxidados. Además, puede producirse contaminación directa de cursos de agua producto de descargas directas de relaves o aguas claras³ a cursos de agua o al mar (Guevara, 1999).

³ **Aguas claras:** aguas generadas por la decantación natural de los sólidos finos de la pulpa de relaves, que se ubican en un sector de la cubeta de los tranques de relaves.

1.3.3. Riesgo por generación de polvo: producido debido a que algunas partículas del material de relave son propensas a erosión eólica, es decir, que pueden ser levantadas por el viento. Este fenómeno se ve favorecido en depósitos abandonados o que están en proceso de secado. La principal consecuencia tiene relación con la incorporación de material particulado fino con contenido de metales pesados (diámetro menor a $2,5 \mu\text{m}$) al sistema respiratorio, lo que podría comprometer seriamente la salud humana (WHO, 2006), y generar daños físicos directos en la vegetación como la inhibición parcial o total del proceso de fotosíntesis (López P. et al., 2003).

1.3.4. Contaminación del suelo y uso alternativo del terreno: producida debido al movimiento de sales y metales pesados desde relaves consolidados en el subsuelo hacia otras superficies. Las variables principales que influyen en el proceso son la textura del suelo, velocidad de percolación del agua y gradientes de concentración (Guevara, 1999). Pueden producirse dos fenómenos críticos, la muerte de plantas por contacto de metales con sus raíces, y la aparición de ciertas enfermedades como la molibdenosis, donde metales como el Cobre y el Molibdeno pueden ser absorbidos y acumulados por las plantas (López P. y col, 2003).

1.3.5. Riesgo por consumo de agua: en zonas de escasez de agua, especialmente calurosas y con escasas precipitaciones, la extracción y procesamiento de minerales junto a la disposición de relaves, puede generar pérdida o contaminación de fuentes de agua a través de filtraciones, humedad retenida o evaporación (Guevara, 1999), dificultando, eventualmente, las actividades agropastoriles de subsistencia tradicionales de comunidades aymaras y atacameñas (Camus & Hajek, 1998).

1.3.6. Riesgos por fallas en el sistema de disposición: producido por fallas en el diseño, construcción, operación y/o accidentes que pueden originar derrames, además de impactos asociados al cierre inadecuado de los tranques que podrían provocar contaminación de ríos, lagos, bordes costeros, problemas de seguridad, riesgo de colapso, emisión de material particulado, alteraciones paisajísticas y generación de DAM, entre otros (López P. y col, 2003).

En la Tabla 2 se presentan algunos casos nacionales de contaminación por material de relave, que ejemplifican las distintas causas y consecuencias de este tipo de eventos.

Tabla 2. Casos nacionales de contaminación por relaves mineros (Guevara, 1999).

Caso	Compañía	Fecha	Causas	Consecuencias
Contaminación de la Bahía Chañaral (III R.)	División El Salvador, CODELCO.	1939-1989	Acumulación de más de 300 M.T. ^a de material de relave en la costa de la Bahía de Chañaral.	<ul style="list-style-type: none"> - Extinción de ecosistemas en la Bahía de Chañaral. - Deterioro permanente en la salud de la población.
Derrame de relaves (III R.)	Minera Cobrex	Agosto de 1999	Superación del límite de almacenamiento del tranque de relaves.	<ul style="list-style-type: none"> - Contaminación de agua (embalse Lautaro) por líquidos del relave. - Escurrimiento de líquidos por la quebrada Amolanas.
Colapso del Tranque Barahona (VI R.)	División El Teniente, CODELCO.	01/10/1928	Terremoto de 8,2 grados Richter con epicentro en Curepto, Región del Maule.	<ul style="list-style-type: none"> - Vertimiento de 4 M.T.a de material sólido. - Muerte de 55 personas.
Colapso del Tranque Talcuna (IV R.)	Minera Cobrex	Septiembre 2002	Colapso de muros de contención.	<ul style="list-style-type: none"> - Derrame de 8.000 m³ de relave al río Elqui. - Contaminación de Cobre, Hierro y Manganeseo en agua de consumo humano.
Colapso del Tranque El Cobre (V R.)	Minera Disputada de Las Condes	28/03/1965	Terremoto de. 7,1 grados Richter con epicentro en La Ligua	<ul style="list-style-type: none"> - Destrucción de pueblo El Cobre - Muerte de más de 200 personas - Vertido de 1,5 M.T.a - Contaminación del estero El Sauce.

^a M.T.: millones de toneladas.

1.4.- Características de los metales pesados

Se considera metal pesado a aquel elemento que tiene una densidad igual o superior a 6 grcm^{-3} cuando está en forma elemental, o cuyo número atómico es superior a 20 (excluyendo a los metales alcalinos y alcalino-térreos). Su presencia en la corteza terrestre es menor a 0,1% y casi siempre inferior a 0,01%. Junto a estos metales pesados hay otros elementos químicos que se suelen englobar con ellos por presentar orígenes y comportamientos asociados (metales ligeros o no metales), como son el As, B, Ba y Se. Se conocen como metales traza aquellos que se encuentran en concentraciones en el rango de 100 a $0,01 \text{ mgKg}^{-1}$, y se utiliza el término de ultratrazas para los que presentan niveles inferiores (Sánchez, 2003).

Frecuentemente, los metales se encuentran como cationes que interactúan con la matriz suelo, pudiendo encontrarse en formas químicas no dañinas a pesar de existir en altas concentraciones, sin embargo, debido a cambios en las condiciones ambientales, pueden movilizarse y cambiar de forma química produciendo efectos tóxicos. Además, poseen un carácter acumulativo, lo que implica que su concentración no disminuya en el tiempo; si bien son necesarios y beneficiosos para plantas y otros organismos en determinados niveles, pueden ser tóxicos si exceden ciertos límites de concentración.

Los metales pesados y elementos traza pueden ser clasificados como esenciales y no esenciales en términos de si tienen o no funciones biológicas. Los metales pesados que son micronutrientes esenciales pueden causar alteraciones por deficiencia o por sobredosis sostenida, clasificándose según su concentración en:

Traza: Fe^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} .

Ultratrazas: Mo, Mn, Co, Cr^{3+} , V, Se, As.

Por su parte, los metales no esenciales son altamente tóxicos y tienen la propiedad de acumularse en seres vivos, por lo tanto, siempre pueden causar alteraciones biológicas. Dentro de este grupo se encuentran: Cd, Hg, Pb, Sb, Ti, Al, Ag (Galán & Romero, 2008).

1.4.1. Origen de los metales pesados

Los metales pesados en suelos tienen dos tipos de fuentes (Sánchez, 2003):

i) Natural

Originados a partir de un proceso de meteorización y concentración natural. Las rocas ígneas ultrabásicas (como las peridotitas y las serpentinas) presentan los más altos contenidos en metales pesados, seguidas de las ígneas básicas (como los gabros y basaltos). Las menores concentraciones se encuentran en las rocas ígneas ácidas (como el granito) y en las sedimentarias (como las areniscas y las calizas). Los porcentajes más altos se dan para el Cr, Mn y Ni, mientras que el Co, Cu, Zn y Pb se presentan en menores cantidades, siendo mínimos los contenidos para el As, Cd y Hg.

Bowen (1979), citado en Sanchez (2003), propone rangos de concentraciones en suelos para distintos grupos de metales. Así, los más abundantes corresponden al Mn, Cr, Zn, Ni y Pb ($1-1500 \text{ mgKg}^{-1}$), en menores concentraciones se encuentran el Co, Cu y As ($0,1-250 \text{ mgKg}^{-1}$) y en porcentajes mínimos el Cd y Hg ($0,01-2 \text{ mgKg}^{-1}$).

Los rangos en que se encuentran los metales en suelos pueden ser muy amplios; en Figura 1 se presentan las concentraciones medias de metales en suelos propuestas por García & Dorronsoro (2005).

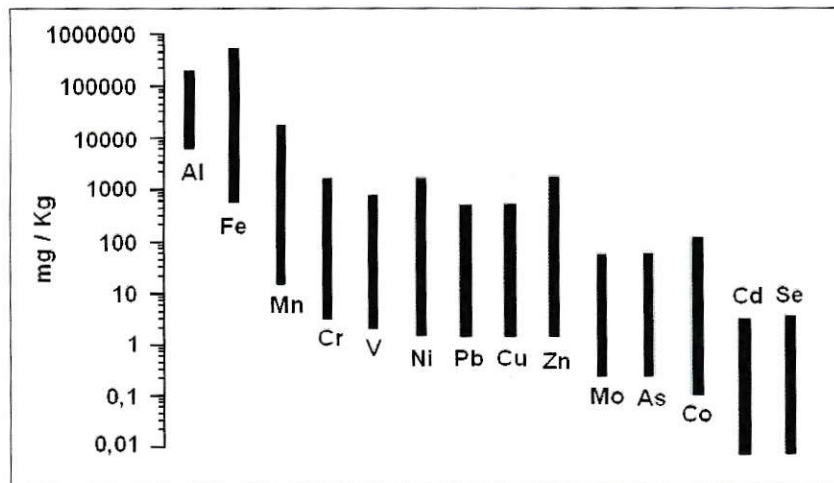


Figura 1. Concentración media de metales en suelos (García & Dorronsoro, 2005).

ii) Antropogénico

Producido por actividades que modifican el contenido natural de metales en el suelo, entre estas actividades se encuentran: actividades mineras (Cu, Ni, As, Se, Fe, Cd), aplicación de productos químicos agrícolas y lodos residuales (moderadamente Cd, Cu, Pb y Zn), gases de combustión, emisión de partículas y residuos de origen doméstico.

En el caso del presente estudio, dadas las condiciones de extracción del mineral y las fuentes naturales, se pondrá especial atención en el Zinc, Cadmio, Plomo, Hierro y Manganeseo.

1.4.2. Disponibilidad de metales pesados en suelos

Los metales pesados incorporados al suelo pueden seguir cuatro diferentes vías (Sánchez, 2003):

- pueden quedar retenidos en el suelo, ya sea disueltos en la solución del suelo, o bien fijados por procesos de adsorción, complejación y precipitación,
- pueden ser absorbidos por las plantas y así incorporarse a las cadenas tróficas,
- pueden pasar a la atmósfera por volatilización,
- pueden movilizarse a las aguas superficiales o subterráneas.

En general, los metales pesados quedan adsorbidos en la fracción superficial del suelo, lixiviando hacia horizontes inferiores pequeñas cantidades, lo que explica que la presencia de altas concentraciones en el horizonte superficial decrezca drásticamente con la profundidad (Galán & Romero, 2008). Los factores del suelo que afectan la movilidad, y por lo tanto, la biodisponibilidad de los metales pesados en el suelo, son los siguientes:

- **pH:** se produce una competencia de los iones H^+ con los cationes metálicos por los sitios de intercambio, lo que produce que a pH bajo se produzca la desorción de los metales, aumentando su concentración en la solución suelo y su biodisponibilidad. Al aumentar el pH, los metales son removidos de la solución suelo y adsorbidos por los coloides del suelo, disminuyendo su biodisponibilidad. Con excepción del Mo, Se y As, la biodisponibilidad de los metales pesados disminuye con el aumento del pH del suelo debido a su precipitación como hidróxidos solubles, carbonatos y complejos orgánicos (SAG, 2005).
- **Materia orgánica:** está compuesta por sustancias húmicas y no húmicas, que tienen alta afinidad por los iones metálicos y pueden formar complejos organometálicos estables que, generalmente, no son

absorbidos por las plantas; sin embargo, existen compuestos orgánicos solubles asociados a los metales. Debido a que la materia orgánica contiene principalmente grupos carboxilatos (COO^-), en ambientes alcalinos se formarán complejos más estables (SAG, 2005).

- **Mineralogía de las arcillas:** las arcillas se caracterizan por tener cargas negativas en su superficie, responsables de la Capacidad de Intercambio Catiónico. La adsorción de metales depende tanto del tipo de arcilla como del contenido en el suelo, además de los valores de superficie específica y cargas eléctricas de cada mineral (Galán & Romero, 2008; SAG, 2005).
- **Condiciones redox:** dependiendo del estado de oxidación en que se encuentren los metales, y mediante diagramas de potencial versus pH, es posible predecir el comportamiento de los metales frente a un cambio de las condiciones ambientales. En el caso de suelos con escasa aireación se favorecen las condiciones de reducción, lo que incrementa la biodisponibilidad, y por consiguiente la toxicidad, de Mn, Cd, Cu, Cr y Zn (Galán & Romero, 2008; SAG, 2005).
- **Óxidos e hidróxidos de Fe, Mn y Al:** aportan en la adsorción e inmovilización de metales pesados, especialmente divalentes como Pb, Zn, Cd, Cu y Cd. Al aumentar el contenido de óxidos hidratados en el suelo aumentan los sitios de adsorción de los metales, reduciendo directamente su biodisponibilidad (Galán & Romero, 2008; SAG, 2005).
- **Textura:** los suelos arcillosos tienen mayor capacidad de retención de metales que los arenosos, ya sea por adsorción o por la capacidad de cambio de los minerales arcillosos (Galán & Romero, 2008).

- **Salinidad:** el aumento de la salinidad puede incrementar la movilización y retención de metales por dos mecanismos: i) por reemplazo de los cationes sodio y potasio por metales pesados en lugares de intercambio catiónico, y ii) por formación de compuestos estables entre aniones de cloruro y sulfato con los metales Pb, Zn, Cu, Cd y Hg (Galán & Romero, 2008).

1.5.- Normativa relacionada

En Chile no existe una normativa específica relativa a los residuos mineros que defina su sentido y alcance, sino que nos encontramos con diversas normativas de distinta jerarquía que aluden al concepto (Ver ANEXO 11: Resumen de normativas chilenas relacionadas con la minería) . Cabe destacar que la **Constitución Política de Chile (1980)** establece como derecho constitucional la garantía a todas las personas de vivir en un medio ambiente libre de contaminación (art. 19, N° 8).

Si bien existe un amplio número de normativas relacionadas con el sector industrial y específicamente con la minería, dadas las características del presente trabajo de investigación se trabajará con las normas chilenas de calidad de agua descritas a continuación:

- **Requisitos de Calidad del Agua para Diferentes Usos (Norma Chilena Oficial N°1.333, MOP, 1978):** establece criterios de calidad del agua de acuerdo a su uso: consumo humano, bebida de animales, riego, recreación y estética.
- **Norma Chilena Oficial N° 409 (INN, 2005):** establece los requisitos de calidad que debe cumplir el agua potable y los procedimientos de muestreo físicos, químicos, radiactivos y bacteriológicos.

1.6.- Caso de estudio

Producto del terremoto del 27 de Febrero del 2010 (8,5 grados Richter) se produjo el colapso del depósito de relave de la Minera Las Palmas, en la comuna de Penciahue, liberando aproximadamente el 80% del volumen total del material tóxico. La extensión directamente afectada fue de aproximadamente 10 hectáreas, generándose como consecuencias el accidente fatal de 4 personas residentes en una vivienda cercana, la obstrucción con material de desecho de los esteros aledaños “Los Ladrones” y “Las Palmas” y la dispersión del mismo en suelos aledaños de particulares (Ramirez, 2010). El yacimiento aurífero ubicado en la localidad de Las Palmas de Tapihue, fue explotado entre 1980 y 1997 por la empresa Cominor, propiedad del holding minero del Grupo Francisco Javier Errázuriz, utilizando procesos de flotación y cianuración (Milán, 2001). La comuna de Penciahue se ubica a 15 km al noroeste de Talca, en la VII Región del Maule. Su población supera las 8300 personas, de las cuales el 75,5% se encuentra en sectores rurales. Se enmarca en los relieves de la sección oriental de la Cordillera de la Costa, ubicándose entre el río Mataquito por el norte, el río Maule por el sur, el río Claro por el este y por el oeste con la cordillera de la costa. Cuenta con una superficie de 957 Km², limitando al norte con la comuna de Sagrada Familia, de la provincia de Curicó; al sur con la comuna de San Javier, de la provincia de Linares y la comuna de Maule; al oeste con las comunas de Curepto y Constitución; y al este con las comunas de San Rafael y Talca (I. Municipalidad de Penciahue, 2007). La Figura 2 indica la ubicación y los principales centros urbanos de la comuna de Penciahue.

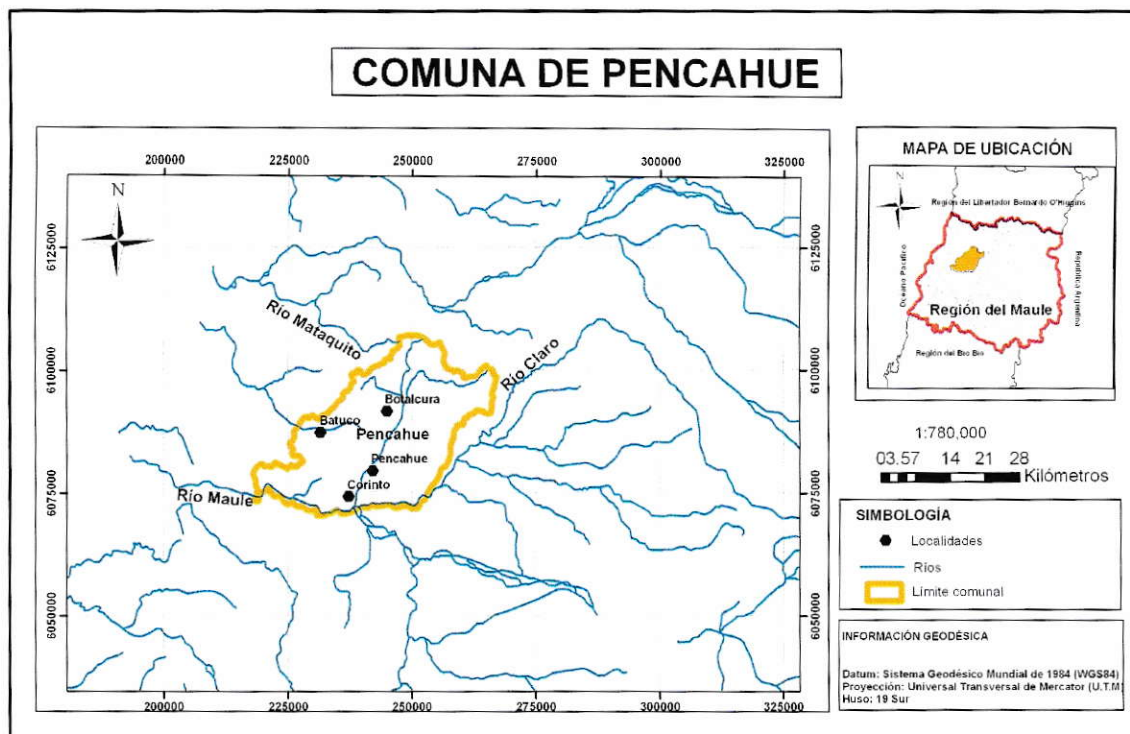


Figura 2. Ubicación de la comuna de Pencahue y sus principales centros urbanos.

1.6.1.- Productividad y usos del suelo

Entre las actividades económicas de la comuna, favorecidas por el sistema hídrico que se desarrolla a lo largo de la cuenca del estero los Puercos (entre Botalcura y Corinto), se encuentra la actividad agrícola con producción de maíz, hortalizas, frutales y viñedos, olivares para la producción de aceites, bosques de robles, pino y eucaliptos, además de la crianza de ovinos, bovinos, alpacas y ñandúes.

Es la agricultura la actividad económica más importante, pues concentra el 65% de las fuentes de trabajo de la población.

Tomando como referencia la división de la comuna realizada en el Plan de Desarrollo Comunal de la comuna para los años 2008-2012, en la Figura 3 se indica

esquemáticamente la cuenca del Estero Los Puercos, incluyendo las zonas de Tapihue, Botalcura, Rinconada, Lo Figueroa, Pencahue y Corinto.

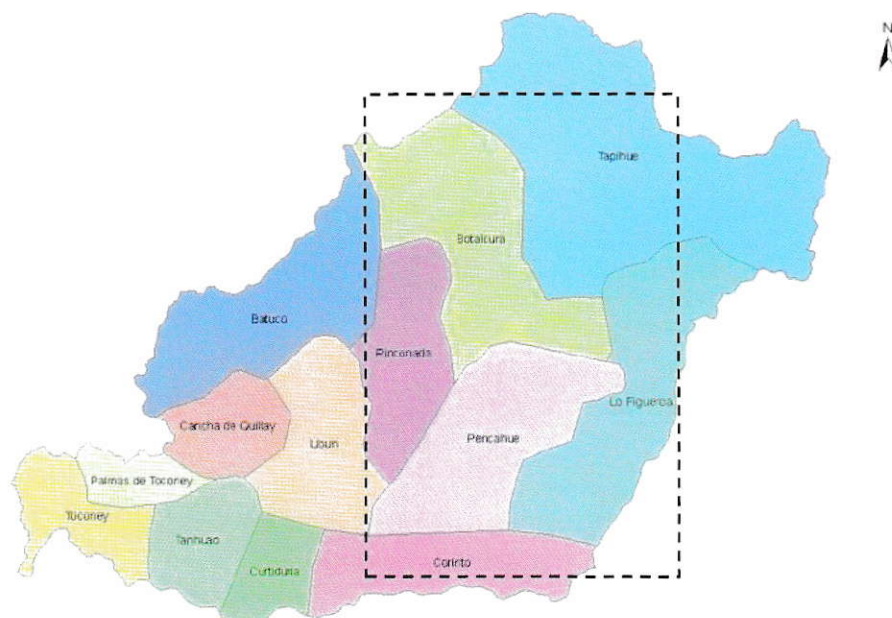


Figura 3. Delimitación esquemática de la cuenca del Estero Los Puercos en la comuna de Pencahue (I. Municipalidad de Pencahue, 2007).

La Tabla 3 indica el detalle de las actividades productivas en la zona de estudio, subdivididas en localidades. En el sector de Tapihue existe crianza de ovejas, apicultura y plantaciones de trigo. En Botalcura se encuentran plantaciones de maíz, tomate y otras hortalizas. En el sector de Lo Figueroa se desarrollan cultivos de Berries, Arándanos y hortalizas. En Rinconada existe apicultura y viñas. En la zona de Pencahue se destacan los cultivos de tomates y viñas. En el sector de Corinto existe amplias plantaciones de tomate y cultivos tradicionales. Cabe destacar que el ítem “Valle Regado” corresponde a todas las tierras que se encuentran bajo cota del canal Pencahue de 10.000 ha (I. Municipalidad de Pencahue, 2007).

Tabla 3. Actividades productivas en las zonas de la cuenca del Estero Los puercos.

Sector	Producción								
	Apicultura	Viñedos	Hortalizas	Tomates	Trigo	Maiz	Berries y Arándanos	Ganadería ovina	
Tapihue	X				X			X	
Botalcura		X	X	X		X			
Lo Figueroa			X				X		
Rinconada	X	X							
Corinto				X					
Pencahue		X	X			X			
Valle Regado		X		X		X			

1.6.2.- Sistema hidrológico

La cuenca del Estero Los Puercos forma parte de la hoya del río Maule, el cual nace en la laguna del Maule, casi en el límite con Argentina; a 90 km. de su origen el río Maule expande su cauce para atravesar la llanura aluvial central y adentrarse en la Cordillera de la Costa.

La comuna de Pencahue comprende toda la cuenca hidrográfica del Estero Los Puercos, la cuenca superior del Estero Batuco, aportante de la Cuenca del Río Huenchullamí, y parte de las terrazas fluviales del lado norte del Río Claro, al oeste de Talca . El principal cauce de agua que abastece a la comuna es el Estero Los Puercos,

cuyo sistema hídrico desarrolla la actividad agrícola, dicho estero nace de la confluencia del Estero Tapihue con el Estero Lilú, este último alimentado por la Quebrada Los Peumos. Luego de recorrer algunos kilómetros en dirección sur, el Estero Los Puercos recibe las aguas del Estero Las Palmas, el cual tiene al Estero Pichinguileo como su principal afluente. Aguas abajo, el Estero Los Puercos recibe desde el Oeste al estero Botalcura, y desde el Este a los Esteros Tutucura y Cunculén. Finalmente, vierte sus aguas en el Río Maule, a menos de un kilómetro aguas abajo de la confluencia del Río Claro con este último (Infracon, 2006). En la Figura 4 se presenta el sistema hidrológico, incluyendo fotos de las zonas de interés.

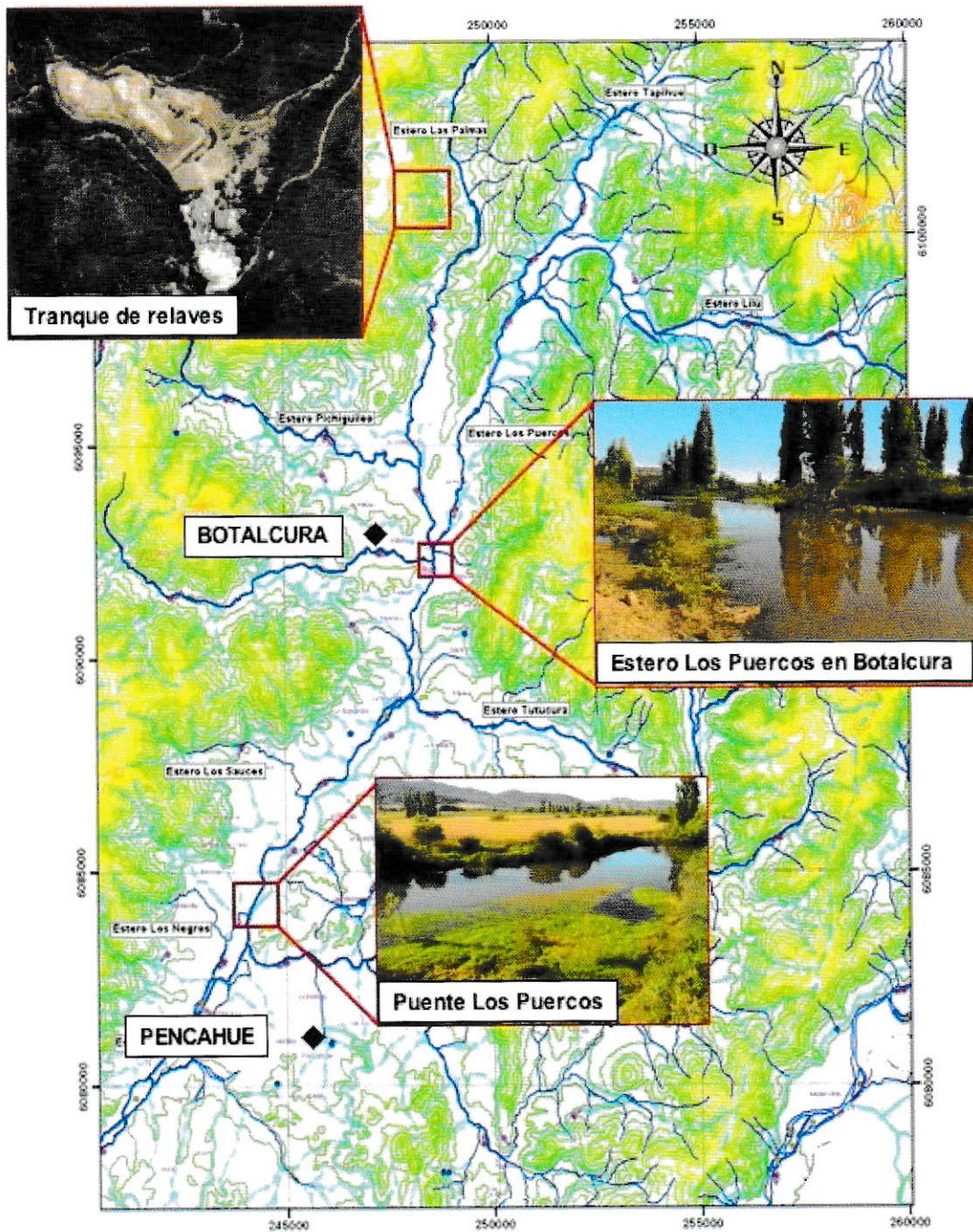


Figura 4. Cuenca del Estero Los Puercos y ubicación del tranque de relaves y de los principales poblados.

Todos los sistemas hidrológicos de la cuenca poseen alimentación pluvial, con un régimen que sigue muy de cerca la distribución de las precipitaciones durante el año. Salvo situaciones de lluvias extemporáneas, en su comportamiento anual suele registrarse incremento de los caudales en invierno y déficit de escorrentía en verano. Dadas las características hidrogeológicas de los acuíferos, principalmente su impermeabilidad y escasa capacidad de almacenamiento, los aportes de aguas de vertientes son muy leves, lo cual contribuye a marcar aún más las diferencias estacionales de los caudales (Infracon, 2006).

La Dirección General de Aguas, a través de su Departamento de Hidrología, obtiene información de caudales diarios desde la estación pluviométrica "Pencahue", ubicada en el mismo pueblo, y de precipitaciones diarias desde la estación pluviométrica "Puente Los Puercos", ubicada en el estero del mismo nombre. Los procesos de Validación y Calibración de los datos mencionados fueron realizados entre 1986-1989 y 1990-1993, respectivamente.

El gráfico de la Figura 5, que se presenta a continuación, compara el promedio de los caudales medios mensuales con el promedio de las precipitaciones mensuales, además del promedio interanual de los caudales máximos mensuales observados entre los años 1990 y 2001.

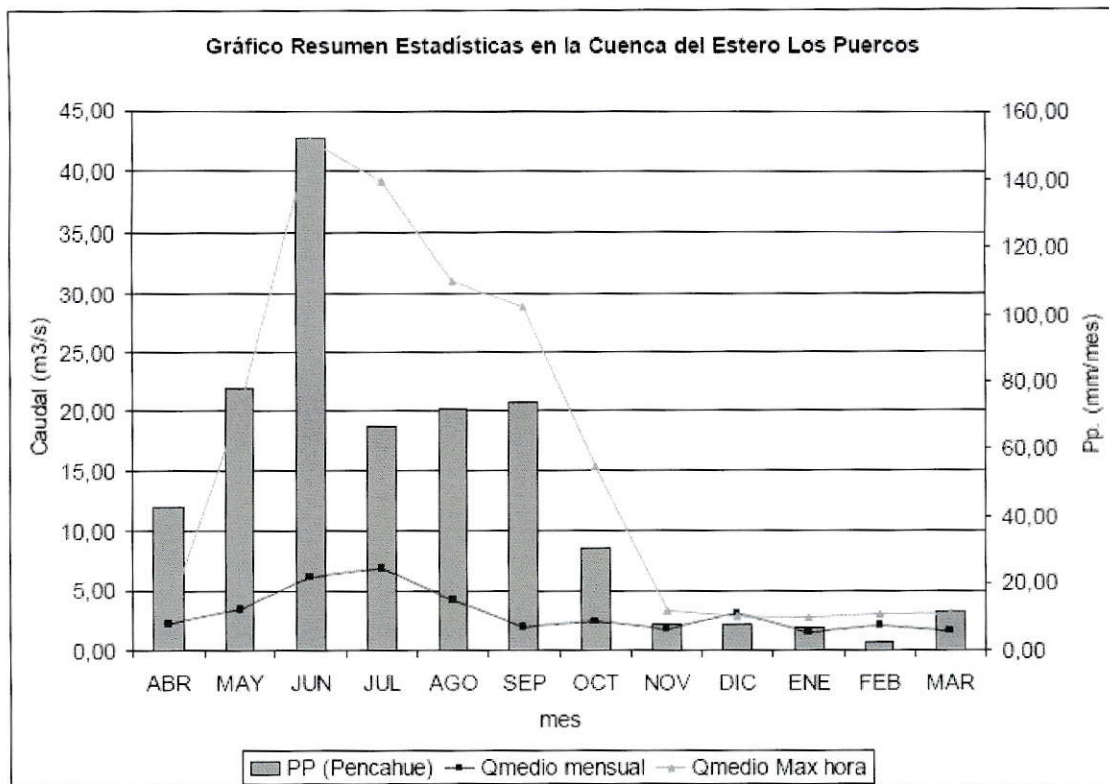


Figura 5. Régimen pluvial anual y causales medios mensuales del Estero Los Puercos en el período 1990-2001 (Santander, 2004).

A partir de información entregada por la estación pluviométrica Estero Los Puercos en Puente Los Puercos entre 1990-2001, se tiene un caudal medio anual de $2,8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Por su parte, la estación fluviométrica da cuenta de que la precipitación media anual es igual a 582 (mm/año) (Santander, 2004).

Cabe destacar que desde 1993 se implementó el sistema de canales Pencahue, lo que generó una intervención notoria en los caudales. Hasta Febrero de 1994 el caudal del estero se mantuvo entre $1 \text{ y } 2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, pero desde esa fecha se observa un incremento considerable (DGA, 2005).

Las fuentes más importantes de obtención de agua de regadío en la comuna son:

- Embalse Las Doscientas, ubicado en el centro de la cuenca del Estero Los Puercos, que con una capacidad de almacenaje menor a 500.000 m³, tiene una capacidad de regadío de aproximadamente 100 ha.
- Canales locales, entre los que se encuentran el Canal Corinto y Canal La Chimba. El primero capta agua desde el Río Claro, al Sur de la comuna, para regar la parte occidental de las terrazas fluviales en los alrededores del Bajo de Corinto (500 ha), y el segundo, con bocatoma desde el río Maule y tiene una capacidad de riego de 200 ha.
- Canal Penciahue, con bocatoma del Río Lircay, afluente del río Maule al norte de Talca, y conducción hasta la cuenca del Estero Los Puercos por el sur, se bifurca dando origen a dos canales matrices: el Canal Penciahue Oriente y Canal Penciahue Poniente, que riegan efectivamente 7000 ha.

1.6.3.- Formación geológica

Litológica y estructuralmente, el área de la Comuna de Penciahue está conformada principalmente por formaciones de rocas sedimentarias cretácicas, localmente afectadas por manifestaciones volcánicas secundarias y por cuerpos intrusivos graníticos cretácico-terciarios. Los conjuntos rocosos que se encuentran son: Basamento Granítico, Formación Lo Valle, Intrusivos graníticos Jurásicos.

La formación Lo Valle corresponde al conjunto de relieves que conforma casi la totalidad la cuenca del estero Los Puercos, esta se encuentra conformada por una secuencia de rocas volcanoclásticas integrada por lavas andesíticas y riolíticas, ignimbritas y brechas, con escasas intercalaciones locales de tufitas y areniscas (Infracon, 2006).

Entre las rocas que componen dichos conjuntos se encuentran las tonalitas, dioritas y granodioritas, que pertenecen a las series conocidas como Feldespatos Potásicos y Plagioclasas. La estructura general de los Feldespatos es: XZ_4O_8 , donde:

X: Ba, Ca, K, Na, NH_4 , Sr

Z: Al, B, Si

Mientras las Plagioclasas se encuentran como los minerales Albita ($NaAlSi_3O_8$) y Anortita ($CaAl_2Si_2O_8$) (UPM, 2000).

Particularmente, en el yacimiento Las Palmas el oro se encontraba asociado a la blenda (ZnS), la galena (PbS) y la pirita (FeS_2), sin embargo, puede encontrarse también cuarzo bandeado con pirita, calcopirita y specularita. El tratamiento de obtención de oro en la faena constaba de los procesos de extracción, chancado, molienda, lixiviación por agitación, adsorción por carbón activado, reextracción, electrodeposición, fusión y flotación de Zn y Pb (Milán, 2001).

1.6.4.- Condiciones atmosféricas

La hoya del río Maule, dentro de la cual se encuentra la cuenca del Estero Los Puercos, se encuentra sometida a dos regímenes circulatorios muy diferentes en las estaciones extremas: en verano, el desplazamiento hacia el sur del anticiclón del Pacífico subtropical trae consigo condiciones de tiempo estable, asoleadas y secas, sólo interrumpidas por incursiones frontales muy ocasionales; durante el invierno, el desplazamiento hacia el norte del anticiclón permite que los sistemas depresionarios que se desplazan hacia el este traigan consigo tiempo variable y frecuentes precipitaciones debidas a los sistemas frontales asociados.

En general, los montos de precipitación aumentan desde la costa hacia la Cordillera de Los Andes, y en menor medida de norte a sur. La influencia del relieve local introduce

modificaciones a este esquema simplificado en el litoral, las precipitaciones alcanzan alrededor de 850 milímetros, valores que se incrementan hasta cerca de 1000 mm en las cumbres de la cordillera de la Costa y descienden a 700 mm en los alrededores de Talca. Estos valores reducidos se deben a la sombra pluviométrica generada por la cordillera y los vientos NW que acompañan a las tormentas ciclónicas.

Respecto a las precipitaciones, el 60% cae en los meses de invierno y entre un 3 a 6% en los meses de verano. El carácter ciclónico de la lluvia se refleja en su duración que en general no excede de los dos días en promedio a lo largo del año, y en la duración de los periodos secos que de verano a invierno oscilan entre 30 y 5 días.

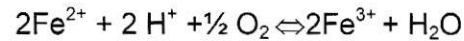
Para la comuna de Penciahue, las temperaturas registradas en la Estación del mismo nombre, indican que la temperatura media anual es alrededor de los 14, 9 °C,

Respecto al viento, este es un elemento extremadamente susceptible a las influencias geográficas locales, de modo que, en general, carece de una representatividad regional. El valle central, representado por Talca, muestra variaciones analógicas en el agua y suelo, ya que existen procesos naturales con dos diferencias apreciables: la ausencia de vientos SW en el verano, debido al flujo guiado por la orografía al Oeste de la ciudad, y una mayor frecuencia de calmas (33%) en invierno (Infracon, 2006).

1.6.5.- Otros antecedentes

Es importante conocer el comportamiento químico de las especies que se encuentran en el agua y suelo, ya que existen procesos naturales de transformación que pueden ser influenciados por elementos incorporados por la actividad humana.

- El proceso de oxidación de Hierro a partir de la pirita (FeS_2) se conoce drenaje ácido de minas (DAM). A continuación se muestra la representación estequiométrica del DAM (Snoeyink & Jenkins, 1995):



- El Aluminio, a pH cercano al neutro, puede formar complejos hidroxialuminio (III) polinucleares, como muestra a continuación (Snoeyink & Jenkins, 1995):



- Generalmente, el Manganeseo (presente en rocas metamórficas) tiene un comportamiento similar al Hierro: ambos pueden ser asociados a aguas de desecho de actividades mineras, pueden ser quelatados por materia orgánica o formar complejos según el estado de oxidación, pH, equilibrio entre bicarbonato-carbonato-OH y la presencia de otros materiales. Respecto a la solubilidad, se observa que en ausencia de oxígeno se incrementa, por ejemplo, en pozos profundos (Kemmer & McCallion, 1989). Por su parte, el carácter anfótero del Aluminio le permite encontrarse como Al^{3+} o como formas hidroxílicas, con valencias menores a pH bajo y altas a pH alto.
- Las actividades económicas que se desarrollan en la comuna podrían representar fuentes de contaminación puntuales o dispersas, por ejemplo, debido al uso o mala manipulación de elementos nocivos. Así, los amplios cultivos de vid entre Botalcura y Pencahue podrían ser fuente de pesticidas y plaguicidas, y la faena minera de Oro y Cobre "Chépica", ubicada al Este de Pencahue, podría incorporar metales pesados asociados al proceso.

1.7.- HIPOTESIS

“Producto del colapso del tranque de relave de mineral aurífero Las Palmas, existe contaminación por metales pesados en los recursos hídricos y suelos de la cuenca del Estero Los Puercos”.

1.8.- OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar la existencia de contaminación por metales pesados en la cuenca del Estero Los Puercos, posterior al colapso del tranque de relave Las Palmas en la localidad del mismo nombre.

Objetivos específicos

- Establecer el área potencialmente afectada por el material de relave de la Minera Las Palmas.
- Realizar un diagnóstico del escenario actual en la zona directa y potencialmente contaminada, y proyectar el comportamiento del sistema.
- Obtener y analizar muestras representativas de agua y/o suelo en la zona impactada y en puntos no afectados, realizando una lectura general de los parámetros a analizar.
- Comparar los resultados obtenidos con los límites máximos permitidos según la normativa vigente o valores de referencia, según sea necesario, para determinar el grado de contaminación en la cuenca.
- Aportar antecedentes y proponer recomendaciones a la comunidad y autoridades locales, que apunten a orientar eventuales estudios que puedan realizarse a partir de la información proporcionada.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1.- Muestreos

2.1.1.- Criterios de selección de las zonas de muestreo

La selección de los puntos de muestreo consideró los siguiente criterios:

- fuentes de agua: superficial, subterránea, potable;
- ubicación respecto del tranques de relaves colapsado;
- usos relevantes del agua;
- facilidad en el acceso.

Se escogieron 3 zonas dentro del valle:

- Tapihue: correspondiente al sector norte de la cuenca, donde se encuentra el tranque de relaves colapsado. Se tomó muestras de agua superficial y subterránea, de suelo y del material de relave, y además se incluyó el agua de una vertiente cercana como muestra de referencia. En la zona se desarrolla apicultura, ganadería ovina y plantación de pinos.
- Botalcura: se encuentra en la sección media de la cuenca y cuenta con numerosas plantaciones de maíz y viñedos. Se tomó muestras de agua superficial y suelo.
- Pencahue: corresponde al sector sur de la cuenca, cercano a la desembocadura del estero Los Puercos en el río Maule. Existen plantaciones de tomate y trigo, y cuenta con la mayor cantidad de habitantes de la zona de estudio. Se incluyeron muestras de agua superficial, subterránea y suelos.

2.1.2.- Campañas de muestreo

Las campañas de muestreo se realizaron en Marzo, Julio y Octubre del año 2010, información que se detalla en el ANEXO 3 y se presenta resumida en la Tabla 4.

Tabla 4. Fechas y alcances de las campañas de muestreo.

Campaña	Fecha	Alcances
I	21/03/10	Realizada a 1 mes del colapso del tranque, el material aún permanece expuesto en el lugar. Se abarcó los 3 sectores propuestos, incluyendo 5 muestras de agua.
II	22/07/10	Realizada pocos días después de primeras lluvias de la estación, cuando los caudales han aumentado considerablemente. Se abarcó sólo el sector "Pencahue" con 3 muestras de agua.
III	7/10/10	Realizada en época estival, cuando existe un aumento de las temperaturas, disminución de precipitaciones, la estabilización de los caudales en los canales de regadío. Se abarcó todos los sectores propuestos, incluyendo la mayoría de las muestras de agua de la primera campaña; además, se tomaron muestras de suelo.

En las campañas se incluyeron muestras de agua del estero Los Puercos (superficial) , y fuentes subterráneas tales como norias, pozos o vertientes, ambas utilizadas tanto para riego como para consumo humano y animal. Además, se tomaron muestras de suelo superficial (0-10 cm) y profundo (40-50 cm), y se obtuvo información de parámetros medidos in-situ (pH y conductividad eléctrica). Las Tablas 5 y 6 indican los puntos de muestreo de agua y suelos, respectivamente, señalando las zonas establecidas e indicando ubicación y fuente de cada una.

Tabla 5. Ubicación y fuente de los puntos de muestreo de agua.

Zona de Muestreo	Muestra	Ubicación	Fuente
"Tapihue"	I-A	Hacienda Las Palmas	Subterránea
	III-A	Estero Los Ladrones	Superficial
	I-B / III-B	Las Palmas Sur	Superficial
"Botalcura"	I-C / III-C	Estero Los Puercos	Superficial
"Pencahue"	I-E / II-A / III-E	Matancilla	Subterránea
	I-D / II-B / III-E	Estero los Puercos	Superficial
	II-C	Pencahue urbano	Subterránea

Tabla 6. Ubicación y fuente de los puntos de muestreo de suelos (7/10/10).

Sector	Nombre	Tipo de muestra	Descripción del lugar
"Tapihue"	S-01	Material de relave	El material de relave permanece depositado en suelos aladaños y en contacto directo con los esteros "Los Ladrones" y "Las Palmas"
	S-02	Suelo profundo (40-50 cm)	
"Botalcura"	S-03	Suelo superficial (0 -10 cm)	Plantación de maíz cercana al estero Los Puercos en Botalcura
	S-04	Suelo profundo (40-50 cm)	
"Pencahue"	S-05	Suelo superficial (0 -10 cm)	Predio dispuesto para siembra de maíz en el sector de Matancilla, cercano al puente Los Puercos
	S-06	Suelo profundo (25-35 cm)	

Las zonas escogidas y los puntos de muestreo para agua y suelo se señalan específicamente en la Figura siguiente. Los círculos rojos corresponden a las muestras de agua, los números romanos a la campaña (según la Tabla 4), y los rombos café a las muestras de suelo, agrupadas según el sector.

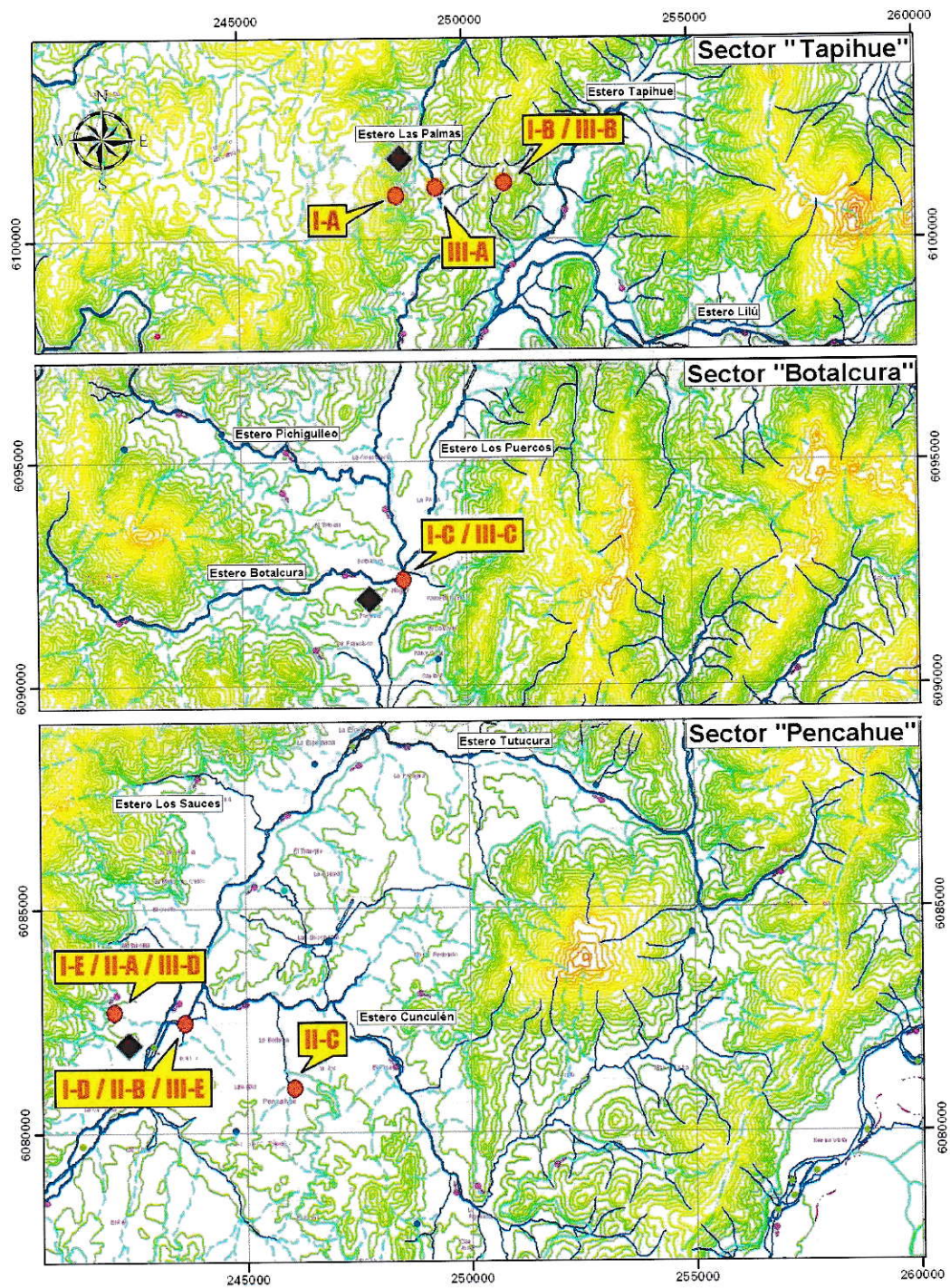


Figura 6. Zona de estudio e identificación de puntos de muestreo de agua (círculos) y suelos (rombos) en la cuenca del estero Los Puercos.

2.1.3.- Toma y preservación de muestras de agua y suelo

La preparación de los recipientes y preservación de cada muestra se realizó según recomienda el Manual de Métodos Estandarizados para Análisis de agua (Ver ANEXO 4: Metodología de recolección y preservación de muestras).

i. Materiales

- Frascos plásticos de alta densidad de 1 L
- Recipiente plástico de 5 L
- Bolsas con cierre hermético
- Pala
- Nevera, “gelpack” (para refrigeración)
- Fichas de muestreo

ii. Instrumentos

- pH-metro The Oyster, modelo: The EZDO pp-203
- Conductímetro Delta OHM HD9213

iii. Procedimiento

Para la toma de muestras de agua se realizaron los siguientes pasos:

- se lavó 3 veces el recipiente de 5 L para ambientar con el agua que sería colectada,
- se distribuyó la muestra total en frascos plásticos de 1 L, previamente identificados,
- se realizaron mediciones in-situ de pH y conductividad mediante el uso de equipos portátiles,

- se almacenaron las muestras en frío dentro de la nevera,
- se realizó el registro escrito de las condiciones de muestreo (Ver ANEXO 1: Fichas de muestreo)

Las muestras de suelo fueron obtenidas con una pala, homogenizándolas antes de ser depositadas en bolsas herméticas identificadas. Posteriormente se preservaron en frío.

2.2.- Análisis de muestras en laboratorio

Se realizaron análisis en el Laboratorio de Química Analítica de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile y en el Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA).

2.2.1.- Preparación de muestras de agua

i.- Instrumentos y materiales

- Bomba de vacío
- Embudo Büchner
- Papel filtro celulosa 0,45 μm Millipore
- Frascos plásticos de alta densidad de 1 L

ii.- Reactivos

- HNO_3 concentrado 65% Suprapur[®] (Merck)

iii.- Procedimiento

Las muestras de agua fueron filtradas al vacío con un diámetro de poro de 0,45 μm , preservadas con HNO_3 concentrado ($\text{pH}<2$) y almacenadas en botellas plásticas de 1 L a 4 °C.

2.2.2.- Determinación de Zinc, Cadmio y Plomo en muestras de agua

Para la determinación Zn, Cd y Pb solubles en muestras de agua se utilizó la técnica de Voltametría de Redisolución Anódica (VRA). Previo al análisis se realizaron curvas de calibración para determinar los límites de detección y cuantificación de cada metal (Ver ANEXO 5: Cálculo de Límites de Detección para VRA).

i.- Fundamento de la técnica

Las técnicas voltamperométricas de redisolución están basadas en la preconcentración de un analito presente en disolución en un pequeño volumen o en la superficie de un electrodo, y en su posterior redisolución desde ese electrodo mediante el uso de una corriente eléctrica.

La Voltamperometría de Redisolución Anódica se usa para la determinación de iones metálicos. La primera etapa de electrodeposición catódica se lleva a cabo en una disolución agitada a potencial constante (E_d), en la cual los iones metálicos son reducidos y concentrados en un electrodo, generalmente de mercurio. Posteriormente, se mantiene un breve período de espera o reposo (t_r), deteniendo la agitación y manteniendo el potencial aplicado. Finalmente, se realiza la etapa de redisolución, donde los metales electrodepositados son redisueltos aplicando un potencial hacia valores más positivos que el de deposición (Pingarrón, 2003). Se presenta a continuación un esquema que representa el fundamento de la técnica:

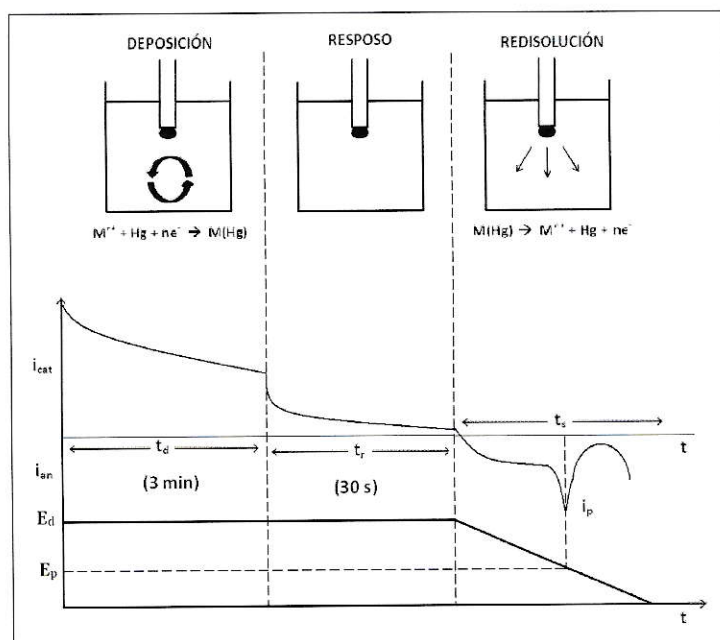


Figura 7. Fundamento esquemático de la VRA (Pingarrón, 2003).

ii.- Equipos

- Analizador Voltamétrico B.A.S. (Bioanalytical system), modelo CV 50W
- Balanza analítica Sartorius research
- Frascos plásticos de alta densidad de 1 L
- Micropipetas de 100 y 1000 μL
- Material de vidrio clase A (matraces de aforo, pipetas volumétricas)

iii.- Reactivos

- KCl p.a. (Merck)
- H_2SO_4 concentrado 97% Suprapur® (Merck)
- Tritisol® estándar de 1000 mg L^{-1} de Hg
- Tritisol® estándar de 1000 mg L^{-1} de Pb
- Tritisol® estándar de 1000 mg L^{-1} de Cd
- Tritisol® estándar de 1000 mg L^{-1} de Zn
- AGA® Nitrógeno extra puro
- Agua MilliQ 18,2 $\mu\text{S cm}^{-1}$.

iv.- Procedimiento

Se programó el equipo en el modo "Stripping Techniques", Linear Sweep Stripping Voltametry (LSSV), y se ajustaron los parámetros de medición. Luego se agregó 20 mL de electrolito soporte (0,1 M KCl + $4E10^{-4}$ M Hg para Pb y Cd; y 1M H₂SO₄ + $4E10^{-4}$ M Hg para Zn) a la celda plástica para instalarla en la base del equipo, se conectó los electrodos y se aplicó Nitrógeno gaseoso como mínimo durante 3 minutos. Se aplicó el programa para la obtención de la línea base y luego se agregó 3 mL de muestra aplicando el mismo programa. La Figura 8 representa esquemáticamente el montaje experimental, indicando los electrodos utilizados y las condiciones de trabajo.

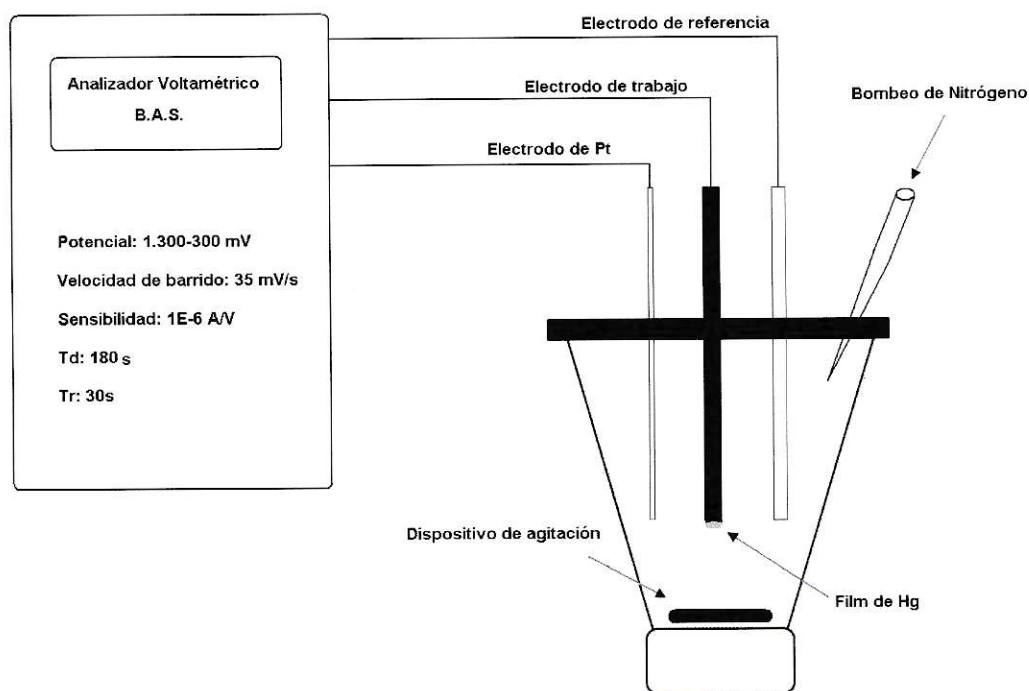


Figura 8. Representación esquemática del montaje experimental para VRA.

2.2.3.- Determinación de metales totales en muestras de agua y suelo

La determinación de Cromo, Cobre, Níquel Vanadio, Selenio, Manganeso, Hierro, Aluminio, Cobalto, Molibdeno, Bario, Boro, Berilio, Plomo, Zinc, Arsénico, Cadmio en agua y suelos, fue realizada por profesionales del Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA), utilizando el Espectrómetro de Emisión Óptica con Plasma de Argón Acoplado Inductivamente ICP-OES, Optima 3300 XL-Perkin Elmer (ICP-OES).

i.- Fundamento de la técnica

En ICP-EOS la muestra es aspirada y transportada en forma líquida a un plasma de argón, el cual consiste en un flujo de gas de argón ionizado al que se aplica un campo de radio frecuencia. En el nebulizador del instrumento la muestra es convertida en un aerosol. La muestra en forma de aerosol es transportada al interior del plasma de argón donde es desolvatada, vaporizada, atomizada, excitada y/o ionizada. Los iones y átomos excitados emiten su radiación característica la cual es detectada por un dispositivo foto sensible que selecciona la radiación por longitud de onda. La radiación detectada es transformada en señales las que son convertidas en unidades de concentración (CENMA, 2009).

ii.- Equipo y condiciones de trabajo

- Equipo Utilizado : Espectrómetro de Emisión Óptica con Plasma de Argón Acoplado Inductivamente
- Equipo : Óptima 3300 XL - Perkin Elmer
- Sistema : Plasma de Argón
- Gas alimentados Plasma : Argón (80 psi)
- Gas de Purga sistema óptico : Nitrógeno (80 psi)
- Gas Shear o de corte : Aire (80 psi)
- Recirculador de Agua (CFT-33) : Agua (10 °C / 46 psi)

iii.- Reactivos

- HNO₃ Concentrado 65% (p.a), d = 1,4 Kg/L
- Agua Desionizada 18,0 MΩ
- Multiestándar de calibración, que incluye los elementos a determinar.

iv.- Procedimiento de análisis

En primer lugar se realiza la preparación de estándares de calibración en matraces aforados, previamente lavados con una solución de HNO₃ al 10% y agua desionizada. Para ello se agrega una alícuota del reactivo multiestándar y se afora con agua desionizada calidad Nanopure (18.0 MΩ) para obtener las curvas de 100-500-1000 µgL⁻¹.

Para las muestras de agua acidificadas, si no se observa material en suspensión, puede realizarse el análisis sin necesidad de utilizar la digestión en horno microondas. Durante la ejecución del análisis se debe verificar que las lecturas de concentración se encuentren dentro del rango de la curva de calibración, para ello se debe medir las muestras sin dilución, luego, evaluar la concentración aproximada de aquellas que sobrepasan el máximo de la curva, realizar las diluciones adecuadas y leer las muestras otra vez. Las diluciones deben ser registradas y no se deben extrapolar valores en la curva de calibración.

En el caso de las muestras de suelo se realiza digestión en horno microondas, que consiste en tratar la muestra con ácidos (HNO₃ y HF) y someterla a una presión y temperatura controlada en el horno, lo que propicia la disolución de la muestra. Posteriormente se sigue el mismo procedimiento de lecturas y diluciones descritas anteriormente (CENMA, 2009).

v.- Control de calidad

Los criterios de aceptabilidad y controles de calidad asociados a la lectura por ICP-OES están relacionados con la frecuencia del análisis y la inserción de elementos de control, según lo especificado en las siguientes Tablas:

Tabla 7. Criterios de aceptabilidad para lecturas de ICP-OES (CENMA, 2009).

CRITERIO DE ACEPTABILIDAD					
USO DE BLANCOS DE REACTIVOS	Uso DE MR	USO DE DUPLICADOS	USO DE SPIKE	PENDIENTE DE CURVA DE CALIBRACIÓN	COEFICIENTE DE CORRELACION CURVA DE CALIBRACIÓN
Valores < LCM	% Error \pm 20%	\pm 10% entre replicas	% Recuperación \pm 20 %	\pm 10%	$R^2 > 0,995$

Tabla 8. Protocolo de calidad para la lectura 5 y 10 muestras en ICP-OES.

(CENMA, 2009).

5 Muestras	10 Muestras
Blanco 1	Blanco 1
Estándar 1	Estándar 1
Estándar 2	Estándar 2
Estándar 3	Estándar 3
Estándar 4	Estándar 4
Estándar 5	Estándar 5
Blanco Reactivos	Blanco Reactivos
Material Referencia ^b	Material Referencia ^b
Muestra 1	Muestra 1
Muestra 2	Muestra 2
Estándar 2	Estándar 2
Muestra 3	Muestra 3
Blanco Reactivos	Blanco Reactivos
Muestra 3 -D	Muestra 4
Muestra 4	Muestra 5
Muestra 5	Blanco Reactivos
Estándar 4	Muestra 6
Blanco 1	Muestra 7
	Estándar 4
	Muestra 8
	Muestra 9
	Muestra 3 -D
	Muestra 10
	Blanco 1

^b Preparados por el analista según indicaciones. Solución: HIGH PURITY ICP-200.7-5.

2.2.4. Comparación y alcances de las técnicas utilizadas para la determinación de metales pesados

Si bien las técnicas de ICP y VRA pueden ser utilizadas de manera complementaria para la determinación de metales, existen diferencias fundamentales entre ellas, como sus alcances, los costos asociados, tiempos de análisis y los límites de detección.

La decisión de utilizar una técnica u otra tendrá directa relación con la investigación que se esté desarrollando. Así pues, si se busca obtener un panorama general respecto a metales en una matriz determinada, la técnica de ICP es la ideal, ya que a partir de una muestra de volumen mínimo es posible obtener la concentración de 18 elementos; en cambio, para realizar el seguimiento periódico de un elemento en particular, la utilización de VRA permitiría reducir costos y tiempo de análisis.

Como desventajas de las técnicas cabe mencionar los elevados costos por muestra en ICP, mientras que para VRA es indispensable un analista químico realice los análisis.

Otro aspecto de interés son los límites de detección; al compararlos, la técnica de ICP resulta ser mucho más sensible que VRA, sin embargo, ambas podrían utilizarse para la identificación y cuantificación de metales pesados. En el caso particular del cadmio medido por VRA, este no podría utilizarse debido a que el LD calculado excede el límite máximo permitido por las normas de referencia utilizadas en este estudio, lo que puede asociarse a las características propias de la técnica y del equipo. La Tabla 9 presenta comparativamente los LD de las técnicas.

Tabla 9. Límites de detección de las técnicas ICP y VRA. Comparación de con las normativas para calidad de agua utilizadas.

		LD (μgL^{-1})		Normativa vigente (μgL^{-1})	
		VRA	ICP	NCh 409/05	NCh1.333/78
Elementos	Plomo	43	8,13	50	5000
	Cadmio	167	0,67	10	10
	Zinc	408	1,36	3000	2000

2.2.5.- Determinación de cationes y aniones solubles en muestras de agua

La determinación de Aniones (F^- , Cl^- , Br^- , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} y SO_4^{2-}) y Cationes (Li^+ , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+}) en las muestras de agua fue realizada por profesionales del CENMA en el Cromatógrafo Iónico DIONEX 120.

i.- Fundamento de la técnica

La Cromatografía Iónica es una técnica analítica utilizada para la separación y determinación de especies iónicas solubles. Es clasificada dentro de los métodos cromatográficos líquido-sólido en el cual un líquido, llamado eluyente, es pasado a través de una fase estacionaria sólida (columna) y luego por un detector (CENMA, 2009).

Al eluir la muestra a través de la columna, ésta queda retenida sobre el soporte sólido por afinidad electrostática, posteriormente, dependiendo de la relación carga/tamaño, algunos constituyentes de la mezcla serán retenidos con mayor fuerza que otros, lo que provocará la separación. Los iones cuya interacción sea débil serán los primeros en salir de la columna, mientras los que interactúan con mayor fuerza, tardarán más.

Para la identificación de los elementos, se analiza el tiempo de elusión de cada uno, información conocida según las condiciones del análisis.

Los sitios activos más comunes en las resinas de intercambio catiónico son los grupos de ácido sulfónico – SO_3H^+ , (fuerte) y los de ácidos carboxílicos – COO^-H^+ (débil). Por su parte, los intercambiadores aniónicos utilizan grupos amino terciarios – $\text{N}(\text{CH}_3)_3^+\text{OH}^-$ (base fuerte) o primarios – NH_3^+OH^- (base débil) (Skoog, 2001).

ii.- Equipo y condiciones de trabajo

La Tabla siguiente presenta comparativamente los instrumentos y condiciones utilizados para la determinación de Cationes y Aniones en el equipo DIONEX 120.

Tabla 10. Condiciones de trabajo para la determinación de Cationes y Aniones utilizando el equipo DIONEX 120 (CENMA, 2003; CENMA, 2001).

	EQUIPO: DIONEX 120	
	Determinación de Cationes	Determinación de Aniones
Precolumna	IonPac CG 12	IonPac AG144x50 mm
Columna	IonPac CS12	IonPac AS14x250 mm
Eluente	Ácido Sulfúrico 22mN	Carbonato de Sodio (Na_2CO_3) 3,5 mM Bicarbonato de Sodio (NaHCO_3) 1,0 mM
Flujo Fase Móvil	1,00 mL/min. +/- 1,0%	1,37 mL/min. +/- 1,0%
Loop inyección	25 μL	100 μL
Detección	Conductividad por supresión	Conductividad por supresión
Supresor	ASRS – ultra (4 mm) in recycle mode 100 mA de corriente.	ASRS – ultra (4 mm) in recycle mode 100 mA de corriente.
Celda	CDM – 3	CDM - 3
Sistema	~ Presión 1000 psi	~ Presión 2000 psi
Conductividad	~ 2 μs	~ 17 μs

iii.- Reactivos

Determinación de Cationes

- Agua Desionizada Clase I según NCh 426/2 (resistividad entre 17,6 y 18,3 M Ω)
- Solución de H₂SO₄ 22 mM
- Solución estándar comercial de 1000 mg Na/L en medio HNO₃
- Solución estándar comercial de 1000 mg Li/L en medio HNO₃
- Solución estándar comercial de 1000 mg K/L en medio HNO₃
- Solución estándar comercial de 1000 mg Ca/L en medio HNO₃
- Solución estándar comercial de 1000 mg Mg/L en medio HNO₃
- Solución estándar comercial de 1000 mg NH₄/L en medio HNO₃
- Gases He y N₂

Determinación de Aniones

- Agua desionizada (Resistencia \geq 18,2 M Ω /cm)
- Carbonato de sodio (Na₂CO₃) , PM: 105,99 g/mol
- Hidrogenocarbonato de sodio (NaHCO₃) , PM: 84,01 g/mol
- Nitrato de plata (AgNO₃), PM: 169,87 g/mol
- Solución patrón de fluoruro de 1000 mg/L (ej. Titrisol Merck)
- Solución patrón de cloruro de 1000 mg/L (ej. Titrisol Merck)
- Solución patrón de nitrito de 1000 mg/L (ej. Titrisol Merck)
- Solución patrón de nitrato de 1000 mg/L (ej. Titrisol Merck)
- Solución patrón de fosfato de 1000 mg/L (ej. Titrisol Merck)
- Solución patrón de sulfato de 1000 mg/L (ej. Titrisol Merck)

iv.- Procedimiento de análisis

Las curvas de calibración para todas las especies se realizan en el rango 0,2-10 mgL⁻¹, incorporando además, para el Cloruro y Sulfato, un rango entre 10-50 mgL⁻¹.

Al encender el equipo se debe dejar ambientar a lo menos durante 20 minutos y verificar que las condiciones de trabajo estén correctamente ajustadas, entre ellos, el flujo, la presión, el eluyente, etc. Posteriormente, para asegurar la calidad de las mediciones, es necesario verificar la linealidad de la curva de calibración y los tiempos de retención, cuantificando dos estándares de diferentes concentraciones y realizando las lecturas correspondientes. Una vez asegurado el buen funcionamiento del equipo es posible realizar el análisis de las muestras, incorporando blancos y materiales de referencia (CENMA, 2003).

v.- Control de calidad

Para asegurar la calidad de los análisis se cuenta con criterios de aceptabilidad y con el protocolo de lectura según el número de muestras, presentados en las Tablas 11 y 12, respectivamente.

Tabla 11. Criterios de aceptabilidad para lecturas de Cromatografía Iónica (CENMA, 2003).

Elementos de control de calidad	Criterio de Aceptabilidad
Blanco de reactivos	<LD
Material de Referencia de control de calidad	Error \pm 15%
Material de Referencia Certificado	Según certificado
Spike	% de recuperación \pm 25%
Duplicado	\pm 10%
Coefficiente de determinación (r^2)	>0,995
Pendiente	\pm 10% respecto de validación

Tabla 12. Protocolo de calidad para la lectura de muestras por Cromatografía Iónica
(CENMA, 2003).

N° muestras	N° Blancos	N° MR y/o MRC	Duplicado o spike
1 – 5	1	1	0
6 – 10	1	1	1
11 – 20	2	2	2

vi.- Alcances y limitaciones de la técnica

Debido a su capacidad de concentrar iones, la Cromatografía de Intercambio Iónico permite detectar trazas de elementos metálicos en aguas naturales que puedan estar muy diluidos. Además de separar las especies iónicas orgánicas e inorgánicas, es capaz de eliminar iones que en otras condiciones actúan como interferentes como son el Fe (III) y Al (III).

Por sí misma, la Cromatografía Iónica permite realizar un análisis cualitativo y cuantificar la muestra. El análisis cualitativo se basa en la información entregada por los cromatogramas, donde parámetros como el tiempo de retención o posición en la fase estacionaria tras cierto período de elución de los analitos, permiten establecer la presencia de múltiples elementos, mientras que el análisis cuantitativo se basa en la comparación de las alturas o áreas de los picos correspondientes a cada analito.

Entre las ventajas del método se cuenta la rapidez, sencillez, relativo bajo costo del análisis, y la amplia aplicabilidad como técnica de separación. Entre sus desventajas puede mencionarse la necesidad de liberar a las muestras de cualquier material en suspensión antes de inyectar, debido a que pueden producir el colpaso de la columna y el eventual deterioro del equipo (CENMA, 2003).

2.3.- Procesamiento de información

Para facilitar el análisis y expresión de la información recopilada, se establecieron dos criterios:

- i) se dividió la cuenca en 3 secciones: Tapihue (cerca al tranque de relaves), Botalcura (sector medio) y Pencahue (cerca a la desembocadura del estero Los Puercos) y,
- ii) se evaluaron separadamente los metales pesados que se encuentran naturalmente en la litósfera (hierro, manganeso, aluminio, zinc) de los que han podido incorporarse producto de la actividad minera (cadmio, plomo, arsénico).

Los resultados obtenidos fueron comparados con normas chilenas de calidad, en el caso de aguas, y con normas de referencia en el caso de suelos. Así, dadas las fuentes de agua muestreadas, las normas de calidad utilizadas fueron la NCh409/1 Of.2005 para el agua de potable y la NCh1.333 Of.1978 para agua de riego, mientras que en el caso de los suelos, se utilizaron como referencia los valores normales en la litósfera documentados y las normas internacionales suiza y canadiense propuestas por el Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. Además, los suelos fueron evaluados considerando la concentración de metales del material de relave y la profundidad de las muestras, dándole énfasis a los elementos antes mencionados.

Además, a partir de los valores de pH obtenidos en terreno se calculó la especie carbonatada más abundante en el agua muestreada.

III. RESULTADOS

3.1. Caracterización in-situ de pH y CE

Los valores de pH se encuentran entre 6,7 y 8,1, no superando en ningún caso la NCh409/1.Of2005 para el agua de potable ni la NCh1.333.Of1978 para agua de riego (ver ANEXO 7: Calidad de agua según norma que aplica). Por su parte, la Conductividad Eléctrica presenta valores muy bajos al compararlos con la NCh1.333/78 (la NCh409/1.Of2005 no considera la CE).

Para un análisis completo se trabajó sólo con las muestras de agua superficial destacadas en la Tabla 13, por contar con la mayor cantidad de información recopilada. De ellas, el agua de vertiente del sector Tapihue corresponde a la muestra control, mientras que el agua del estero Los Puercos en Botalcura y Pencahue corresponde a los sectores aguas abajo. Se excluyeron las muestras I-A y III-A por tener distintas fuentes, misma razón por que se analiza separadamente el caso del sector de Matancilla. Sólo en el sector Pencahue fue posible obtener muestras en las tres campañas de muestreo, mientras que para los otros sectores sólo se obtuvo información en la primera y tercera, en Marzo y Octubre, respectivamente.

En la Tabla 13 se presentan las mediciones de pH y CE obtenidas en terreno, señalando los nombres y ubicación de cada muestra.

Tabla 13. Resultados de pH y CE para muestras de agua, medidos en terreno.

Zona de muestreo	Muestra	Ubicación	pH	CE (μScm^{-1})
"Tapihue"	I-A	Hacienda Las Palmas ^a	7,33	169,3
	III-A	Estero Los Ladrones ^b	7,45	383
	I-B	Las Palmas Sur ^a	7,79	182
	III-B		7,81	225
"Botalcura"	I-C	Estero Los Puercos ^b	7,55	276
	III-C		8,1	180
"Pencahue"	I-D	Estero los Puercos ^b	7,58	223
	II-B		7,97	132
	III-E		8,05	195
	I-E	Matancilla ^a	6,69	290
	II-A		7,72	400
	III-D		7,26	404
	II-C	Pencahue urbano ^a	8,34	130,2

^a Agua subterránea

^b Agua superficial

La Figura 9 da cuenta del comportamiento del pH y CE en el tiempo: se observa un incremento de pH y una disminución de la CE en Botalcura y Pencahue, mientras que en Tapihue se aprecia un comportamiento sin variaciones amplias; las muestras de agua subterránea, tomadas en la localidad de Matancilla, muestran un incremento de ambos parámetros, encontrándose valores de CE en torno a los $400 \mu\text{Scm}^{-1}$ y pH menores que en los otros casos evaluados.

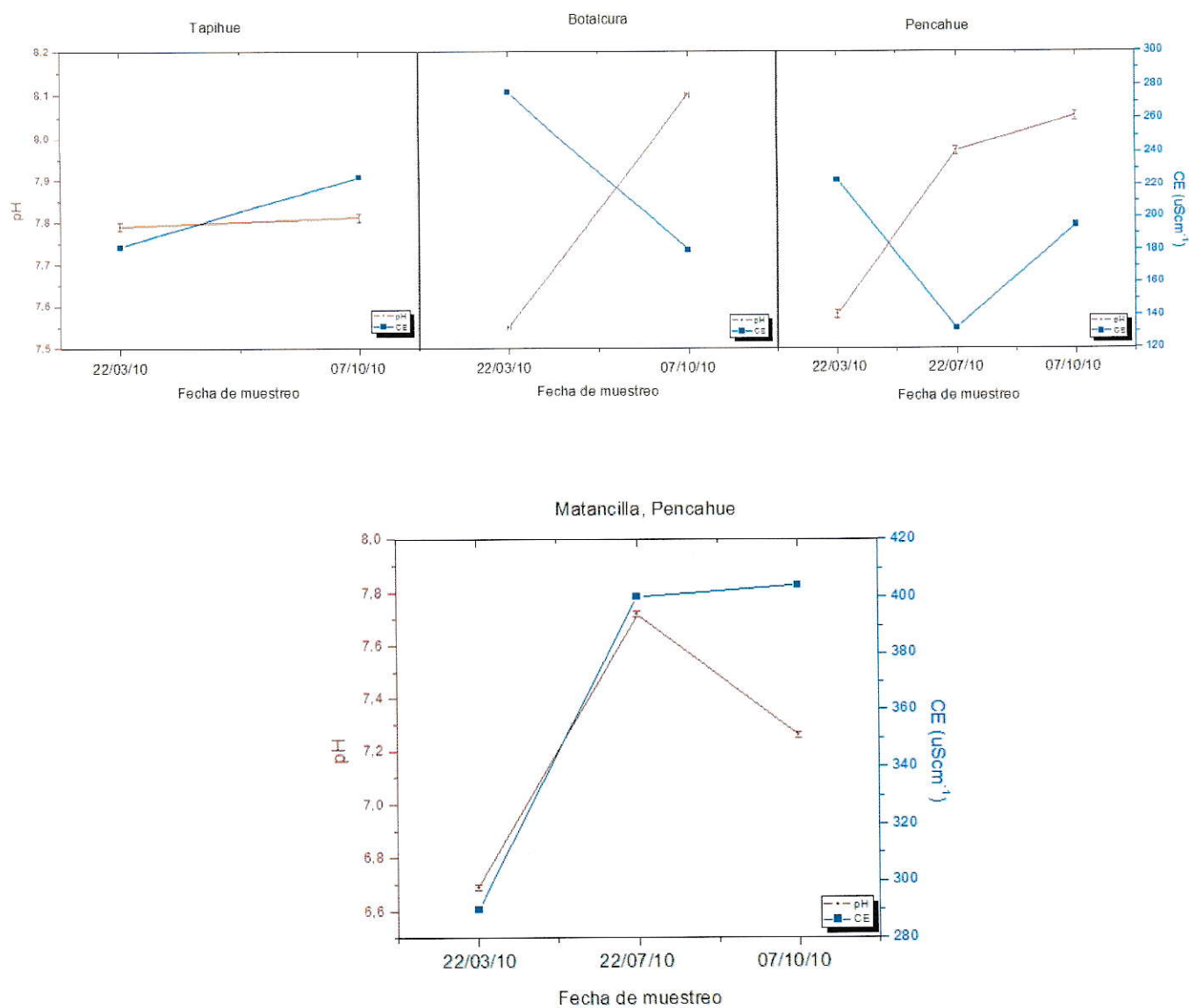


Figura 9. Valores de pH y CE, obtenidos entre Marzo y Octubre de 2011 en agua superficial y subterránea de la cuenca del Estero Los Puercos.

Al analizar los mismos parámetros, comparando esta vez la primera campaña con la tercera en función de la ubicación, se observa un incremento de pH aguas abajo, manteniéndose constante en el sector Tapihue. Por su parte, la CE tiende a la

estabilidad, presentando fluctuaciones entre 180 y $280 \mu\text{Scm}^{-1}$. La Figura 10 muestra los resultados descritos.

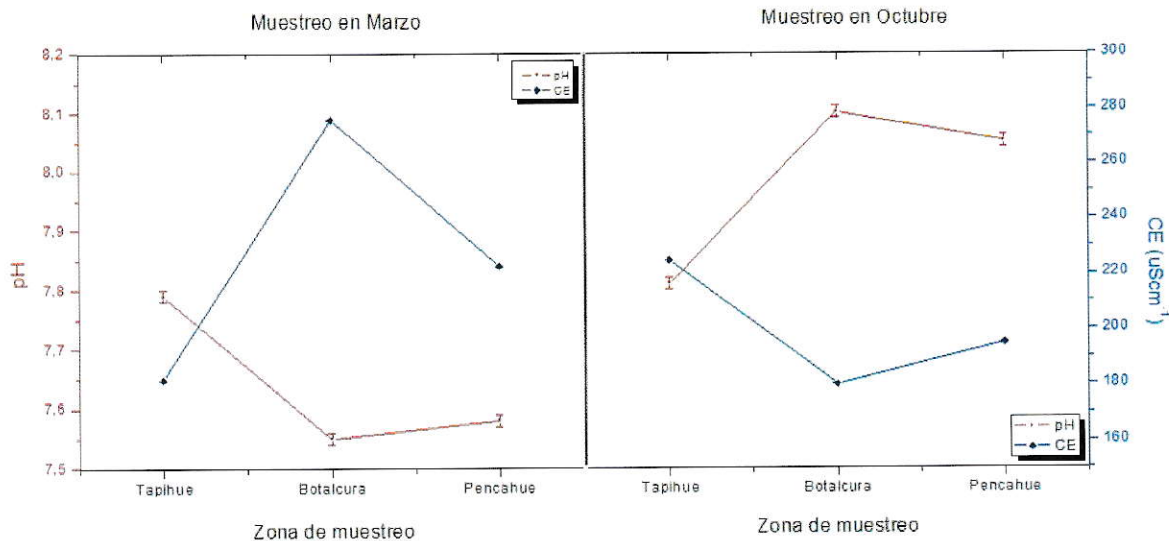


Figura 10. Comparación de los valores de pH y CE obtenidos en Marzo y Octubre en los sectores Tapihue, Botalcura y Pencahue.

Considerando que el pH del agua varía en función de los iones carbonatos en disolución, se calculó la especie predominante utilizando las ecuaciones de fracción molar (α) en función del pH (Ver ANEXO 6: Cálculo de especies carbonatadas según pH). La Tabla 14 indica que la especie predominante es HCO_3^- .

Tabla 14. Fracción molar según pH para muestras de agua.

Zona de muestreo	Muestra	pH	Fracción Molar		
			$\alpha_{\text{H}_2\text{CO}_3}$	$\alpha_{\text{HCO}_3^-}$	$\alpha_{\text{CO}_3^{2-}}$
"Tapihue"	I-A	7,33	0,09	0,90	0,00
	III-A	7,45	0,07	0,92	0,00
	I-B	7,79	0,04	0,96	0,00
	III-B	7,81	0,03	0,96	0,00
"Botalcura"	I-C	7,55	0,06	0,94	0,00
	III-C	8,1	0,02	0,98	0,01
"Pencahue"	I-D	7,58	0,06	0,94	0,00
	II-B	7,97	0,02	0,97	0,00
	III-E	8,05	0,02	0,98	0,01
	I-E	6,69	0,31	0,69	0,00
	II-A	7,72	0,04	0,96	0,00
	III-D	7,26	0,12	0,88	0,00
	II-C	8,34	0,01	0,98	0,01

3.2. Contenido de cationes y aniones en agua superficial y subterránea

El análisis de cationes y aniones permite observar que sólo existe superación de la norma para agua potable (NCh 409/1.Of2005) para el Nitrato (10 mgL^{-1}), destacado en color en la Tabla 15.

Tabla 15. Concentración de iones en muestras de agua (22/7/10).

Parámetro (mgL ⁻¹)	Muestra		
	II-A	II-B	II-C
Li ⁺	<LD	<LD	<LD
Na ⁺	26,6	8,97	14,9
NH ₄ ⁺	0,16	0,19	0,45
K ⁺	3,87	2,38	3,20
Mg ²⁺	18,0	5,67	1,80
Ca ²⁺	36,6	13,4	15,1
F ⁻	0,08	0,06	0,1
Cl ⁻	30,6	7,36	8,89
NO ₃ ⁻	53,7	5,1	3,31
SO ₄ ²⁻	23,9	12,9	8,26
PO ₄ ³⁻	0,07	0,08	0,04
Br ⁻	<LD	<LD	<LD

3.3. Contenido de Zinc, Cadmio y Plomo disueltos en agua superficial y subterránea por VRA

El contenido de los metales en las muestras de agua analizadas mediante la técnica voltamperométrica, no superan los límites de detección de la técnica calculados. Éstos son: 43 µgL⁻¹ para el Plomo, 167 µgL⁻¹ para el Cadmio y 408 µgL⁻¹ para el Zinc. Los detalles del cálculo se encuentran en el ANEXO 5.

3.4. Contenido de metales pesados en agua superficial y subterránea

Se presenta a continuación el contenido de metales pesados en agua, considerando los elementos que se encuentran naturalmente en la zona (Fe, Al, Mn, Zn), y los que podrían haber sido incorporados producto de la remoción de material rocoso del yacimiento Las Palmas (Cd, As, Pb).

Sólo en el caso del sector Pencahue se incluye información de las tres campañas de muestreo, mientras que en Tapihue y Botalcura sólo se obtuvo datos en la primera y tercera campaña.

El detalle de los resultados obtenidos puede consultarse en el ANEXO 9: Resultados para agua según sectores de la cuenca del estero Los Puercos.

3.4.1. Sector Tapihue

La Figura 11 muestra el contenido de metales pesados en agua de vertiente ubicada en Las Palmas Sur, correspondiente a las muestras I-B y III-B, las cuales, debido a su ubicación, han sido consideradas como elementos de control. Se observa un incremento de hierro ($6,9 - 31,4 \mu\text{gL}^{-1}$) y aluminio ($<9,73 - 33,34 \mu\text{gL}^{-1}$); en menor medida aumenta el manganeso ($<2,0 - 12,4 \mu\text{gL}^{-1}$), y disminuye el zinc ($27,4 - 7,3 \mu\text{gL}^{-1}$), no superándose en ningún caso los $35 \mu\text{gL}^{-1}$.

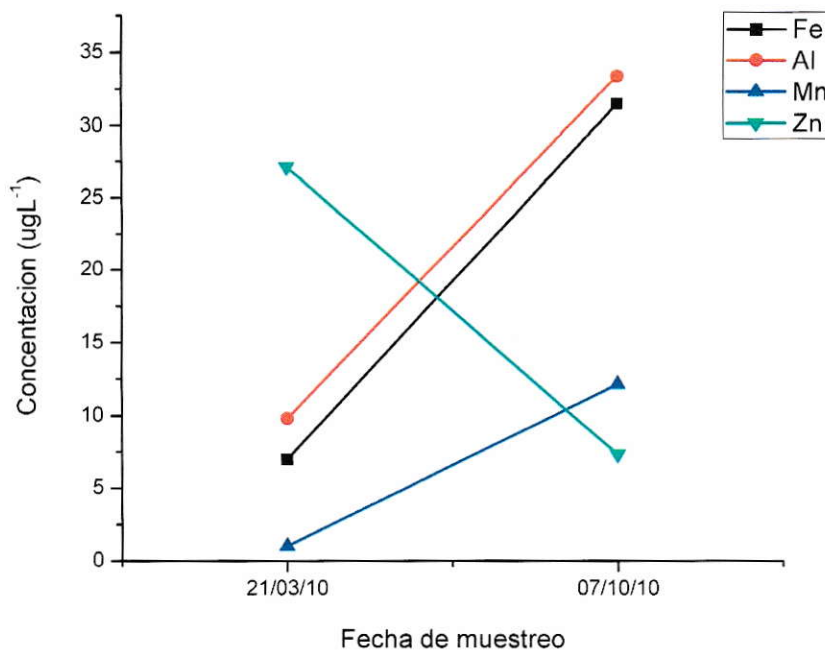


Figura 11. Contenido de Fe, Al, Mn y Zn en agua de vertiente en el Sector Tapihue.

Respecto de los metales que pudieran ser incorporados artificialmente al medio ambiente, el plomo y arsénico no superan los LD ($8,13 \mu\text{gL}^{-1}$ para Pb; $6,36 \mu\text{gL}^{-1}$ para As), mientras que el cadmio se encuentra sólo en la tercera capaña con $1,8 \mu\text{gL}^{-1}$ (LDCd = $0,67 \mu\text{gL}^{-1}$). Otros resultados, no incluidos en la gráfica, son una disminución de Se ($15,4 - <4,9 \mu\text{gL}^{-1}$), y variaciones menores a $0,5 \mu\text{gL}^{-1}$ para V y Ba. Para el resto de los elementos analizados se obtuvieron valores que no superan los límites de detección del equipo ICP-OES.

A continuación, en la Figura 12 se muestran los resultados obtenidos para las muestras I-A (subterránea, primera campaña) y la III-A (superficial, tercera campaña), tomadas a pocos metros del sitio del impacto. Se observa que el aluminio y zinc tienen un comportamiento similar en ambas muestras, mientras que el hierro y manganeso

presentan un incremento, destacándose este último porque se aumenta desde 23 a $2236 \mu\text{gL}^{-1}$ entre el agua de pozo de la primera campaña y la superficial de la segunda.

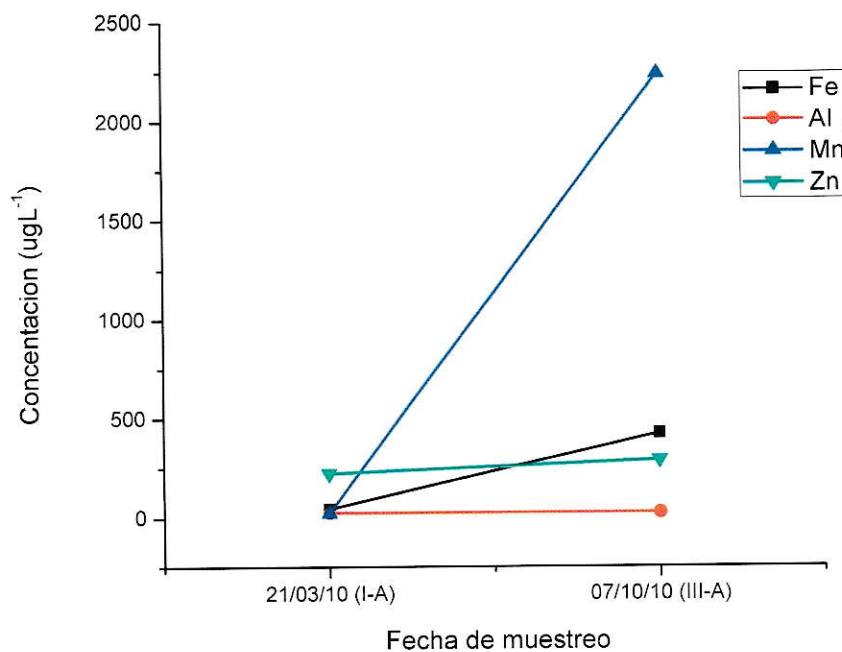


Figura 12. Contenido de Fe, Al, Mn y Zn en agua de distinta fuente en el sector Tapihue (muestras I-A y III-A).

Respecto a los elementos de mayor toxicidad, sólo se encuentra plomo en el agua superficial ($13,6 \mu\text{gL}^{-1}$), mientras el Cd y As no superan el LD en ninguna muestra.

Además, se aprecian mayores concentraciones en el agua subterránea para el cobre ($34 - 3,7 \mu\text{gL}^{-1}$) y selenio ($25,2 - 20 \mu\text{gL}^{-1}$), y se encuentra cobalto ($41 \mu\text{gL}^{-1}$) en el agua superficial (III-A).

3.4.2. Sector Botalcura

La Figura 13 compara los resultados obtenidos para las muestras I-C (primera campaña) y III-C (tercera campaña), correspondientes a agua superficial del estero Los Puercos, en Botalcura (sector medio de la cuenca).

Se aprecian incrementos de dos órdenes de magnitud para el hierro ($55,7 - 684 \mu\text{gL}^{-1}$) y aluminio ($20,5 - 406 \mu\text{gL}^{-1}$) y una disminución leve de zinc ($60 - 20 \mu\text{gL}^{-1}$) y manganeso ($275 - 231,8 \mu\text{gL}^{-1}$).

Para los elementos Pb, Cd y As no se supera el LD del equipo.

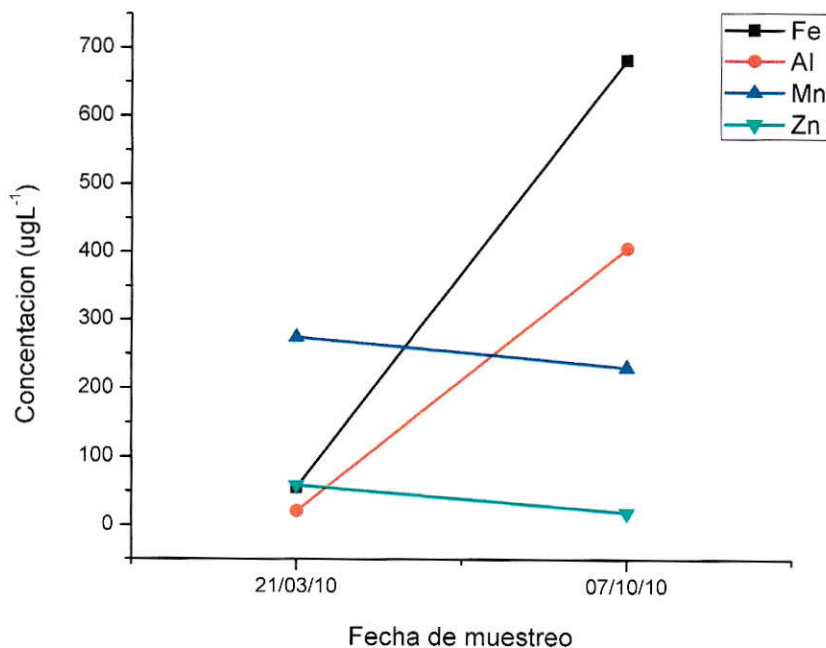


Figura 13. Contenido de Fe, Al, Mn y Zn en agua superficial en el Sector Botalcura.

3.4.3. Sector Pencahue

En el sector Pencahue se incluyó muestras de agua superficial (estero Los Puercos) y subterránea (noria en la localidad de Matancilla) en las tres campañas de muestreo.

En el agua superficial, se observa un comportamiento similar al analizado en Botalcura: se incrementa el hierro ($20,9 - 492 - 589 \mu\text{gL}^{-1}$) y aluminio ($10,2 - 270 - 393 \mu\text{gL}^{-1}$), y se aprecian variaciones leves que tienden a la disminución de manganeso ($255 - 235 - 200 \mu\text{gL}^{-1}$) y zinc ($30,52 - 46,69 - 15,77 \mu\text{gL}^{-1}$).

Por su parte, los elementos analizados en el agua subterránea muestran un comportamiento con tendencia a la estabilidad, excepto para el hierro, que en la segunda campaña se incrementa hasta $65,8 \mu\text{gL}^{-1}$, para volver a una concentración cercana a la inicial en la tercera.

En términos generales, las concentraciones encontradas en el agua subterránea son mucho menores que las del agua superficial. Los resultados se muestran en gráficas comparadas en la Figura 14.

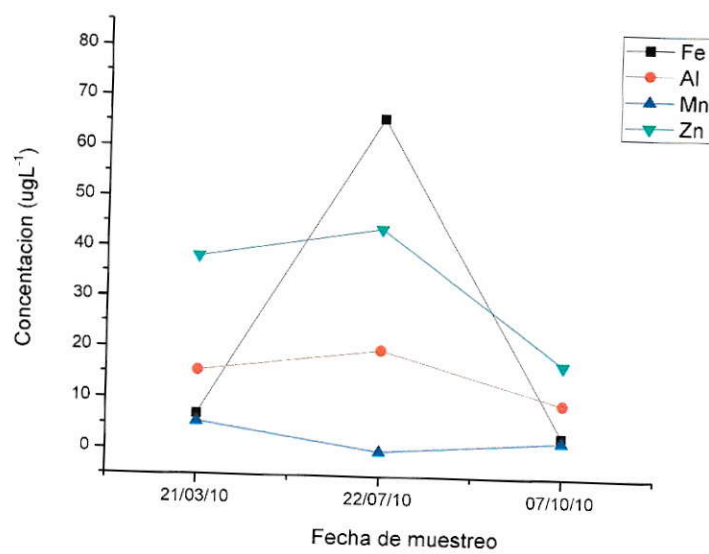
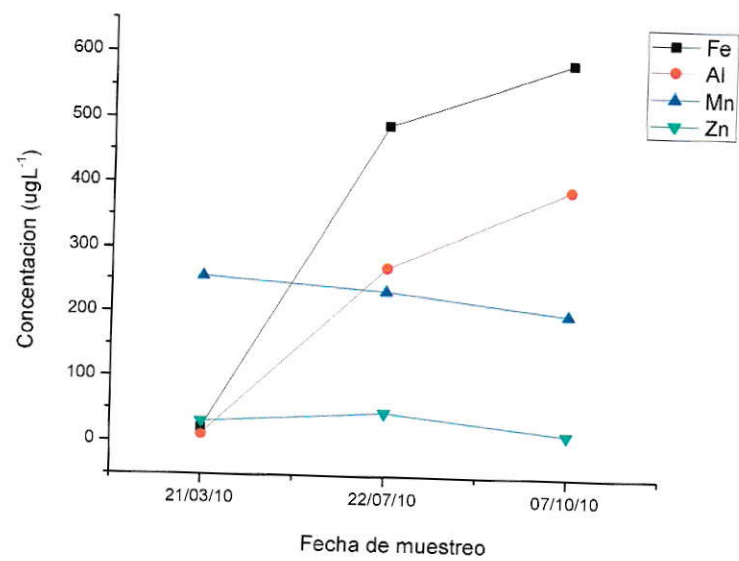


Figura 14. Contenido de Fe, Al, Mn y Zn en agua superficial (arriba) y subterránea (abajo) en el sector Pencahue.

De los tres elementos de mayor nocividad considerados, ni el Pb ni el As superan los LD del equipo, sin embargo, se observa Cd tanto en agua superficial ($0,7 \mu\text{gL}^{-1}$) como subterránea ($2,0 \mu\text{gL}^{-1}$) en la tercera campaña.

Se observó también la presencia de selenio, con concentraciones máximas de $47 \mu\text{gL}^{-1}$ en agua superficial y $63 \mu\text{gL}^{-1}$ en subterránea. En el caso del bario, estas se mantienen bajo los $90 \mu\text{gL}^{-1}$ en agua subterránea y en torno a $40 \mu\text{gL}^{-1}$ en la superficial.

3.5. Contenido de metales pesados en suelos

Las concentraciones de metales pesados en suelos superficiales y profundos de las tres zonas fueron comparadas con las del material de relave. El suelo profundo fue analizado en las tres zonas, mientras que el superficial sólo en Botalcura y Pencahue.

Para el análisis se mantuvo el criterio que diferencia elementos de origen natural (Fe, Al, Mn, Zn) y antropogénico (Cd, As, Pb). Además de incorporó el cobre, por tratarse del uno de los minerales asociados más abundante.

Para facilitar la lectura en gráficos, se han diferenciado los resultados según los órdenes de magnitud, así, tanto para suelos superficiales como profundos, el contenido de hierro, aluminio y manganeso se encuentra en el mismo orden de magnitud del contenido en el material de relave, mientras que para el zinc, plomo y cobre se observan diferencias de hasta 3 órdenes de magnitud.

Tanto para suelos superficiales como profundos a lo largo de la cuenca, el hierro presenta concentraciones entre $35.000 - 46.000 \text{ mgKg}^{-1}$, el aluminio muestra una tendencia al incremento con valores entre 11.000 y 22.000 mgKg^{-1} , y el manganeso tiende a disminuir desde 900 a 600 mgKg^{-1} .

Por otra parte, la concentración de plomo en el material de relave alcanza los 4000 mgKg^{-1} , mientras que el máximo en los suelos es de 80 mgKg^{-1} (superficial, sector

Botalcura). En el caso del zinc, la concentración del relave supera los 11.500 mgKg^{-1} , mientras que la mayoría de las muestras varía entre $65-75 \text{ mgKg}^{-1}$, con la excepción del suelo superficial de Botalcura (187 mgKg^{-1}). El cobre se encuentra en 1.000 mgKg^{-1} en el material de relave y no supera los 55 mgKg^{-1} en las muestras analizadas. Respecto al arsénico, en ninguna muestras se supera el LD del equipo.

Las Figuras 15 y 16 muestran los resultados para suelos superficiales y profundos, respectivamente.

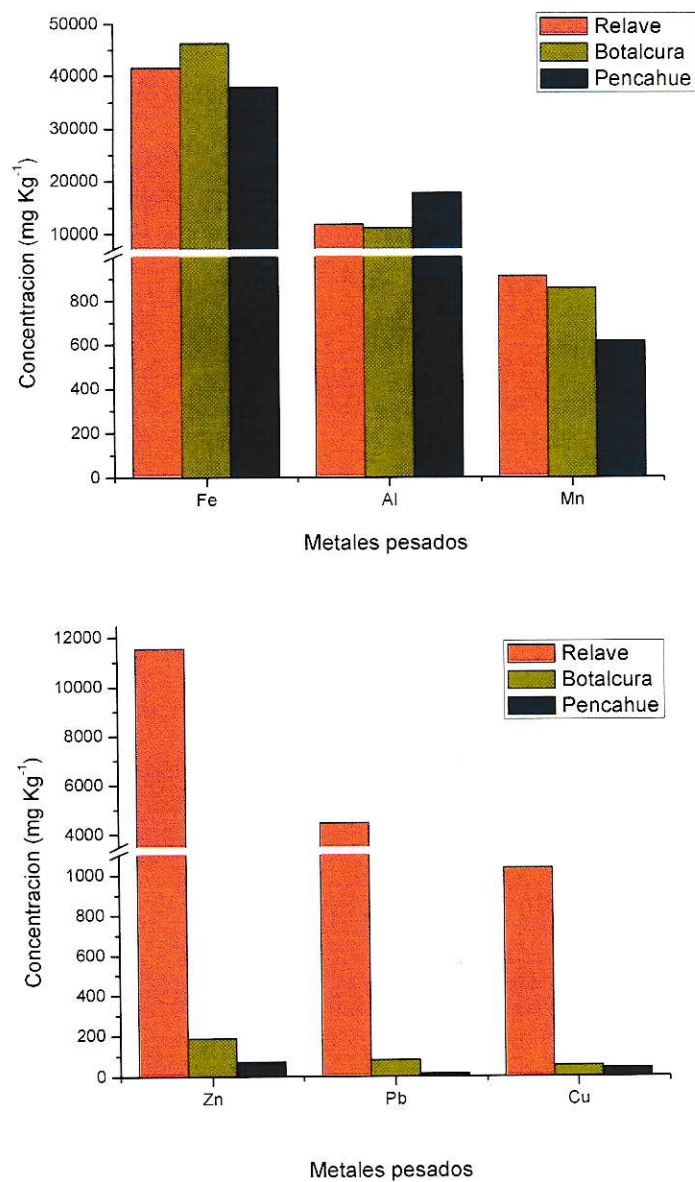


Figura 15. Contenido de metales pesados en suelo superficial comparados con el material de relave.

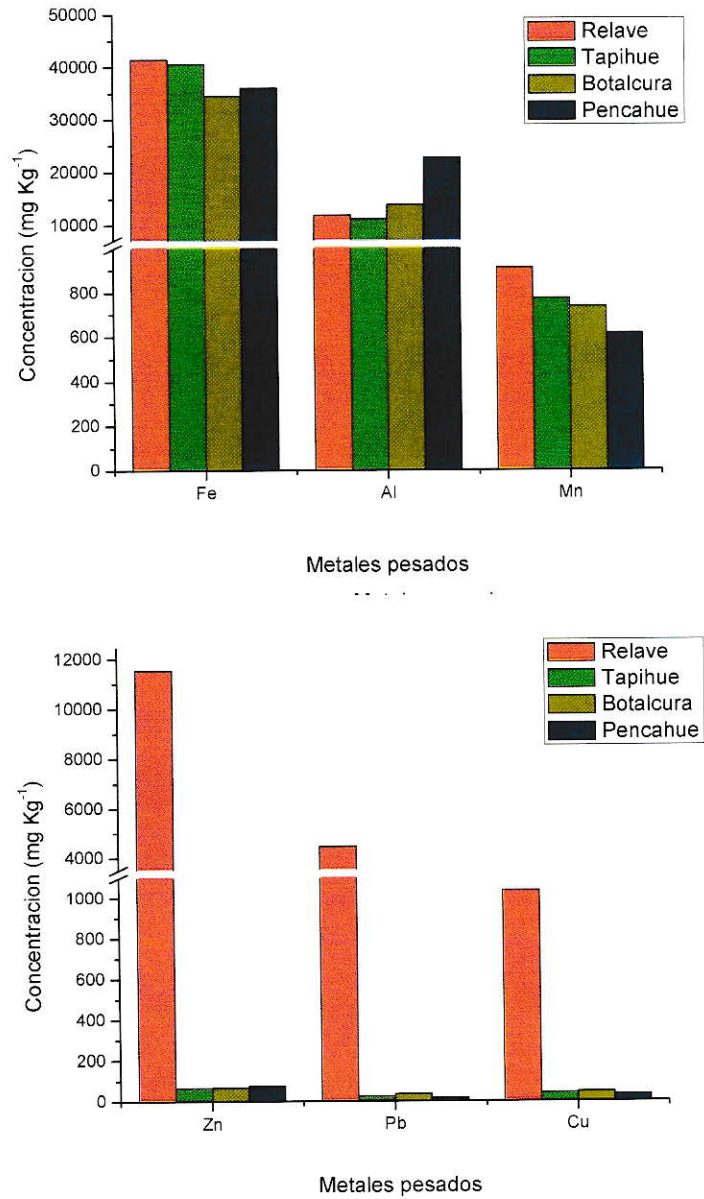


Figura 16. Contenido de metales pesados en suelo profundo comparados con el material de relave.

El caso particular del cadmio se analiza de manera independiente: la Figura 17 da cuenta de una concentración en el material de relave cercana a 52 mgKg^{-1} , y de valores menores a $3,5 \text{ mgKg}^{-1}$ en los suelos.

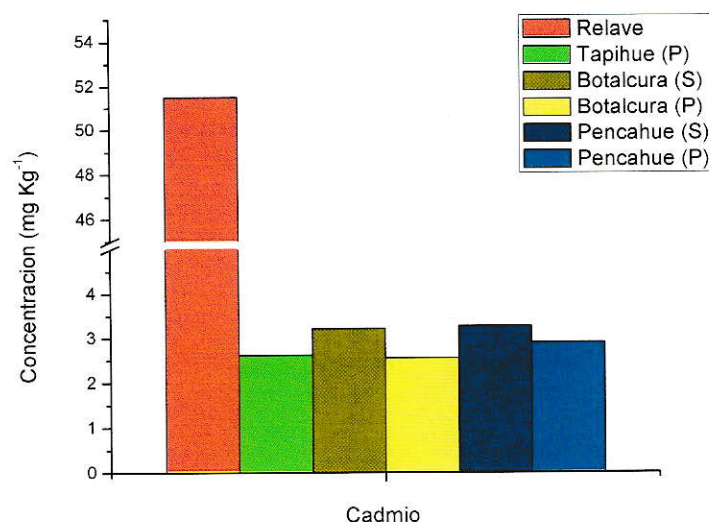


Figura 17. Contenido de cadmio en el material de relave y suelos superficiales (S) y profundos (P).

En el Anexo 10 se presentan los valores obtenidos para las muestras de suelo por sector y tipo de muestra.

3.6.- Evaluación según normas

En el caso de las muestras de agua, las normativas que aplican están en función de los usos del agua. Así, se comparan los resultados obtenidos para agua superficial con los Estándares para Aguas de Regadío de la Norma Chilena Oficial N° 1.333/78 (Estándares Nacionales de Calidad ambiental según el uso dado), y los de agua de pozo, noria o vertiente (consumo humano) con la NCh409/1.Of2005, sobre requisitos para agua potable.

En términos generales, las concentraciones de metales pesados observadas en las muestras de agua están por debajo de los límites máximos permitidos, como se muestra en la Tabla 16. Sólo en el caso del manganeso se supera la norma para agua de riego ($0,2 \text{ mgL}^{-1}$) en todas las muestras analizadas (I-C, I-D, II-B, III-A, III-C, III-E), destacándose la muestra III-A donde se encontró $2,23 \text{ mgL}^{-1}$, es decir, un orden de magnitud sobre el valor normado. Esta muestra fue obtenida en la tercera campaña de muestreo y corresponde al estero Los Ladrones, que se encuentra a un costado de la zona del colapso.

Tabla 16. Contenido de metales pesados en agua superficial y subterránea.

Comparación con NCh409/1.Of2005 y NCh1.333.Of1978

Metales pesados	Agua subterránea ^a (mgL^{-1})	NCh409/1.Of2005 (mgL^{-1})	Agua superficial ^a (mgL^{-1})	NCh1.333.Of1978 (mgL^{-1})
Fe	0,1	0,3	0,68	5
Al	-	-	0,39	5
Mn	0,01	0,1	2,23	0,2
Zn	0,2	3,0	0,3	2
Cd	0,002	0,01	0,007	0,01
Pb	<LD	0,05	0,013	5

^aValor máximo encontrado

Además, se observó la superación de la NCh409/1.Of2005 en el caso del Nitrato en la muestra II-A, correspondiente a agua superficial de la segunda campaña de muestreo (22/07/2010) (ver sección 3.2, página 55).

En el del caso selenio se aprecia superación de ambas normas en la mayoría de las muestras ($0,01 \text{ mgL}^{-1}$ para NCh409/05; $0,02 \text{ mgL}^{-1}$ para la NCh1.333/78); en el agua

potable, se encontró concentraciones máximas en torno a $0,05 \text{ mgL}^{-1}$, mientras que en la superficial se encontraron valores cercanos al LMP, excepto para la muestra I-C (Botalcura), donde la concentración es un orden de magnitud mayor ($0,11 \text{ mgL}^{-1}$).

En el ANEXO 7 se encuentran los resultados para la calidad de agua según normas que aplican según el uso se agua.

Por otro lado, los contenidos de los metales pesados en suelo y en el material de relave fueron comparados el rango normal en la litósfera y con normas de referencia propuestas en el artículo 6 del Reglamento de la Ley de Bases del Medio Ambiente; en este caso se utilizó la norma canadiense y suiza, como se muestra en la Tabla 17.

Tabla 17. Contenido de metales pesados en suelos y material de relave.

Comparación con rangos normales en litósfera y normas internacionales

(Pimienta y col., 2007; Reglamento SEIA, 2001).

Metales pesados	Contenido en relave (mgKg^{-1})	Contenido en suelos ^a (mgKg^{-1})	Rango normal en litósfera (mgKg^{-1})	Norma Canadiense ^b (mgKg^{-1})	Norma Suiza ^b (mgKg^{-1})
Fe	41.452	46.255	2.000 – 550.000	-	-
Al	11.900	22.660	10.000 – 300.000	-	-
Mn	911	857	20 – 10.000	-	-
Zn	11.541	187	25-200	200	2000
Cd	51,5	3,27	<1-2	1,4	30
Pb	4.465	80,2	10-150	70	2000
Cu	1.037	54,1	<60	63	1000

^a Valor máximo encontrado

^b Concentración en peso seco; suelo para uso agrícola

IV. DISCUSION

4.1. Síntesis de resultados

A continuación se sintetizan los resultados según el parámetro analizado, comparando la primera con la tercera campaña de muestreo.

4.1.1. pH y CE

En aguas superficiales se aprecia un incremento en los valores de pH tanto geográfica como temporalmente, mientras que en agua subterránea la tendencia es hacia la estabilidad, con valores menores que el agua superficial.

En cambio, para la CE la situación es inversa: geográfica y temporalmente la tendencia es a la disminución y estabilidad en agua superficial, mientras que aumenta en agua subterránea.

4.1.2. Cationes y aniones por Cromatografía Iónica

Muestreados sólo en la segunda campaña y exclusivamente en el sector Penciahue, se encontró superación de la NCh 409/1.Of2005 para el Nitrato en agua subterránea.

4.1.3. Zn, Cd, Pb por VRA

Ninguno de los elementos analizados supera los LD calculados para la técnica.

4.1.4. Metales pesados en agua por ICP-OES

Sector Tapihue

- En la zona de Las Palmas Sur (muestra control), el agua subterránea (vertiente) muestra incrementos de concentración leves para el hierro, aluminio y manganeso, y disminución del zinc. En ningún caso se superan los $35 \mu\text{gL}^{-1}$.

- Para las muestras de agua tomadas a pocos metros del tranque colapsado, entre la de pozo (primera campaña) y la de agua superficial (tercera campaña) se observa un crecimiento importante de manganeso desde 23 a 2236 μgL^{-1} y de hierro desde 46 a 424 μgL^{-1} .

Sector Botalcura

- En el agua superficial de Botalcura, se incrementa la concentración de aluminio y hierro, mientras disminuye la de zinc y manganeso.

Sector Pencahue

- El agua superficial se observa un incremento en la concentración de hierro y aluminio, y variaciones leves tendientes a la disminución de manganeso y zinc.
- El agua subterránea presenta concentraciones mucho menores que las del agua superficial, con variaciones que tienden a la estabilidad, excepto para el hierro, que muestra una concentración mayor en la segunda campaña (65,8 μgL^{-1}) y que vuelve al estado inicial en la tercera.

4.1.5. Metales pesados en suelos por ICP-OES

Tanto en suelos superficiales como profundos, en los tres sectores, se encuentra hierro, aluminio y manganeso en concentraciones del mismo orden de magnitud que en el material de relave. Distinto es el caso del zinc, plomo, cobre y cadmio, que muestran concentraciones mayores en el material de relave que en los suelos (hasta en tres órdenes de magnitud).

4.1.6. Comparación con normas de referencia

En las muestras de agua, sólo el manganeso supera la norma para agua de riego (NCh1.333.Of1978) en todas las muestras analizadas. La NCh409/1.Of2005 no se supera en ningún caso para los metales pesados seleccionados.

En los suelos no se encuentran concentraciones anómalas de Fe, Al, Mn, Zn, Pb y Cu, sólo en el caso del cadmio se encuentra una concentración que supera el rango normal en la litósfera.

4.2. Análisis de resultados

El análisis comparado del contenido de metales en aguas y suelos permite observar variaciones de corto y mediano plazo, respectivamente, debido a que las concentraciones de metales en el agua pueden variar más rápido que en suelos, ambos afectados por diversos factores como pH, temperatura, contenido de oxígeno y materia orgánica. En el caso de los suelos, el muestreo a distintas profundidades permite contar con antecedentes históricos del comportamiento de los elementos, mientras que para agua, las muestras de pozos o norias dan cuenta del comportamiento de los acuíferos de la cuenca.

Atendiendo a los resultados obtenidos para el agua de vertiente de la localidad Las Palmas Sur (muestras I-B y III-B) donde se aprecian, en general, bajas concentraciones y escasas variaciones entre la primera y tercera campaña de muestreo, es válido considerar dicha muestra como punto de control para el resto de la cuenca.

Se analizan a continuación en detalle los metales pesados encontrados, agrupados según sus propiedades y/o afinidades, cuando se ha considerado adecuado.

4.2.1. Hierro, Aluminio y Manganeso

Se ha considerado como criterio de afinidad la similitud que existe en el comportamiento químico de las especies en las matrices observadas.

i) Agua

A lo largo de la cuenca del estero Los Puercos, en el agua superficial se aprecia un comportamiento similar para el hierro y aluminio, observándose concentraciones mayores en la segunda y tercera campaña, respecto de la primera (un orden de magnitud). Por su parte, el manganeso se mantiene constante en torno a $0,2 \text{ mgL}^{-1}$, excepto en agua superficial del sector del tranque colapsado (muestra III-A, descrita en el párrafo siguiente). En el agua subterránea, muestreada ampliamente en el sector Pencahue, sólo el Fe supera los $0,05 \text{ mgL}^{-1}$ en la segunda campaña de muestreo, manteniéndose el Al, Mn y Zn bajo $0,02 \text{ mgL}^{-1}$.

El caso de las muestras de agua I-A y III-A, tomadas en el sector más próximo a la faena minera, es especial por tratarse de dos fuentes distintas. En la primera, correspondiente al pozo de la Hacienda Las Palmas, ningún elemento supera los $0,05 \text{ mgL}^{-1}$, mientras que en la segunda, correspondiente al estero Los Ladrones, se observan concentraciones de Fe superando los $0,4 \text{ mgL}^{-1}$ y de Mn sobre los $2,2 \text{ mgL}^{-1}$; en el caso del Al, este se encuentra en ambas muestras cercano a $0,02 \text{ mgL}^{-1}$. Las diferencias observadas para el Fe y Mn podrían asociarse al efecto del contacto directo entre el agua superficial y el material de relave. Por otra parte, los valores estables para el aluminio podrían deberse a la presencia natural del metal en la cuenca, asociado a óxidos de silicio (UPM, 2000).

Estudios realizados por el Seremi de Salud del Maule entre Marzo y Diciembre del 2010, corroboran parte de los resultados expuestos:

- el manganeso, en el sector más cercano a la faena minera, se encuentra en concentraciones que superan en un orden de magnitud el LMP por la NCh 1.333/78 para agua de riego, sin embargo, "aguas abajo" se encuentra cercano o superando dicho límite ($0,2 \text{ mgL}^{-1}$).
- el hierro se mantiene bajo 1 mgL^{-1} , superando ocasionalmente el LMP por la NCh 1.333/78 de 5 mgL^{-1} .

En términos generales, se corrobora que el agua subterránea no muestra señales de contaminación, por lo tanto, podemos asumir que el suelo ha jugado un rol importante, comportándose como una barrera natural, lo que ha disminuido la movilidad de estos metales pesados hacia suelos más profundos y acuíferos. En cambio, el agua superficial que ha estado en contacto directo con el material de relave, ha facilitado la movilidad de los mismos desde la faena minera hacia Penciahue, sector bajo de la cuenca.

ii) Suelo

Los elementos hierro, aluminio y manganeso muestran un comportamiento similar: se encuentran en concentraciones del mismo orden de magnitud en el material de relave y en los suelos muestreados.

En un análisis más fino, las concentraciones de hierro se mantienen entre 34.500 y 41.500 mgKg^{-1} , mostrando tendencia a la disminución con el aumento de la distancia, con la excepción del suelo superficial en el sector Botalcura (muestra S-03) que supera los 46.000 mgKg^{-1} . Además, los suelos superficiales presentan mayores valores que los profundos.

El aluminio presenta un comportamiento contrario al del hierro, incrementando su concentración con la distancia y profundidad. En este caso, la mayor diferencia entre los horizontes se alcanza en Pencahue, donde el suelo superficial tiene 17.800 mgKg^{-1} y el profundo supera los 22.000 mgKg^{-1} , valor que alcanza casi el doble de la concentración detectada en el material de relave (11.900 mgKg^{-1}).

El manganeso muestra una tendencia a disminuir con la distancia y a alcanzar un equilibrio entre las distintas profundidades. En el sector Botalcura existe mayor concentración en el suelo superficial que profundo ($860 - 730 \text{ mgKg}^{-1}$), pero en el Sector Pencahue se obtiene prácticamente el mismo valor para ambos, en torno a los 614 mgKg^{-1} .

Para los tres elementos analizados, la similitud de la concentración entre los suelos de la cuenca y el material de relave permite descartar a este último como fuente directa de Fe, Al y Mn, y da pie para conjeturar que dichos elementos se encuentran naturalmente en el medio, dados los antecedentes geológicos de la zona. Por otra parte, los resultados de las muestras de agua indican que el sector donde se ubica el acopio del material de relave es una fuente actual de estos elementos, lo que se corrobora con el aumento brusco en la concentración de Fe y Al aguas abajo de la zona del impacto, mientras el manganeso parece haber alcanzado un equilibrio en torno a $0,2 \text{ mgL}^{-1}$.

En relación a disponibilidad de los metales en los suelos, Zhang *et al.* (1997), citado en Prause y col. (2000) indica:

“en muchos suelos ácidos, los óxidos $[\text{MOx}]$, hidróxidos $[\text{M}(\text{OH})_x]$ y oxihidróxidos $[\text{MOx OH}_x]$ de Fe, Mn, y Al constituyen un grupo de coloides del suelo que son capaces de

adsorber amplias cantidades de metales traza y tienen, además, una importante influencia en las concentraciones de los mismos en la solución del suelo”.

Además, los óxidos e hidróxidos hidratados de Fe y Mn, en particular, presentan una alta superficie específica, lo que facilita la adsorción de metales divalentes, especialmente Cu y Pb, y en menor grado Zn, Co, Cr, Mo, Ni y As (Galán & Romero, 2008).

A partir de los resultados obtenidos y considerando el contenido de materia orgánica y la presencia de óxidos de hierro y manganeso en los suelos de la cuenca, es factible suponer éstos han jugado un papel importante en la adsorción de iones metálicos, razón por la cual algunos de los metales mencionados sólo fueron encontrados en los suelos, pero no en las aguas analizadas.

En el caso del manganeso, al no encontrarse fluctuaciones amplias en las muestras de suelo, y teniendo en antecedentes los resultados de las muestras de agua, es posible sostener que se ha alcanzado un equilibrio dentro de la cuenca, la cual no se ha visto afectada fuertemente por el colapso del tranque de relaves, por lo menos en el tiempo de estudio.

4.2.2. Zinc y Cadmio

El criterio de afinidad utilizado tiene relación con la presencia de ambos elementos como residuos de procesos mineros, además de existir un comportamiento sinérgico entre ellos en suelos.

i) Agua

Del total de las muestras de agua, el zinc presenta las mayores concentraciones en las cercanías del relave (sector Tapihue), allí se obtuvo

0,22 mgL⁻¹ en el agua de pozo de la Hacienda Las Palmas y 0,28 mgL⁻¹ en agua del estero Los Ladrones, valores que no superan los LMP por las normas referidas. Para el resto de la cuenca, no se superan los 0,06 mgL⁻¹ en ambas fuentes. En general, el zinc muestra una tendencia a disminuir entre Marzo y Octubre, tanto en agua superficial como subterránea. Este comportamiento indica que en el sector cercano al relave existe movimiento de este metal a través de los cursos de agua superficial y suelo, pudiendo alcanzar el acuífero en el sector Tapihue, sin embargo, en los sectores más alejados, aparentemente no existe un impacto importante.

Por su parte, el cadmio aparece sólo en Octubre en 3 muestras de agua con valores que se encuentran cercanos al límite de detección del ICP (0,67 µgL⁻¹), y hasta dos órdenes de magnitud bajo el LMP por la NCh 409/05 y NCh 1.333/78, ambas de 0,01 mgL⁻¹. En el sector Tapihue, el punto de muestreo que ha sido considerado como control (I-B/III-B) presenta un valor que no supera el LD en Marzo y de 0,0018 mgL⁻¹ en Octubre. Luego, en Pencahue se encuentran 0,002 mgL⁻¹ en agua del estero Los Puercos y 0,00072 mgL⁻¹ en agua de noria de la localidad de Matancilla.

Si bien, en una primera observación las concentraciones medidas no son preocupantes puesto que se encuentran muy por debajo del LMP por las normas, el cadmio es un elemento que podría representar un riesgo directo para la salud humana si se comprueba su existencia en concentraciones mayores, especialmente en napas subterráneas, cuyas aguas con de consumo de la población y donde la permanencia de los metales es mucho más alta que en aguas superficiales.

ii) Suelo

Los suelos de la cuenca dan cuenta de la presencia de cadmio en concentraciones relativamente altas (entre 2,5 y 3,2 mgKg⁻¹) si se comparan con el rango normal en la litósfera propuesto en la Tabla 17⁴ (<1-2 mgKg⁻¹) y con datos obtenidos por el Seremi de Salud Maule (2010) donde, en muestras “blanco de suelo” no se encuentra más de 1 mgKg⁻¹. Además, las concentraciones más elevadas se encuentran en el horizonte superficial del suelo. El Zinc, por su parte, se mantiene bajo 74 mgKg⁻¹, excepto para el suelo superficial de Botalcura, donde supera los 180 mgKg⁻¹, valor que no alcanza ninguna de las normas de referencia propuestas en la misma Tabla.

En general, en suelos con alto contenido de materia orgánica, ambos elementos se fijarán preferentemente en la capa superficial (Haan *et al.*, 1985), sin embargo, en suelos ácidos existe un comportamiento sinérgico en la disponibilidad de Zn y Cd, favoreciendo la movilidad y asimilabilidad de ambos, como indican Estévez *et al.* (2000).

La presencia de ambos metales pesados en aguas y suelos de la cuenca se relaciona directamente con las operaciones mineras, ya que se encuentran asociados a la Blenda o sulfuro de zinc que ha sido removido.

Las altas concentraciones encontradas en el material de relave (Zn: 11.500 mgKg⁻¹; Cd: 51 mgKg⁻¹) y el comportamiento de dichos elementos en el suelo, permiten suponer que el zinc encontrado en el agua de pozo del sector Tapihue se debe a su infiltración desde la superficie, y que los bajos índices en el resto de la cuenca tienen

⁴ La Tabla 17, “Contenido de metales pesados en suelos y material de relave. Comparación con rangos normales en litósfera y normas internacionales”, se encuentra en la página 67.

su explicación en la capacidad de los suelos para retener metales pesados según su afinidad para formar complejos con la materia orgánica (Giusquiani *et al.*, 1992 & Bityukova, 1994).

Cabe destacar que la ingesta de cadmio puede generar efectos nocivos a la salud humana tales como daño al sistema respiratorio y acumulación en hígado y riñón, principalmente. Además, se documentan efectos crónicos como hipertensión, carcinogénesis, teratogénesis y daño testicular (SAG, 2005).

4.2.3. Plomo y Arsénico

Como criterio de afinidad se ha considerado que ambos elementos son constituyentes naturales de minerales de oro y cobre, por lo tanto, se asocian directamente a residuos mineros. Además, en caso de ser ingeridos por el ser humano, son altamente tóxicos.

i) Agua

El arsénico no supera los límites de detección del ICP-OES en ninguna muestra de agua, por lo tanto, en primera instancia este elemento no representaría un peligro para la salud humana. Por su parte, el plomo sólo supera el LD en el agua del estero Los Ladrones del Sector Tapihue muestreada en Octubre, pero tampoco representaría un peligro directo para la salud, ya que se encuentra en una concentración de $0,013 \text{ mgL}^{-1}$, dos órdenes de magnitud bajo el LMP por la NCh 1.333/78 para calidad de agua de riego (5 mgL^{-1}).

ii) Suelo

Al igual que en el agua, el As no supera los LD del ICP-OES, mientras que el Pb se encuentra en bajas concentraciones, no superando los 40 mgKg^{-1} en la mayoría de las muestras; sólo en el caso del suelo superficial de Botalcura se

encontró $80,2 \text{ mgKg}^{-1}$. Por su parte, en el material de relave la concentración de Pb supera los 4.000 mgKg^{-1} , lo que permite suponer que la fuente más probable de dicho elemento en los suelos de la cuenca corresponde al proceso de remoción y extracción de minerales en Las Palmas, especialmente de galena⁵ (Milán, 2001).

Si bien, el As cumple funciones biológicas, su ingesta en concentraciones elevadas o sostenidas en el tiempo puede producir trastornos hepáticos, vasculares, dermatológicos, en el sistema nervioso periférico, además de efectos cancerígenos y teratogénicos. Por su parte, si el Pb ingresa al organismo genera efectos neurológicos (tanto en sistema nervioso central como periférico), hematológicos, endocrinos, renales, cancerígenos y en la reproducción y desarrollo, siendo los niños la población de mayor riesgo (OIT, 1998).

El Informe de Criterios de Calidad de Suelo Agrícola (2005), desarrollado por el Ministerio de Agricultura a través del SAG, señala que los contenidos de plomo total, en promedio en los suelos de Chile fluctuaron entre 8 y 56 mgKg^{-1} , y considera que valores que superan los 250 mgKg^{-1} pueden ser atribuidos a una contaminación.

Aún cuando, el máximo valor encontrado en los suelos de la cuenca no es elevado, no deberían descartarse nuevos análisis en el futuro con el objeto de monitorear la evolución del elemento, dada la permanencia de la potencial fuente de plomo mencionada.

⁵ Galena: Mineral de plomo de fórmula química PbS y con 87% en peso de Pb.

4.2.4. Elementos de menor impacto

Cobre: aparece en concentraciones muy bajas en las muestras de agua tomadas a lo largo de la cuenca, no superando los $0,05 \text{ mgL}^{-1}$. En suelos no supera los 55 mgKg^{-1} , a pesar de que en el material de relave se encuentra en más 1.000 mgKg^{-1} , lo que indicaría un impacto mínimo de este elemento en ambas matrices.

Selenio: se encuentra en casi la totalidad de las muestras de agua superando los valores establecidos por ambas normas de calidad según los usos con las que se han comparado los resultados⁶, con concentraciones inferiores a $0,06 \text{ mgL}^{-1}$. Sin embargo, en las muestras de suelo ninguna supera el LD del ICP y no se encuentra en el material de relave, además no se cuenta con antecedentes respecto a posibles fuentes de Se en el sector. En consecuencia, ante la incertidumbre, sería recomendable buscar específicamente una fuente y/o realizar nuevos análisis.

Cobalto: en las muestras de agua sólo se encontró Co en agua del estero Los Ladrones, en el Sector Tapihue ($0,04 \text{ mgL}^{-1}$), que corresponde a agua superficial adyacente al tranque de relaves colpasado. Si bien, la concentración observada no supera el LMP por la NCh 1.333/78 ($0,05 \text{ mgL}^{-1}$), es uno de los elementos de nivel traza que normalmente está en concentraciones menores a $0,01 \text{ mgL}^{-1}$ (Kemmer, 1997), valor que en este caso es superado en 4 veces. El contenido en suelos es mayor que el encontrado en el material de relave, por lo tanto, puede descartarse este último como fuente directa. Además, se observan concentraciones mayores en los horizontes superficiales de Pencahue y Botalcura, lo que permite suponer que el elemento se encuentra naturalmente en la zona.

⁶ LMP por la Nch 409/05 para agua potable: $0,01 \text{ mgL}^{-1}$. LMP por la Nch 1.333/78 para agua de riego: $0,02 \text{ mgL}^{-1}$.

Vanadio: aparece en las muestras de agua de la localidad de Las Palmas Sur (muestra II-B, control) con valores que superan levemente el LD del ICP ($0,008 \text{ mgL}^{-1}$). En suelos, se encuentra en torno a 200 mgKg^{-1} , mientras el material de material de relave aparece con 102 mgKg^{-1} . Dichos antecedentes permiten descartar el relave como fuente directa, y suponer que el vanadio se encuentra naturalmente en la cuenca.

Boro: sólo supera el LD del ICP en dos muestras de agua superficial, correspondientes al estero Los Puercos en Botalcura ($0,02 \text{ mgL}^{-1}$) y Pencahue ($0,04 \text{ mgL}^{-1}$). En suelos, el mayor valor observado se encuentra en el suelo superficial de Botalcura 115 mgKg^{-1} , observándose una tendencia leve a la disminución hacia el sector Pencahue.

Níquel: en agua, sólo se encontró en la muestra agua de noria en el sector de Matancilla (Pencahue) en Marzo. Las muestras de suelo muestran la presencia de Ni en los dos horizontes muestrados en Pencahue, alcanzando 12 mgKg^{-1} , y sólo en la sección superficial en Botalcura con valores mucho menores. En el material de relave, la concentración no supera el LD del ICP-OES.

Cromo: ninguna muestra de agua supera el LD del equipo, sin embargo en suelos se observan concentraciones que superan los 22 mgKg^{-1} en Pencahue (ambos horizontes) y Botalcura (horizonte superficial). En el material de relave se encontraron 12 mgKg^{-1} .

Berilio: al igual que el cromo, ninguna muestra de agua supera el LD del ICP-OES, pero los suelos muestran concentraciones hasta tres veces más elevadas que el material de relave, sobre 10 mgKg^{-1} .

Bario: en términos generales, ambas fuentes de agua mantienen bajas concentraciones en el tiempo de muestreo, no superando los $0,09 \text{ mgL}^{-1}$. Por su parte, el suelo presenta las mayores concentraciones en Botalcura (130 mgKg^{-1}), mientras que el material de relave tiene concentraciones levemente mayores (165 mgKg^{-1}).

Molibdeno: ninguna de las muestra de agua supera el LD del ICP-OES. En suelos, sólo en Pencahue se encontró, en concentraciones menores a 1 mgKg^{-1} , y en el relave supera levemente los 2 mgKg^{-1} .

Plata: ninguna muestra de agua ni suelos supera los LD del equipo.

4.3. Análisis general y recomendaciones

Si bien, a primera vista el colapso del tranque de relaves de la minera Las Palmas, en el sector de Tapihue, hacía suponer que existiría algún nivel de impacto a lo largo de la cuenca, en general, los resultados no dan cuenta de concentraciones elevadas de metales pesados en agua ni suelos que puedan asociarse a contaminación o que pudieran generar efectos nocivos directos en la población. No obstante, los incrementos en la concentración de hierro y aluminio aguas abajo, y la presencia de manganeso en altas concentraciones en el agua superficial del sector más cercano al tranque, indican que se han producido variaciones en el entorno que, a lo menos, debieran ser monitoreadas; además, la concentración relativamente alta de cadmio encontrada en suelos permite suponer que éste se ha distribuido y acumulado en los suelos durante los últimos 30 años (a lo menos), siendo la faena minera abandonada Las Palmas la fuente más probable.

Conocer la concentración de metales pesados que contiene el material de relave ha permitido corroborar lo señalado en la literatura respecto a los elementos que se asocian a la actividades mineras, como son cadmio, zinc, plomo y cobre; ello implica una ventaja importante al momento de analizar los resultados generales, ya que es posible identificar el material de relave como la principal fuente de dichos elementos. Por otra parte, encontrar valores de concentración similares entre el material de relave y los suelos, da cuenta de que esos elementos forman parte del contenido natural de la

cuenca, tal es el caso, entre otros, de hierro, aluminio y manganeso. Distinto es lo que acontece en el agua superficial, donde el incremento de concentración observado en para aluminio y hierro entre Marzo y Octubre, da cuenta de que el colapso del tranque de relaves alteró significativamente el contenido de esos metales en las aguas, especialmente debido al contacto directo que mantuvieron los esteros Las Palmas y Los Ladrones, afluentes del estero Los Puercos, con el material de relave durante a lo menos tres meses.

Un fenómeno interesante en relación a los distintos sectores escogidos, es que en el suelo superficial del sector Botalcura los elementos listados a continuación presentan la mayor concentración de los suelos evaluados: Zn (187 mgKg^{-1}), Cu ($54,1 \text{ mgKg}^{-1}$), Pb ($80,2 \text{ mgKg}^{-1}$), Mn (857 mgKg^{-1}), V (220 mgKg^{-1}), Ba (130 mgKg^{-1}), Fe (46.255 mgKg^{-1}). Probablemente, estos resultados se deben a la movilización de los mencionados elementos a través del suelo "cuenca abajo", y no a su movilización a través de los cursos de agua, que muestran comportamientos distintos o concentraciones muy bajas de ellos.

Las técnicas utilizadas en el presente estudio tienen fundamentos físicoquímicos distintos. Por una parte, la espectrometría de emisión óptica se basa en la capacidad de los elementos para emitir su radiación característica, y por otra, la voltametría genera variaciones en el potencial de óxido-reducción de los elementos en función de corriente eléctrica. Si bien, en este caso ambas técnicas se han utilizado de manera complementaria, para el análisis de ciertos metales pesados resultaría más eficiente otra técnica: la espectrometría de absorción atómica (AAS)⁷ que, debido a su mayor

⁷ La AAS (siglas en inglés), al igual que el ICP-OES, atomiza la muestra, pero usando un horno de grafito o atomizador eléctrico. Además, utiliza un volumen mínimo de muestra y, al realizarse la lectura independiente para cada elemento, prácticamente todos pueden ser determinados en concentraciones inferiores a $1 \mu\text{gL}^{-1}$.

sensibilidad es capaz de alcanzar límites de detección mucho menores (Clescer y *col.*, 1998). Por ejemplo: el LD del plomo en ICP-OES es de $8 \mu\text{gL}^{-1}$, mientras que por AAS es de $0,7 \mu\text{gL}^{-1}$, en el caso del cadmio, los valores son $0,67 \mu\text{gL}^{-1}$ y $0,05 \mu\text{gL}^{-1}$, respectivamente.

Puntualmente, respecto a la técnica de VRA, su LD puede ser mejorado si se realizan algunas de las siguientes modificaciones en la metodología:

- Aumentar el volumen de trabajo manteniendo las concentraciones necesarias para el flujo adecuado de los analitos ($0,1 \text{ M KCl}$ o $1\text{M H}_2\text{SO}_4 + 4\text{E}10^{-4} \text{ M Hg}$) dentro de la celda. Para ello, la muestra debe estar contenida en el volumen total del recipiente y no en una alícuota, que en este estudio fueron de 20 y 3 mL, respectivamente.
- Aumentar el tiempo de electrificación, que en este caso fue de 180 segundos. Dicho incremento deberá evaluarse hasta lograr los resultados óptimos y ser seguido por un tiempo de reposo adecuado.

Si conjugamos factores como que en Chile existen más de 200 faenas mineras abandonadas o paralizadas de distintas características y tiempos de existencia (SERNAGEOMIN, 2007), y que vivimos en un país donde se producen eventos naturales de alta liberación de energía con cierta periodicidad como terremotos, erupciones volcánicas o eventos climáticos, podemos suponer que es muy probable que se produzcan emergencias ambientales como consecuencia del colapso de depósitos de relave. Ante este panorama, es de mucha importancia conocer el estado de cada depósito, esté en actividad o cerrado, además de trabajar en el perfeccionamiento de la legislación y desarrollo tecnológico, apuntando a evitar catástrofes como las que han acontecido desde la existencia de las faenas mineras.

En base a los resultados y análisis expuestos, se proponen las siguientes recomendaciones a organismos locales y/o autoridades competentes:

- Monitorear el contenido de metales en los cursos de agua superficial, poniendo especial atención en el hierro, aluminio y manganeso, dando prioridad a los cursos de agua superficial que se utilizan para regadío y bebida de animales.
- Realizar nuevas mediciones de cadmio, plomo y selenio en aguas subterráneas, idealmente utilizando la técnica de espectrometría de absorción atómica y poniendo especial énfasis en las que se utilizan para el consumo humano.
- Realizar un estudio amplio de suelos en el que se incluya mediciones de pH, Conductividad Eléctrica, Capacidad de Intercambio Iónico, contenido de materia orgánica, además de aniones, cationes y metales pesados, monitoreando especialmente el cadmio, zinc y plomo. Dicho estudio debiera incorporar tanto muestras del sector del tranque colapsado, como de zonas de cultivo en los sectores más bajos de la cuenca (Botalcura, Pencahue, Corinto, Lo Figueroa).

V. CONCLUSIONES

- En términos generales, no es posible concluir categóricamente que existe contaminación por metales pesados en la cuenca del estero Los Puercos producto del colapso del tranque de relaves de las mineras Las Palmas.
- La mayoría de los metales pesados analizados no superan la NCh 409/1.Of2005 de calidad de agua potable y la NCh 1.333.Of1978, de calidad de agua para otros usos (riego), con la excepción del manganeso y selenio.
- En la mayoría de las muestras de agua superficial, el manganeso supera levemente el LMP por la NCh 1.333.Of1978 ($0,2 \text{ mgL}^{-1}$), sin embargo, sólo en el sector más cercano al tranque de relaves colpasado la contaminación alcanza niveles preocupantes (un orden de magnitud sobre la norma), ante lo que se recomienda monitorearlo, especialmente en dicha fuente.
- El selenio en agua, en general, se encuentra en concentraciones cercanas al LMP por ambas normas chilenas, pero en suelos no supera el LD del ICP—OES, por lo que se recomienda realizar nuevos análisis utilizando la técnica de AAS u otra, para corroborar o descartar su presencia.
- Para las mediciones realizadas en terreno, se encontraron valores de pH entre 6,7 y 8,1 e inferiores a $400 \mu\text{Scm}^{-1}$ para la conductividad eléctrica, no superando en ningún caso los LMP por las normas chilenas.
- A partir de los valores de pH obtenidos se determinó los equilibrios de los carbonatos, estableciéndose que la especie predominante en solución es HCO_3^- .
- En agua superficial, se observa un incremento en la concentración de hierro y aluminio aguas abajo (un orden de magnitud entre Marzo y Octubre), sin embargo, ninguno supera los LMP por las normas chilenas de calidad de agua;

en agua subterránea, ambos elementos presentan bajas concentraciones y no se observan mayores variaciones. Por lo tanto no existe contaminación por Fe y Al en el agua de la cuenca.

- Es posible descartar la existencia de contaminación por zinc en el agua, sin embargo, se encuentra en concentraciones más elevadas en agua superficial y subterránea del sector directamente afectado por el material de relave que en el resto de la cuenca.
- La muestra control (vertiente en Las Palmas Sur) muestra incrementos leves de cadmio, manganeso, hierro y aluminio entre Marzo y Octubre, no implicando riesgo de contaminación.
- En suelos, los metales cadmio, zinc, plomo, cobre, manganeso, bario y hierro han podido ser transportados desde la faena Las Palmas hacia el sector Botalcura, ante lo que se recomienda realizar nuevos análisis a modo de monitoreo, especialmente de Cd, Zn y Pb.
- En suelos, se observó la presencia de cadmio en concentraciones relativamente altas al ser comparadas con el rango normal en la litósfera y con datos obtenidos por el Seremi de Salud Maule (2010), ello podría implicar efectos negativos en la salud humana si se corrobora la posibilidad de que sea ingerido directa o indirectamente.
- Los elementos berilio, cobalto, vanadio, boro y aluminio pueden ser asociados a la formación geológica de la cuenca, ya que se encuentran en mayores concentraciones en los suelos que en el material de relave.
- Los principales factores que podrían favorecer la permanencia de metales pesados en los suelos de la cuenca del estero Los Puercos son: la presencia de

óxidos de Fe, Al y Mn, la textura principalmente arcillosa y el contenido de materia orgánica.

- Las técnicas de ICP-OES y VRA pueden ser utilizadas complementariamente para la determinación de metales en distintas matrices, sin embargo, para análisis particulares se recomienda utilizar la espectrometría de absorción atómica, debido a su mayor sensibilidad.
- A pesar de que el material de relave se ha dispuesto de manera segura después del colapso y de que no se observaron mayores efectos en plazo de un año, ello no garantiza la inexistencia de efectos nocivos producidos por metales pesados en el mediano o largo plazo, tanto en las matrices agua y suelo como en la salud humana.

VI. REFERENCIAS

Libros y textos

- Bityukova L. 1994. Heavy metals in the soils of Tallinn (Estonia) and its suburbs. *Geomicrobiology Journal*. 11: 285-298.
- Corvalán Ponce, M. 2000. Los riesgos de los tranques de relave mineros: el caso de Peñablanca, Observatorio Latinoamericano de Conflictos Ambientales, Santiago, Chile.
- Giusquiani PL, Gigliotti G, Businelly D. 1992. Mobility of heavy metals in urban waste amended soils. *Journal of Environmental Quality*. 21: 330-335.
- Haan S de, Rethfeld H, Driel W van. 1985. Acceptable levels of heavy metals (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) in soils depending on their clay and humus content and cation exchange capacity. Institut voor Bodemvruchbaarheid. Agricultural Centre, Münster. Rapport 9-85, 42 pp.
- Kemmer, F. N. 1997. Manual del agua: Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones, Tomo I. Ed. Mc Graw-Hill. Buenos Aires, Argentina. Pp 6-1 – 6-19.
- Milán, A. 2001. Historia de la minería del oro en Chile. Editorial Universitaria. Santiago. Chile. P 184.
- Pingarrón Carrazón, J. M., Sanchez Batanero, P. 2003. Química Electroanalítica: Fundamentos y aplicaciones. Ed. Síntesis. Madrid, España. Pp 282-287.
- Skoog, D.A., Holler, F.J., y Nieman, T. A. 2001. Principios de Análisis Instrumental. Quinta Edición. Ed. Mc Graw Hill. Pp 812-814.
- Snoeyink, V.L. y Jenkins, D. 1995. Química del Agua. Limusa Noriega Editores. México. Pp 316-334.

Tesis

- Guerra Díaz, F. 2010. Manejo adaptativo del riesgo ambiental, Tesis de grado, Facultad de Ciencias, Universidad de Chile.
- Guevara Esturillo, M. 1999. Jerarquización de tranques de relaves según riesgo ambiental. Tesis de grado. Departamento de Ingeniería Industrial. Universidad de Chile. pp 31-37.

- Sánchez Bascones, M. I. 2003. Determinación de metales pesados en suelos de Mediana del Campo (Valladolid): contenidos extraíbles, niveles de fondo y de referencia. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. Departamento de Química Analítica. Universidad de Valladolid. Disponible en: <http://www.cervantesvirtual.com/obra/determinacion-de-metales-pesados-en-suelos-de-medina-del-campo-valladolid-contenidos-extraibles-niveles-fondo-y-de-referencia--0/>
- Santander Horta, A. 2004. Uso de lógica difusa para la estimación de índices de riesgo y falla de obras hidráulicas en tiempo real. Tesis de grado. Escuela de postgrado de Ingeniería y Ciencias. Facultad de Ciencias Físicas y Matemática. Universidad de Chile. Disponible en: http://www.cybertesis.uchile.cl/tesis/uchile/2004/cf-santander_ah/pdfAmont/cf-santander_ah.pdf [Consulta: 05/10]
- Ortega Arica, K. 2009. Recuperación de oro desde soluciones por intercambio iónico en la compañía minera aurífera Santa Rosa S.A. Tesis de grado. Facultad de Ingeniería geológica, minera y metalúrgica. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú. Disponible en: http://cybertesis.uni.edu.pe/uni/2009/ortega_ak/pdf/ortega_ak.pdf [Consulta: 06/11]
- Paris Mendoza, M. 2006. Estudio de metales pesados en suelos bajo cultivos hortícolas de la provincia de Castellón. Tesis Doctoral, Universidad de Valencia, España. Disponible en: www.tdr.cesca.es/TESIS_UV/AVAILABLE/TDX-0301107...//peris.pdf [Consulta: 12/10]

Documentos

- CENMA. 2001. ILMAL-025, Determinación de Cationes en Aguas por Cromatografía Iónica. Laboratorio de Química y Referencia Medio Ambiental, Centro Nacional del Medio Ambiente (Documento interno).
- CENMA. 2003. ILMAL-024, Determinación de Aniones por Cromatografía Iónica. Laboratorio de Química y Referencia Medio Ambiental, Centro Nacional del Medio Ambiente (Documento interno).

- CENMA. 2007. ILMAL-019, Determinación de Metales pesados por ICP-OES. Instructivo del Laboratorio de Química y Referencia Medio Ambiental. , Centro Nacional del Medio Ambiente (Documento interno).
- Camus, P., Hajek, E. 1998. Historia Ambiental de Chile.
- UNESCO-COMEST. 2005. Informe del Grupo de Expertos sobre el principio precautorio.
- Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile. 2005. Modelación hidrológica de cuencas pluviales, hoya hidrográfica del río Maule
- S.A.G. 2005. Criterios de Calidad de Suelo Agrícola (en revisión). Participantes: Acevedo, E., Carrasco, M.A., León, O., Martínez, E., Silva, P., Castillo, G., Ahumada, I., Borie, G., González, S. Ministerio de Agricultura. Gobierno de Chile.
- Clescer, L., Greenberg, A., Eaton, A. (editores). 1998. Standar Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th Edition, Collection of Samples (1060), 1 - 33—1 - 34).

Recursos electrónicos

- Ecoamérica. 2007. Drenaje ácido de mina. Disponible en www.ecoamerica.cl/pdf_notas/67/eco67_18-21.pdf [Consulta: 07/10]
- Estévez J., Andrade M. L., Marcet P., Montero M. J. 2000. Fijación y movilidad de Cadmio y Zinc en tres tipos de suelos ácidos de Galicia, España. Departamento de Biología Vegetal y Ciencia del Suelo. Facultad de Ciencias. Universidad de Vigo. España. Disponible en: www.suelos.org.ar/publicaciones/vol_18n1/estevez_28-35.pdf [Consulta: 03/11]
- Fuentes Olivares, F. 2005. Algunos comentarios sobre los residuos mineros en la Legislación Chilena, 8ª Jornada de Derecho de Minería. Disponible en: <http://jornadasdederechomineria.blogspot.com/2005/11/algunos-comentarios-sobre-los-residuos.html> [Consulta: 07/10]
- Galán Huertos, E. y Romero Baena, A. 2008. Contaminación de Suelos Por Metales Pesados. Revista de la Sociedad Española de Mineralogía. Nº 10. Pp

- 48-60. Disponible en: www.ehu.es/sem/macla_pdf/macla10/Macla10_48.pdf
[Consulta: 03/10]
- García, I. Y Dorronsoro, C. 2005. Contaminación por metales pesados. En: Tecnología de Suelos. Universidad de Granada. Departamento de Edafología y Química Agrícola. Disponible en: <http://edafologia.ugr.es/conta/tema15/introd.htm> [Consulta: 01/11]
 - ESRI (Environmental Systems Research Institute, Inc.) Información SIG de Chile continental. 2007. Disponible en: <http://www.rulamahue.cl/mapoteca/>
[Consulta: 08/11]
 - Infracon S.A. Consultora. 2006. Estudio: Plan regulador comunal de Penciahue, VII Región del Maule. Disponible en: http://www.e-seia.cl/archivos/ANEXO_N_1_A_MEMORIA.pdf [Consulta: 05/10]
 - Linares Gutierrez, N. 2010. Metalurgia II. Capítulo I: Principios de la flotación de minerales. Disponible en: <http://www.slideshare.net/nlinaresg/capitulo-i-principios-de-la-flotacion-de-minerales> [Consulta: 06/11]
 - López, P., Ainzúa, S., Zolezzi, C., y Vasconi, P. 2003. La Minería y su Pasivo Ambiental, Análisis de políticas públicas. Serie APP. Nº 24. Disponible en: www.terram.cl/nuevo/images/stories/app24relaves.pdf [Consulta: 04/10]
 - OIT, Organización Internacional del Trabajo. 1998. Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo, Capítulo 63: Metales: Propiedades Químicas y Toxicidad. Disponible en: <http://www.insht.es/> [Consulta: 09/11]
 - Pimienta, A., Leal-Quirós, E., Peláez, H., Cerame-Vivas, M. 2007. Fundamentos del control de la contaminación de los sistemas del planeta tierra. Capítulo 4: Suelo y Subsuelo. Universidad Politécnica de Puerto Rico. Disponible en: <http://esse21.usra.edu/ESSE21/> [Consulta: 03/11]
 - PLADECO. 2008-2012. Ilustre Municipalidad de Penciahue. Plan de Desarrollo Comunal Disponible en: <http://www.slideboom.com/presentations/19218/PLADECO-Ilustre-Municipalidad-de-Penciahue> [Consulta: 11/10]
 - Prause, J., Vazquez, S., Versalli, J. y Lifschitz, A. P. 2000. Fraccionamiento de Hierro, Manganeso, Aluminio y Fósforo en Alfisoles, Entisoles, Oxisoles y Ultisoles de la Provincia de Misiones. Cátedra de Edafología. Departamento de

- Suelos. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional del Nordeste. Argentina. www1.unne.edu.ar/cyt/2001/5-Agrarias/A-014.pdf –[Consulta: 03/11]
- Ramírez Morandé, N. A. 2007. Seminario: Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves. D.S. 248. Copiapó. Chile. Disponible en: www.sernageomin.cl [Consulta: 08/10]
 - Ramírez Morandé, N. A. 2010. Seminario: Propuestas para la operación de depósitos de relaves a partir de experiencias recientes; Tema: Consecuencias del terremoto en depósitos de relaves de la zona central-sur de Chile y su relación con el Decreto 248. Servicio Nacional de Geología y Minería. Disponible en: http://www.sernageomin.cl/pdf/sala_prensa/presentaciones/SeminarioCapacitacionTranques/Nelson_Ramirez.pdf [Consulta: 05/10]
 - SAAC Ingenieros SRL. 2004. Metalurgia del oro en la franja aurífera Palpa-Ocoña. Mollehuaca, Ica, Lima. Disponible en: geco.mineroartesanal.com/tiki-download_wiki_attachment.php?attId=135
 - Sernageomín. 2007. Catastro nacional de faenas mineras abandonadas o paralizadas y análisis preliminar de riesgo. Disponible en: www.sernageomin.cl [Consulta: 10/10]
 - SONAMI. 2003. Guía de las Buenas Prácticas Ambientales para la Pequeña Minería. Sociedad Nacional de Minería. Disponible en: www.sonami.cl [Consulta: 06/10]
 - UPM. 2000. Universidad Nacional de educación a distancia. Facultad de Ciencias. Universidad Politécnica Madrid. Disponible en: <http://www.uned.es/cristamine/index.html> [Consulta: 01/11]
 - WHO. 2005. Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. World Health Organization. Disponible en: http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair_agq/en/ [Consulta: 12/10]

Normativas Chilenas

- Ministerio Secretaría General de la Presidencia. 1994. Ley N°19.300 de Bases Generales del Medio Ambiente, modificada por la Ley 20.417 que crea el

Ministerio de Medio Ambiente, el Servicio de Evaluación Ambiental y la Superintendencia del Medio Ambiente.

- Ministerio Secretaria General De La Presidencia. 2000. Decreto Supremo N° 90: Establece Norma De Emisión Para La Regulación De Contaminantes Asociados A Las Descargas De Residuos Líquidos A Aguas Marinas Y Continentales Superficiales.
- Ministerio Secretaria General de la Presidencia. 2001. Decreto Supremo N° 95: Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.
- Ministerio Secretaria General De La Presidencia. 2002. Decreto Supremo N° 46: Establece Norma De Emisión De Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas.
- Ministerio De Minería. 2002. Decreto Supremo N° 132: Reglamento De Seguridad Minera.
- Ministerio de Minería. 2006. Decreto Supremo N° 248: Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves.
- Ministerio De Salud. 1984. Norma Chilena Oficial 409/1.Of. 84 Para La Calidad Del Agua.
- Ministerio De Salud. 1967. Decreto Con Fuerza De Ley N° 725: Código Sanitario.
- Ministerio De Salud. 2000. Decreto Supremo N° 594: Aprueba Reglamento Sobre Condiciones Sanitarias y Ambientales Básicas En Los Lugares De Trabajo.
- Ministerio De Salud. 2005. Decreto Supremo N° 148: Reglamento Sanitario Sobre Manejo De Residuos Peligrosos.
- Ministerio De Agricultura. 1980. Decreto Con Fuerza De Ley N° 3557: Establece Disposiciones Sobre Protección Agrícola.
- Ministerio De Obras Públicas. 1978. Nch1333: Estándares Nacionales De Calidad Ambiental según el uso dado al Recurso,.

VII. ANEXOS

ANEXO 1: Fichas de muestreo

Fecha de muestreo:

Hora del muestreo:

Lugar del muestreo:

Observaciones del lugar:

Nublado _____

Despejado _____

Soleado _____

Temperatura ambiente estimada:

Informaciones de la muestra:

Número o código del envase:

Número o código de la muestra:

Tipo de muestra:

Tipo de muestreo:

Tipo/tamaño del envase:

Preservante:

Análisis requerido:

Características del agua en el sitio de muestreo:

Color:

Olor:

Presencia de sólidos:

Aspecto general:

ANEXO 2: Resumen DS. N° 248/06**REGLAMENTO PARA LA APROBACIÓN DE PROYECTOS DE DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y CIERRE DE LOS DEPÓSITOS DE RELAVES. MINISTERIO DE MINERÍA** (Publicado en el Diario Oficial el 11 de abril de 2007)

En 1970 se dicta el Decreto Supremo N°86 del Ministerio de Minería, norma aplicada a la disposición de residuos de la minería a través de depósitos o tranques de relave (López P y col, 2003), siendo derogada el 11 de Abril del 2007 por el DS. 248/06 por el Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves. Su objetivo es velar porque cada depósito de relave construido en Chile tenga una calidad estructural adecuada para garantizar la seguridad ambiental y de la población que se emplaza en las zonas aledañas a ellos. La mejora del reglamento amplía el campo legal y los antecedentes necesarios al momento de presentar un proyecto de depósito de relaves ante la autoridad correspondiente (Servicio Nacional de Geología y Minería), además se incrementan el número de definiciones y el nivel de especificidad respecto a la determinación de parámetros y variables que deben indicarse en el diseño de un depósito de relaves. Se incluyen medidas técnicas y de control que deben cumplir el diseño y operación de los mismos, explicitándose obligaciones, responsabilidades y derechos de las empresas junto a las funciones y atribuciones del Servicio, como fiscalización y capacidad de dictar sanciones según lo dispuesto en el Reglamento de Seguridad Minera (Ramirez, 2007).

Las consideraciones tomadas en el nuevo reglamento fueron:

- la necesidad de proteger la salud y seguridad de las personas, la protección del medio ambiente y la utilización racional de los recursos naturales;
- la diversidad de sistemas de depósitos de relaves y el avance que han experimentado los métodos de diseño, construcción y operación de aquellos;
- la necesidad de precisar las exigencias técnicas para obtener la aplicación de conceptos más avanzados en la construcción de depósitos de relaves de la minería chilena;
- la importancia de dar cumplimiento a las disposiciones sobre eficiencia y

coordinación de los órganos de la Administración del Estado, contenida en el D.F.L. N°1/19.653, de 2000, que fija el Texto Refundido, Coordinado y Sistematizado de la Ley N°18.575, Orgánica Constitucional de Bases de la Administración General del Estado.

La Tabla A1 indica esquemáticamente los títulos y capítulos del D.S. 248/06.

Tabla A1. Estructura del DS N° 248/06.

Título I	Disposiciones Generales
CAPÍTULO PRIMERO	Propósito y Campo de Aplicación
CAPÍTULO SEGUNDO	Definiciones
CAPÍTULO TERCERO	Funciones y Atribuciones del Servicio
CAPÍTULO CUARTO	Obligaciones de las empresas
CAPÍTULO QUINTO	Responsabilidades y Derechos del Usuario
Título II	Procedimientos para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción y Operación de Depósitos de Relaves, de parte del Servicio
CAPÍTULO PRIMERO	Presentación del Proyecto
CAPÍTULO SEGUNDO	Aprobación del Proyecto
Título III	Construcción de los Depósitos de Relaves
CAPÍTULO PRIMERO	Generalidades
CAPÍTULO SEGUNDO	Ejecución de las Obras
Título IV	Operación y Mantenimiento de los Depósitos de Relaves
CAPÍTULO PRIMERO	Previsiones Generales
CAPÍTULO SEGUNDO	De la Operación y Mantenimiento
CAPÍTULO TERCERO	Emergencias
Título V	Cierre Temporal, Definitivo y Reanudación
CAPÍTULO PRIMERO	Reanudación de las Operaciones luego de un Cierre Temporal
CAPÍTULO SEGUNDO	Cierre Definitivo
Título VI	Algunos criterios de control
Título VII	Sanciones
Título Final	Disposiciones Finales
	ARTÍCULOS TRANSITORIOS

En el Capítulo Primero de las Disposiciones Generales se indica el campo de aplicación y propósito del presente reglamento, así, en el artículo 1 se fijan normas respecto a los “procedimientos para la aprobación de los proyectos de depósitos de relaves mineros” y los “requisitos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves mineros y la disposición de sus obras anexas que garanticen la seguridad de las personas y de los bienes”, explicitándose en el artículo 2 que debe cumplir estas disposiciones “toda faena minera que genere y deba depositar relaves como parte del proceso extractivo”. Finalmente, el artículo 3 señala que es el Servicio Nacional de Geología y Minería quien aplicará y fiscalizará el cumplimiento del reglamento “sin perjuicio de las atribuciones que en materia de fiscalización posean otros órganos del Estado.”

El artículo 4, incluido en el Capítulo Segundo del mismo título, define a los participantes y funciones como el Director (Director Nacional del Servicio Nacional de Geología y Minería), Organismos Fiscalizadores, Servicio Nacional de Geología y Minería, Terceros y Proponente. Por su parte, los artículos 5 y 6 entregan los conceptos y definiciones pertinentes en la materia.

Dentro de las Funciones y Atribuciones del Servicio, descritas en el Capítulo Tercero, se incluyen dictar, aplicar y contolar “normas específicas para cada caso, que en materias de seguridad minera deban cumplir los usuarios de depósitos de relaves”; recibir, aprobar, proponer modificaciones o rechazar solicitudes de aprobación de proyectos de depósitos de relaves; vigilar los depósitos desde el punto de vista de la operación y seguridad minera, velando por el cumplimiento del artículo 64 de la Ley N° 19.300.

Respecto a las obligaciones de las empresas, establecidas en los artículos 8,9 y 10, éstas deben presentar al Servicio un proyecto de depositación de relaves cumpliendo con toda la normativa legal, reglamentaria y disposiciones vigentes, e informar al mismo sobre modificaciones durante la construcción u operación de un depósito o de un proyecto aprobado. En caso de existir algún incumplimiento de las disposiciones legales, es el SERNAGEOMIN quien tiene las facultades para aplicar sanciones de acuerdo al presente reglamento.

Entre las responsabilidades del proponente, descritas en los artículos 11 al 13 se encuentran asumir “consecuencias derivadas de una mala operación, incorrecta aplicación de reglamentos o incumplimiento parcial o total de las instrucciones o normativas del Servicio”.

Al presentar un proyecto, el usuario debe incluir dentro de la solicitud presentada al Servicio una serie de antecedentes enumerados el artículo 14 del Capítulo Primero (Título II). Entre ellos se cuentan información del proponente, descripción general del proceso de extracción, ubicación y capacidad del depósito, cronograma y descripción del método constructivo. Debe incluirse además “antecedentes geológicos, geotécnicos, hidrológicos hidrogeológicos, sísmicos, meteorológicos, topográficos y otros que el Servicio considere necesario, incluyendo ubicación, condiciones y características de los materiales de empréstito que serán usados en la construcción, operación y cierre del depósito”, y “en el caso de un Tranque de Relaves, se debe indicar las características del muro de arena; granulometría; humedad; método de compactación; método de construcción, eje central o aguas abajo, y la forma en que se depositarán las lamas.” Se debe incorporar un Análisis de Estabilidad de Taludes que evaluará en Fases (I, II, III y IV) los posibles riesgos que el depósito pudiera presentar para áreas adyacentes. Existirá también un “Manual de Emergencias de control, mitigación, restauración y compensación de los efectos de accidentes, situaciones de emergencia y eventos naturales” que debe incluir “planos de ubicación del depósito y de las áreas que podrían resultar afectadas en caso de ocurrencia de diferentes eventos causativos”; planes de acción para la ejecución de medidas inmediatas destinadas a eliminar o minimizar los riesgos de daños a las personas”; y “programas de capacitación de personal para la operación segura del depósito y de las obras anexas y para el manejo adecuado de las situaciones de emergencia.” Si no existiesen observaciones, el Servicio aprobará el proyecto mediante Resolución en un plazo de 60 días hábiles desde la presentación de la solicitud por el proponente.

En el Título III se explicita que “será responsabilidad exclusiva del usuario velar que la construcción del depósito se ajuste al proyecto aprobado y cumpla con todas las especificaciones técnicas contenidas en la Resolución Aprobatoria”, además de informar sobre modificaciones, el inicio de las obras y cronograma. El Servicio realizará

inspecciones periódicas con el fin de verificar que la construcción del depósito se ajusta a lo especificado en el proyecto aprobado, pudiendo ordenar el cese de la construcción u operación si no se cumpliera con lo establecido en los artículos anteriores.

De manera análoga al Título III, el Título IV señala al usuario como responsable de comunicar al Servicio “la fecha exacta de la puesta en operación del depósito de relaves, y cualquier alteración que se produzca”, enviar al mismo “un informe trimestral sobre la operación y mantención del depósito de relaves” además de hacerse responsable de la operación y mantención del depósito. Por su parte, el Servicio fiscalizará el cumplimiento de la operación de acuerdo al proyecto aprobado, pudiendo solicitar información adicional que considere necesaria y sancionar el incumplimiento de las normas, “conforme a la Ley y el Reglamento, si corresponde.” El Capítulo Tercero apunta que se “deberá elaborar y mantener actualizado el Manual de Emergencias del depósito de relaves, definido en la letra “r” del artículo 14 del presente Reglamento”, se deberá “notificar, de inmediato, al Servicio la ocurrencia de cualquier emergencia, indicando las características del siniestro, los daños causados, los riesgos potenciales de un posible empeoramiento de la situación y las medidas adoptadas para subsanar la emergencia”. Finalmente, si el Servicio determinara la necesidad de ejecutar trabajos adicionales para restablecer la seguridad del depósito, estos serán costeados por el usuario.

Ante el cierre de faenas, definitivo o temporal, el usuario “deberá adoptar las medidas necesarias para evitar el riesgo de accidente, comunicándolas previamente al Servicio para su aprobación”, del mismo se debe solicitar autorización al mismo para reiniciar las operaciones luego de un cierre temporal. En el caso de un cierre definitivo, “deberá presentarse un Plan de Cierre, conforme al Título X del Reglamento de Seguridad Minera”, el cual debe contener “un plan de acondicionamiento del depósito para soportar condiciones en el largo plazo, considerando medidas de refuerzo y rehabilitación, tal que proteja la salud y seguridad de las personas, y restituya el terreno en condiciones aceptables, conforme a lo prometido y aceptado en su Plan de Cierre.”

Los criterios control, descritos en el Título VI, detallan aspectos técnicos respecto a la construcción, operación y manejo de los depósitos con el fin de evitar deterioro en estructuras y posibles accidentes. Por ejemplo, el artículo 48 señala: “en el caso de los Tranques de Relaves, la laguna de aguas claras debe mantenerse lo más alejada posible del muro de contención con el fin de evitar humectar demasiado el muro, con el objeto de evitar su saturación, y el consecuente aumento de la presión de poros y el eventual colapso.”

Respecto a las sanciones, el artículo 58 del Título VII señala que “las contravenciones al presente Reglamento y a las resoluciones que para su cumplimiento se dispongan, en que incurran las empresas mineras, serán sancionadas en conformidad a lo dispuesto en los artículos 590 y siguientes del Reglamento de Seguridad Minera.

ANEXO 3: Detalle de las campañas de muestreo

(i) Primera campaña

Se realizó el 21/03/2010. El material sólido aún permanecía descubierto en el sector, bloqueando los esteros Las Palmas y Los Ladrones, que se encontraban secos debido a las faenas de limpieza.

Se obtuvieron 5 muestras de agua: dos en la localidad de Tapihue, una en el sector de Botalcura y dos en la zona cercana al pueblo de Pencahue (ver Figura 6, página 34). La Tabla A2 apunta en detalle la ubicación y tipo de fuente de cada una.

Tabla A2. Ubicación y fuente de los puntos de muestreo (21/03/2010).

Muestra	Ubicación	Tipo de Fuente	Coordenadas UTM*	
			Este	Norte
I-A	Hacienda Las Palmas	Pozo	248.354	6.102.545
I-B	Las Palmas Sur, "aguas arriba"	Vertiente	249.198	6.101.135
I-C	Estero Los Puercos en Botalcura	Superficial	242.783	6.097.748
I-D	Estero los Puercos en Pencahue	Superficial	242.741	6.081.421
I-E	Parcela 9, Pencahue	Noria	242.446	6.081.494

Obs.: (*) Huso 19 S, Datum WGS 84.

(ii) Segunda campaña

Realizada el 22/07/2010, pocos días después de primeras lluvias de la estación, cuando los caudales han aumentado. Abarcó el sector de Pencahue, obteniéndose en total 3 muestras de agua, dos de las cuales corresponden a puntos de la campaña anterior: una de agua superficial (mismo lugar de la muestra I-D) y dos de consumo, siendo una de agua potable del pueblo de Pencahue y otra de agua de noria (misma ubicación que la muestra I-E, de la primera campaña). La tabla A3 apunta en detalle la ubicación y tipo de fuente de cada muestra.

Tabla A3. Ubicación y fuente de los puntos de muestreo (22/07/2010).

Muestra	Ubicación	Tipo de Fuente	Coordenadas UTM*	
			Este	Norte
II-A	Parcela 9, Pencahue	Noria	242.446	6.081.494
II-B	Estero los Puercos en Pencahue	Superficial	242.741	6.081.421
II-C	Pueblo Pencahue	Potable	245.499	6.080.002

Obs.: (*) Huso 19 S, Datum WGS 84.

(iii) Tercera campaña

Se realizó el 07/10/10. En época estival existe un aumento de las temperaturas, disminución de precipitaciones, y la estabilización de los caudales en los canales de regadío. Se obtuvieron muestras de agua, repitiendo 4 de los 5 puntos de la primera campaña. Además se incorporaron muestras de suelo superficial y profundo de los tres sectores estudiados. La Tabla A4 apunta en detalle la ubicación y tipo de fuente de las muestras de agua y suelos.

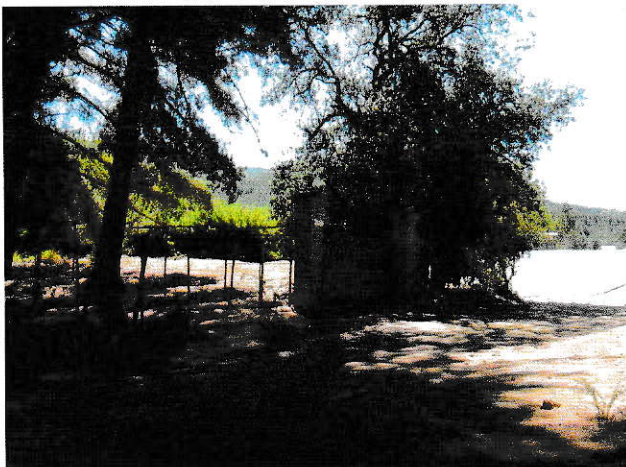
Tabla N° A4. Ubicación y fuente de los puntos de muestreo (07/10/10).

Muestra	Ubicación	Tipo de Fuente	Coordenadas UTM*	
			Este	Norte
III-A	Estero Los Ladrones	Superficial	248.354	6.102.545
III-B	Las Palmas Sur, "aguas arriba"	Vertiente	249.198	6.101.135
III-C	Estero Los Puercos en Botalcura	Superficial	242.783	6.097.748
III-D	Parcela 9, Pencahue	Noria	242.446	6.081.494
III-E	Estero los Puercos en Pencahue	Superficial	242.741	6.081.421
S-01	Ribera del Estero Los Ladrones	Relave (0 -10 cm)	248.354	6.102.545
S-02		Suelo (40-50 cm)		
S-03	Estero Los Puercos en Botalcura	Suelo (0 -10 cm)	242.783	6.097.748
S-04		Suelo (40-50 cm)		
S-05	Parcela 9, Pencahue	Suelo (0 -10 cm)	242.446	6.081.494
S-06		Suelo (25-35 cm)		

Obs.: (*) Huso 19 S, Datum WGS 84.

FOTOGRAFÍAS DE LOS PUNTOS DE MUESTREO

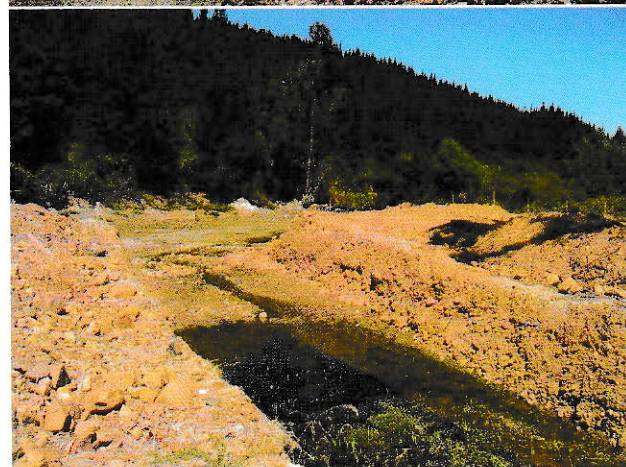
Sector Tapihue



Portón de entrada a la Hacienda Las Palmas, donde se tomó muestras de agua de pozo (I-A). El material de relave se encuentra al costado, al otro lado del estero Los Ladrones.

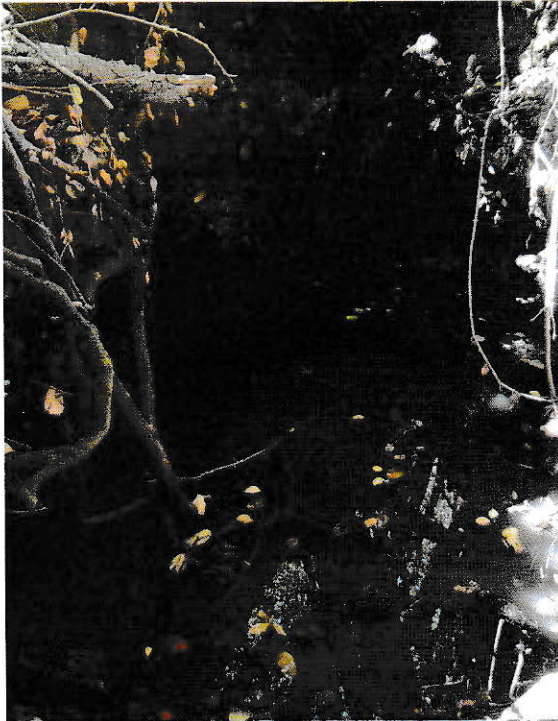


Vista sur del estero Los Ladrones. A la derecha se aprecia el material de relave cubierto como mecanimo de mitigación. Hacia la izquierda se ubica la Hacienda Las Palmas.

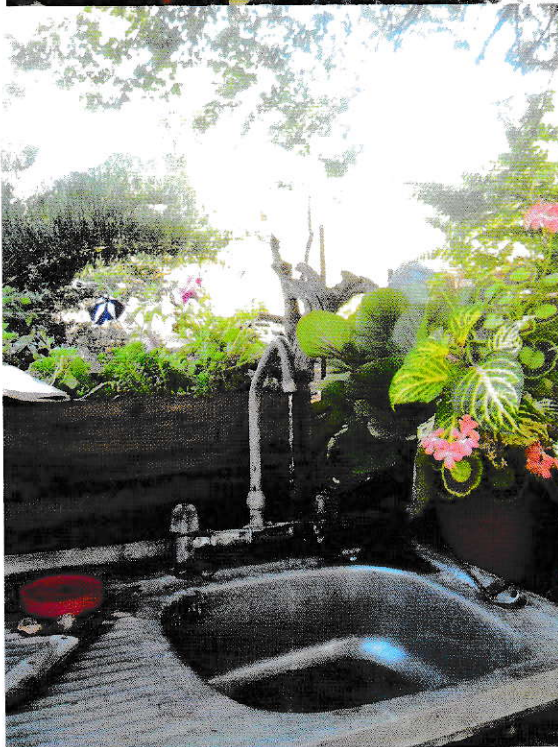


Vista norte del del estero Los Ladrones, donde se tomó la muestra III-A (superficial, tercera campaña). Al costado derecho se tomó las muestras del material de relave y suelo correspondiente a las muestras S-01 y S-02, respectivamente.

Figura A1. Imágenes correspondientes a los puntos de muestreo de agua y suelos en el sector Tapihue.



Agua de vertiente en Las Palmas sur correspondiente a la muestra I-B y III-B, tomadas en Marzo y Octubre, respectivamente.



Llave de agua cuya fuente es la vertiente señalada en la imagen anterior.

Figura A2. Imágenes correspondientes a los puntos de muestreo de agua de vertiente (control) en el sector Las Palmas Sur (Tapihue).

Sector Botalcura

Puente sobre el estero Los Puercos en Botalcura. Punto donde se tomó las muestras de agua I-C y III-C, en Marzo y Octubre, respectivamente, y las de suelos S-03 y S-04.



Vista "aguas abajo" del estero Los Puercos en Botalcura.

Figura A3. Imágenes correspondientes a los puntos de muestreo de agua superficial del estero Los Puercos y suelos en el sector Botalcura.

Sector Pencahue



Vista norte desde el puente Los Puercos en Pencahue. Las muestras tomadas en este punto fueron la I-D, II-B y III-E, incluyendo las tres campañas.



Vista sur desde el puente Los Puercos en Pencahue.

Figura A4. Imágenes correspondientes a los puntos de muestreo de agua superficial del estero Los Puercos en el sector Pencahue.

ANEXO 4: Metodología de recolección y preservación de muestras⁸

1060. RECOLECCIÓN Y PRESERVACIÓN DE MUESTRAS

1060 A. Introducción

El objetivo del muestreo es recolectar una porción de material lo suficientemente pequeño en volumen para que sea transportada convenientemente y aún lo suficientemente grande para propósitos analíticos. Esto implica que la muestra sea representativa del material que se ha muestreado, en cuanto a las proporciones o concentraciones de todos los componentes. Además, se debe poner énfasis en la precisión del muestreo y en la adecuada manipulación de las muestras para prevenir cambios o contaminación antes de realizar los análisis, y asegurar de este modo la validez de los datos.

Si bien, esta sección detalla la recolección y preservación de muestras de agua y de aguas residuales, los principios generales también aplican para el muestreo de sólidos o semisólidos.

1. Requerimientos generales

- Planificación anticipada de la técnica y el plan de muestreo, de manera disminuir el riesgo de error y optimizar la representatividad de la muestra.
- Evitar cualquier manipulación que pueda producir deterioro, contaminación o compromiso de la muestra antes de ser analizada.
- Asegurarse de que todos los equipos y contenedores de muestra estén limpios y libres de contaminantes.
- Según el tipo de muestra, siga el procedimiento más adecuado, por ejemplo, llenar el envase si se trata muestras para análisis orgánicos, o bien, deje espacio para oxigenación para análisis microbiológicos e inorgánicos.
- Se deben considerar especiales precauciones en el caso de muestras que contengan compuestos orgánicos y metales traza, ya que al presentarse en muy bajas concentraciones, pueden perderse total o parcialmente o ser fácilmente contaminadas.
- Las muestras compuestas pueden obtenerse en un período de tiempo determinado, a distintas profundidades o en distintos puntos de muestreos, sin embargo, a veces puede ser más informativo analizar numerosas muestras por separado que una compuesta.
- Realizar un registro detallado donde se identifique cada envase, establezca si fue filtrada o no, incluya fecha, hora, ubicación exacta, y el tipo de muestra. Además, cualquier información adicional como temperatura del agua, condiciones climáticas, nivel de agua, etc.
- Usar tinta a prueba de agua para los marcadores.
- Usar mapas, GPS, u otro sistema de ubicación geográfica para facilitar la descripción de los puntos de muestreo.

⁸ Extracto de Standar Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20^a edición, Collection of Samples (1060), 1 - 33—1 - 34.

- En el caso de sistemas de distribución, recolectar la muestra luego de haber liberado agua durante 2 a 3 minutos o hasta que ésta provenga de la fuente principal, para asegurar que la muestra sea representativa. La misma consideración aplica en el caso de pozos de agua subterránea.
- Cuando las muestras son tomadas desde un río o arroyo, los resultados observados pueden variar con la profundidad, caudal y distancia de la orilla. Si existe el equipo disponible, tomar una muestra en el centro del arroyo que integre desde el fondo a la superficie, o bien, de lado a lado a una profundidad media.
- En caso de estar interesados en el análisis de aceites y grasas, es preferible recolectar la muestra en la superficie.

2. Consideraciones de seguridad

- Ante la eventualidad de que algunos constituyentes de la muestra sean tóxicos, se recomienda el uso de elementos de seguridad como guantes, overoles, delantales, u otros elementos protectores, especialmente de ojos como antiparras o lentes.
- Evítense comer, beber o fumar cerca de las muestras, del lugar del muestreo o laboratorio; igualmente, mantener alejadas fuentes de calor como llamas.
- Si muestras inflamables se deben refrigerar, use sólo refrigerantes no inflamables.
- Evite accidentes tomando muestras en lugares seguros, y evitando situaciones de riesgo. Si es necesario, consulte a un profesional competente.
- Etiquete adecuadamente cualquier muestra que se sospeche o sepa peligrosa debido a inflamabilidad, corrosividad, toxicidad, capacidad oxidativa o radioactividad, de manera que manipule y almacene con precaución.

1060 B. Recolección de muestras

1. Tipos de muestras

a. Muestra simple (grab): Corresponde a una muestra única recolectada en un lugar específico en un corto período de tiempo (s, min). Representa una “fotografía” en tiempo y espacio del área de muestreo. La representatividad de este muestreo está sujeta a las variaciones de la fuente de agua, como el caudal; asimismo, es necesario considerar los cambios estacionales al planificar los intervalos de muestreo.

b. Muestra compuesta: Este tipo de muestra podría otorgar mayor representatividad en matrices donde la concentración de analitos puede variar en cortos períodos de tiempo y espacio. Pueden obtenerse al combinar las muestras simples o al usar equipos o instrumentos diseñados para ello. Entre sus ventajas se cuentan la reducción de costos al disminuir el número de muestras y la ya mencionada mayor representatividad de matrices heterogéneas; mientras las desventajas incluyen la potencial dilución, un aumento de interferencias e interacciones entre los analitos.

c. Muestra integrada: Este tipo de muestra puede obtenerse al analizar distintas muestras simples recolectadas en distintos puntos simultáneamente usando equipos y procedimientos específicos como el EWI (equal-width increment) o EDI (equal-discharge-increment). Debido a su complejidad, es necesario planificar y describir

adecuadamente el plan de muestreo, considerando los equipos necesarios y los factores como el volumen, movimiento y composición del agua a muestrear.

2. Procedimiento de cadena de custodia

La cadena de custodia, bien diseñada y ejecutada, asegurará la integridad de las muestras desde la recolección hasta el reporte de los datos, especialmente en caso de que los resultados sean utilizados en litigación. Si ese no es el caso, los procedimientos son útiles para controles rutinarios de las muestras. A continuación se resumen los aspectos más importantes de los procedimientos de cadena de custodia:

a. Etiquetas (incluyendo códigos de barra): son necesarias para una precisa identificación de las muestras. Incluya al menos la siguiente información: número único, tipo de muestra, nombre del recolector, fecha y tiempo de recolección, lugar y preservante.

b. Sellos: se utilizan para detectar manipulaciones no autorizadas previo al análisis. Puede usarse papel autoadhesivo en el que se incluya la siguiente información: número de la muestra, nombre del recolector, fecha y tiempo de muestreo. También pueden utilizarse sellos plásticos.

c. Ficha de muestreo: registro de la información pertinente al estudio del terreno o muestreo. Como mínimo debe incluir la siguiente información: objetivos del muestreo, ubicación de los puntos, nombre y dirección de una persona de contacto en terreno, tipo de muestra, además de método, fecha y tiempo de preservación. Si la muestra es de agua residual, identifique el proceso que la genera. Incorporar información respecto al número y volumen de muestras tomadas, fecha y hora de recolección y descripción del punto de muestreo (mapas o fotografías) y del método utilizado. El correcto registro de los puntos propuestos permite no depender de la memoria de quien recolecte las muestras, y así poder replicar el proceso.

d. Registro de la cadena de custodia: corresponde a un registro completo que acompaña a cada muestreo e incluye la información general descrita en los puntos anteriores, además de las firmas de las personas involucradas en la cadena de posesión.

e. Ficha de requerimiento para el análisis de la muestra: esta ficha acompaña a la muestra al laboratorio e incluye gran parte de la información de la ficha de muestreo. Es de uso interno del laboratorio e incluye nombre del personal, análisis requerido y condiciones en que llega la muestra.

f. Despacho de la muestra al laboratorio: se recomienda despachar la muestra al laboratorio lo más rápido posible, idealmente antes de dos días. Los tiempos y formas de despacho deben ser considerados dentro de la planificación del muestreo.

g. Recepción e ingreso de las muestras: en el laboratorio, previo al ingreso de las muestras, el funcionario verificará que se cumplan las condiciones de sello y seguridad, y que contengan la información necesaria.

h. Asignación de las muestras para análisis: a quien se le ha asignado el análisis de la muestra, es responsable de la seguridad y custodia de la misma.

i. Desecho: se debe mantener almacenada la muestra hasta que el proyecto completo termine o hasta que los datos hayan sido revisados y aceptados. Documentar la eliminación de las muestras y asegurar el cumplimiento de las normas locales o internacionales.

3. Metodos de muestreo

a. Muestreo manual: para el muestreo manual se necesita un equipo mínimo, pero puede ser costoso y de alto consumo de tiempo si se trata de muestreos rutinarios o de muestreos a gran escala. Requiere de técnicos entrenados y es a menudo necesario para investigaciones donde la caracterización del campo y la recolección de muestras complejas son esenciales.

b. Muestreo automático: el muestreo automático puede eliminar errores humanos que podrían ocurrir en el muestreo manual, también reducir costos y proveer los medios para muestreos más frecuentes. Asegúrese de que el instrumento de muestreo no contamine la muestra, para lo que se recomienda averiguar las posibles incompatibilidades entre el material de los reservorios y el contenido de las muestras. El programa de muestreo automático debe responder a las necesidades de muestreo de la investigación.

c. Muestreo por sorción: el uso de sorbentes sólidos, particularmente los discos tipo membrana, son cada vez más frecuentes. Estos métodos ofrecen la ventaja de un muestreo rápido y de bajo costo si los analitos de interés pueden ser adsorbidos y desorbidos eficientemente.

4. Contenedores de muestra

El tipo de contenedor utilizado es de máxima importancia. Se debe asegurar y registrar que los contenedores estén libres del analito de interés, especialmente cuando se analizarán bajos niveles de dichos analitos. Comúnmente, los reservorios son de plástico o vidrio, pero el tipo de material utilizado dependerá de los analitos que se desea investigar.

Algunos analitos pueden ser disueltos o absorbidos por las paredes del contenedor plástico, o bien, contaminantes desde el plástico pueden lixiviar a la muestra. Otro riesgo es el eventual quiebre o rotura del contenedor.

Se recomienda el uso de contenedores de vidrio para todos los análisis orgánicos como los orgánicos volátiles, orgánicos semivolátiles, pesticidas, PCBs, y aceites y grasas. Algunos analitos son sensibles a la luz, por lo que se recomienda uso de vidrio color ambar para evitar la fotodegradación.

Como ejemplos, la sílica, sodio y boro, pueden lixiviar desde el vidrio, pero no del plástico, y pesticidas en niveles traza pueden ser sorbidos en vidrio. En estos casos se recomienda el uso de vidrio grueso. Para muestras que contengan compuestos orgánicos no se recomienda el uso de contenedores plásticos, exceptos si estos son fabricados en base a polímeros fluorados como el politetrafluoretileno (PTFE).

Finalmente, si las condiciones de muestreo no permiten seguir estas recomendaciones, es posible utilizar otro tipo de recipiente registrando el tipo y fuente del contenedor y la técnica de preparación. Para asegurar la calidad del análisis, la inclusión de un blanco puede ser necesaria.

5. Número de muestras:

Debido a la variabilidad de los procedimientos analíticos y de muestreo, un sólo muestreo es insuficiente para alcanzar cualquier nivel de confiabilidad razonables. Existen variadas formas de determinar el número de muestras necesarias, según el

análisis estadístico a realizar. Como un ejemplo, si la desviación estándar en general se conoce, el número de muestras requeridas para una matriz móvil como el agua, puede estimarse según la siguiente expresión:

$$N \geq (ts/U)^2$$

Donde,

N = número de muestras

t = estadística t-Student para el nivel de confianza

s = desviación estándar general

U = nivel aceptable de incerteza

La ecuación asume que se conoce el error total. La variabilidad total consiste en todas las fuentes de variabilidad, incluyendo: la distribución de los analitos de interés dentro del sitio de muestreo, la recolección, preservación, preparación y análisis de las muestras y el manejo y reporte de los datos. En términos simples el error o variabilidad, se divide entre muestreo y los componentes del análisis; desafortunadamente, el analista sólo trabaja con el error del sistema de medición, pues no se conoce el error de muestreo.

Existen otras ecuaciones más precisas, las que se basan en la distribución Z para determinar el número de muestras necesarias para estimar la concentración media cuando la variabilidad es estimada en términos absolutos, usando la desviación estándar. El coeficiente de variación (desviación estándar relativa) es usada cuando la variabilidad es estimada en términos relativos.

El número de muestras aleatorias recolectadas en terreno puede ser parcialmente influenciado por el método que se usará. Los valores de la desviación estándar, sea absoluta o relativa, puede ser obtenida en la literatura. Sin embargo, la estimación del número de muestras basado sólo en estos datos resultará en una subestimación, pues sólo se consideran las varianzas analíticas.

6. Volúmenes de muestra

Recolecte 1 L de muestra para cada análisis físico y químico. Para ciertas determinaciones es necesario tomar mayor volumen de muestras. La tabla 1060:1 enlista los volúmenes ordinarios requeridos para análisis, pero se recomienda consultar al laboratorio las necesidades analíticas del procedimiento de muestreo, pues ello tiene relación con el objetivo y la calidad de la investigación.

No utilice muestras de un mismo contenedor para distintos análisis, ya que los métodos de recolección y manipulación son diferentes para cada tipo de muestra. Recolecte el volumen suficiente de muestra en el contenedor apropiado con el fin de cumplir los requerimientos de manipulación, almacenamiento y preservación de las muestras.

Tabla 1060:I – Resumen de muestreo especial y requerimientos manuales

Determinación	Material	Tamaño mínimo de muestra (mL)	Tipo de muestra	Preservación	Máximo almacenamiento	
					Recomendado	Regulado
Acidez	P, V (B)	100	s	Refrigeración	24 h	14 d
Alcalinidad	P, V	200	s	Refrigeración	24 h	14 d
BOD	P, V	1000	s, c	Refrigeración	6 h	48 h
Boro	P (PTFE) o cuarzo	1000	s, c	HNO ₃ (pH<2)	28 d	6 meses
Bromuro	P, V	100	s, c	No requerido	28 d	28 d
Carbón orgánico total	V (B)	100	s, c	Analizar inmediatamente	7 d	28 d
Dióxido de carbono	P, V	100	s	Analizar inmediatamente, o refrigerar y agregar HCL, H ₃ PO ₄ o H ₂ SO ₄ (pH<2)	0,25 h	-
Cloruros	P, V	50	s, c	No requerido	-	28 d
Cloruro residual total	P, V	500	s	Analizar inmediatamente	0,25 h	0,25 h
Dióxido de cloro	P, V	500	s	Analizar inmediatamente	0,25 h	-
Clorofila	P, V	500	s	Sin filtrar: oscuridad a 4 °C / Filtrado: oscuridad, -20 °C	24-48 h	
Color	P, V	500	s, c	Refrigeración	48 h	48 h
Conductancia específica	P, V	500	s, c	Refrigeración	28 d	28 d
Cianuro total	P, V	1000	s, c	NaOH (pH>12), refrigeración, oscuridad	24 h	14 d, 24 h si hay sulfuros
Flúor	P, V	1000	s, c	No requerido	28 d	28 d
Dureza	P, V	100	s, c	HNO ₃ o H ₂ SO ₄ (pH<2)	6 meses	6 meses
Yodo	P, V	500	s	Analizar inmediatamente	0,25 h	-
Metales	P (A), V (A)	1000	s, c	HNO ₃ (pH<2)	6 meses	6 meses
Cromo VI	P (A), V (A)	1000	s	Refrigeración	24 h	24 h
Mercurio	P (A), V (A)	1000	s, c	HNO ₃ (pH<2), refrigeración	28 d	28 d

Continuación Tabla 1060:I

Amonio	P, V	500	s, c	Analizar rápidamente o agregar H ₂ SO ₄ (pH<2), refrigeración	7 d	28 d
Nitrato	P, V	100	s, c	Analizar rápidamente, refrigeración	48 h	48 h
Nitrato+Nitrito	P, V	200	s, c	H ₂ SO ₄ (pH<2), refrigeración	1-2 d	28 d
Nitrito	P, V	100	s, c	Analizar rápidamente, refrigeración	no	48 h
Olor	V	500	s	Analizar rápidamente, refrigeración	6 h	-
Aceites y grasas	V, boca ancha	1000	s	HCL o H ₂ SO ₄ (pH<2), refrigeración	28 d	28 d
Pesticidas	V (S), PTFE	1000	s, c	Refrigeración	7 d	7 d
Fenoles	P, V, PTFE	500	s, c	H ₂ SO ₄ (pH<2), refrigeración	-	28 d desde extracción
Oxígeno disuelto	V, Botella BOD	300	s	Analizar inmediatamente	0,25 h	0,25 h
Ozono	V	1000	s	Analizar inmediatamente	0,25 h	-
pH	P, V	50	s	Analizar inmediatamente	0,25 h	0,25 h
Fosfato	V (A)	100	s	Filtrar inmediatamente, refrigeración	48 h	-
Fosforo total	P, V	100	s, c	H ₂ SO ₄ (pH<2), refrigeración	28 d	-
Salinidad	V, sello de cera	240	s	Analizar inmediatamente o usar sello de cera	6 meses	-
Silica	P (PTFE) o cuarzo	200	s, c	Refrigeración	28 d	28 d
Sulfatos	P, V	100	s, c	Refrigeración	28 d	28 d
Sulfuros	P, V	100	s, c	Refrigeración	28 d	7 d
Temperatura	P, V	-	s	Analizar inmediatamente	0,25 h	0,25 h
Turbidez	P, V	100	s, c	Analizar inmediatamente	24 h	48 h

1060 C. Almacenamiento y preservación de muestras

Es prácticamente imposible preservar de manera completa e inalterable las muestras, ya sean de desechos domésticos, industriales o aguas naturales, porque la estabilidad de cada constituyente nunca podrá ser lograda. En el mejor de los casos, las técnicas de preservación sólo retardan los cambios químicos y biológicos que inevitablemente ocurrirán luego de la recolección de la muestra.

1. Almacenamiento de muestras antes del análisis

a. Naturaleza de los cambios en la muestra: algunas determinaciones son más afectadas que otras según el almacenamiento de la muestra. Ciertos cationes pueden ser adsorbidos por las paredes de los contenedores de vidrio, o bien, puede producirse un intercambio iónico, entre ellos se incluye: bromo, plomo, cadmio, aluminio, cobre, hierro, manganeso, plata y zinc; los cuales deben idealmente recolectarse separadamente en botellas limpias y acidificar con ácido nítrico ($\text{pH} < 2$) para minimizar la precipitación y adsorción en las paredes de los contenedores.

Algunos parámetros, como la temperatura y pH, pueden cambiar rápidamente, lo que conlleva a alteraciones en ciertos compuestos orgánicos y gases disueltos. Por ello, se recomienda determinar la temperatura, el potencial de oxidación-reducción, pH, gases disueltos, conductancia específica, turbidez y alcalinidad, inmediatamente después de recolectada la muestra.

Cambios en el pH, alcalinidad y balance del dióxido de carbono, pueden causar la precipitación de carbonatos de calcio, disminuyendo los valores de calcio y dureza total.

Hierro y manganeso son fácilmente solubles en sus estados de oxidación bajos, pero relativamente insolubles en los altos. Por lo tanto, estos cationes pueden precipitar o disolverse en el sedimento, dependiendo del potencial de reducción de la muestra. La actividad microbológica puede afectar el contenido de nitrato-nitrito-amonio, la concentración de fenol o BOD o la reducción de sulfato a sulfuro.

La actividad biológica presente en las muestras podría cambiar el estado de oxidación de algunos constituyentes, algunos de los cuales pueden ser convertidos en material de los enlaces orgánicos de las estructuras celulares o intervenir en la destrucción de la célula, implicando la liberación de material celular a la solución. Los ciclos del fósforo y nitrógeno son ejemplos conocidos de la influencia biológica en la composición de la muestra.

En el caso de los compuestos orgánicos volátiles, la muestra debe ser recolectada llenando completamente el contenedor. Es importante evitar el derrame o la entrada de aire, si se ha agregado como preservante ácido clorhídrico o ascórbico.

b. Intervalo de tiempo entre recolección y análisis de las muestras: en términos generales, mientras menos tiempo transcurra entre la toma de muestras y su análisis, se incrementará la confiabilidad de los resultados.

Como se ha mencionado anteriormente, se debe chequear con el laboratorio cuál será el tiempo recomendado entre la toma de muestras y el análisis a realizar, en relación al tipo de muestra y a la estabilidad de los analitos bajo las condiciones de almacenamiento.

Los cambios que pudieran producirse por el crecimiento microorganismos son ampliamente retardados mediante el almacenamiento de la muestra a baja temperatura ($< 4^{\circ}\text{C}$, pero sobre el punto de congelamiento).

2. Técnicas de preservación

Para minimizar el potencial de volatilización o biodegradación entre la toma de muestras y su análisis, es necesario mantenerlas tan frías como sea posibles sin congelarlas. Se recomienda el uso de cubos de hielo o sustitutos comerciales de éste, pero no hielo seco pues puede congelar las muestras y producir el quiebre de contenedores de vidrio.

No existe un método de preservación enteramente satisfactorio, por lo que se debe escoger el método más adecuado de acuerdo a la determinación que se desea. Use preservantes químicos sólo cuando no interfieran en el análisis; cuando los utilice, agréguelos al contenedor antes de tomar la muestra. Los métodos de preservación para una determinación pueden interferir con otra, para determinaciones múltiples es necesario dividir y preservar separadamente. Todo método de preservación puede ser inadecuado cuando existe material suspendido en la solución. No use formaldehído como preservante para muestras colectadas para análisis químicos, pues afecta muchos de los analitos sujetos a investigación.

Los métodos de preservación son relativamente limitados y buscan principalmente retardar la acción biológica, la hidrólisis de compuestos y complejos químicos, y la volatilidad de constituyentes.

La discusión anterior no pretende entregar reglas absolutas para prevenir posibles cambios. El grado de dependencia de la determinación analítica descansa en la experiencia y buen juicio de quien recolecta la muestra. Sin embargo, el número de muestras requerido para niveles de confianza de calidad de acuerdo a los objetivos, depende de ecuaciones estadísticas como las discutidas anteriormente.

ANEXO 5: Cálculo de Límites de Detección y Cuantificación para VRA

El límite de detección de la técnica se calcula a partir de la pendiente de una curva de calibración. Los datos se obtuvieron agregando repetidamente volúmenes de concentración conocida a la celda de trabajo, y midiendo la corriente máxima en cada caso. Las condiciones de trabajo fueron las siguientes:

Modo de trabajo:	“Stripping Techniques”, LSSV.
Voltaje de barrido:	-1300–300 mV
Velocidad de barrido:	35 mV/s
Tiempo de reposo:	30 s
Sensibilidad:	$1E^{-6} \text{ AV}^{-1}$
Tiempo de electrificación:	180 s.

En todos los casos se trabajó con volumen de celda de 20 mL y con soluciones de 10 mgL^{-1} de plomo, cadmio y zinc, obtenidas a partir de estándares de 1000 mgL^{-1} de cada metal. Los volúmenes agregados variaron entre 20 y 40 μL de las soluciones preparadas.

El límite de detección (LD) se calcula utilizando la ecuación i), mientras el límite de cuantificación (LC) se calcula mediante la ecuación ii):

$$LD = \frac{3\sigma}{S} \quad \text{i)} \qquad LC = \frac{10\sigma}{S} \quad \text{ii)}$$

Donde,

σ = Desviación Estándar

S = Pendiente

En esta técnica, la desviación estándar (σ) se calcula utilizando el valor correspondiente al intercepto de la curva de calibración.

El cálculo de la concentración en la celda se realizó utilizando la ecuación iii):

$$V_a \times C_a = V_c \times C_c \quad \text{iii)}$$

Donde,

V_a = Volumen agregado

C_a = Concentración agregada ($10 \text{ mgL}^{-1} = 10000 \mu\text{gL}^{-1}$)

V_c = Volumen celda = 20 mL

C_c = Concentración celda

La Tabla A5 muestra las corrientes límites para cada concentración (C_c) en celda.

Tabla A5. Valores de concentración y corriente límite utilizados en las curvas de calibración de plomo, cadmio y zinc.

Concentración de Plomo (μgL^{-1})	Corriente lim (μA)	Concentración de Cadmio (μgL^{-1})	Corriente lim (μA)	Concentración de Zinc (μgL^{-1})	Corriente lim (μA)
10	0,2375	20	0,3385	150	61.9
20	0,455	60	1,001	225	82.86
30	0,7106	80	1,343	300	99.4
40	0,923	100	1,519	375	145.2
50	1,24	120	1,74	450	159.1
60	1,56	-	-	150	61.9

Las gráficas siguientes muestran la relación lineal y el valor de la pendiente para cada metal:

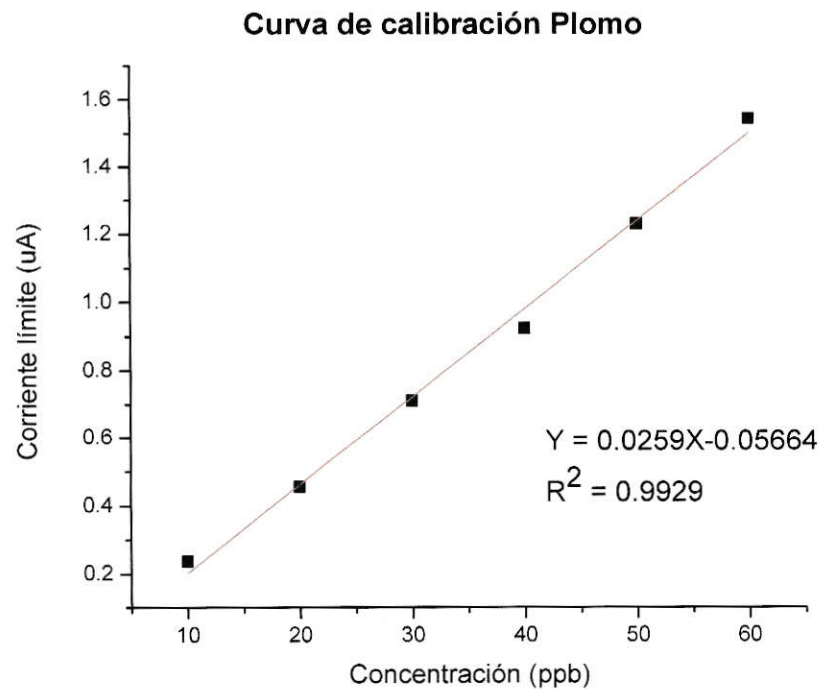


Figura A6. Curva de calibración de Plomo para VRA.

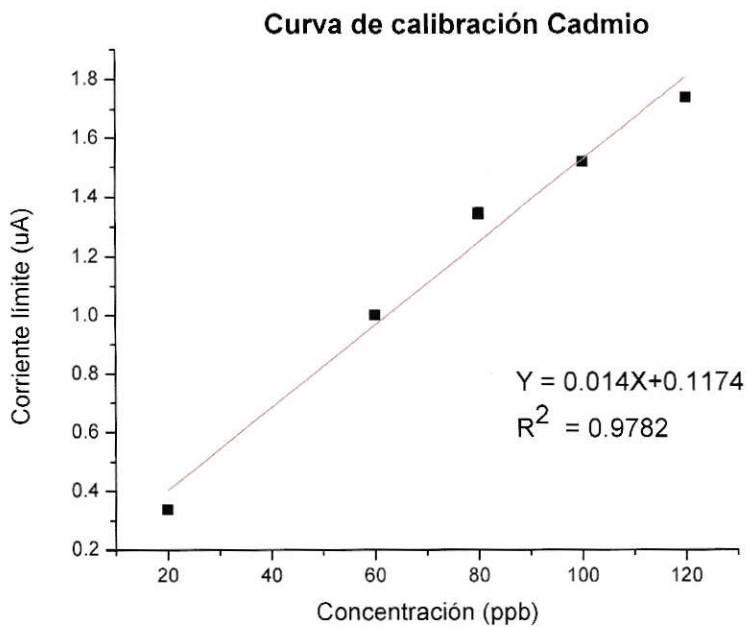


Figura A7. Curva de calibración de Cadmio para VRA.

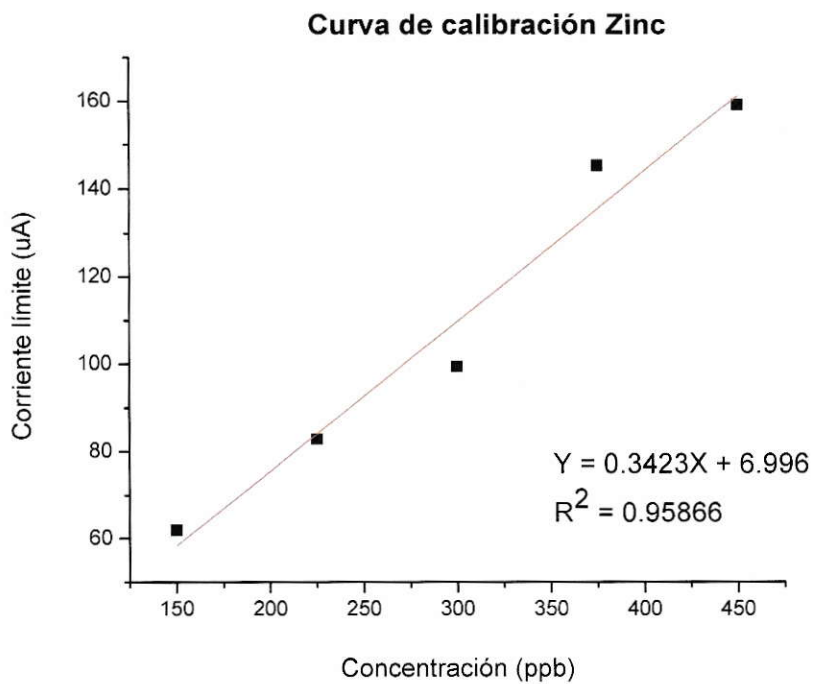


Figura A8. Curva de calibración de Zinc para VRA.

Los valores para de desviación estándar y pendiente calculados para cada metal se detallan a continuación:

Tabla A6. Valores de desviación estándar y pendiente para plomo, cadmio y zinc.

Parámetro	Metales		
	Plomo	Cadmio	Zinc
σ	0,0566	0,117	6.996
S	0,0259	0,014	0.342

Finalmente, utilizando las ecuaciones i y ii, se calculan los límites de detección y cuantificación para la celda de trabajo (20 mL). Además, si se considera que para el análisis se agregará 3 mL de muestra, es necesario recalcular utilizando la expresión iii. La Tabla A7 señala los valores obtenidos:

Tabla A7. Límites de detección y cuantificación para la celda de trabajo y muestras.

	Límites (μgL^{-1})	Metales		
		Plomo	Cadmio	Zinc
Celda	LD	6,5	25	61
	LC	22	84	204
Muestra	LD	43	167	408
	LC	147	560	1362

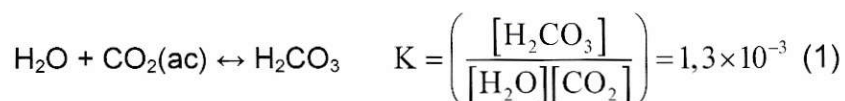
ANEXO 6: Cálculo de especies carbonatadas según pH

Solubilidad del carbonato de calcio

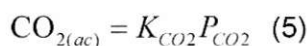
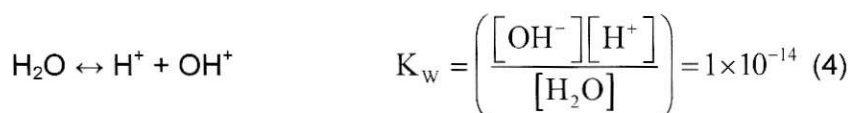
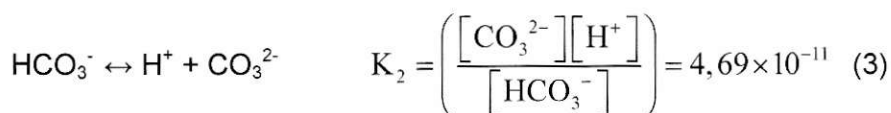
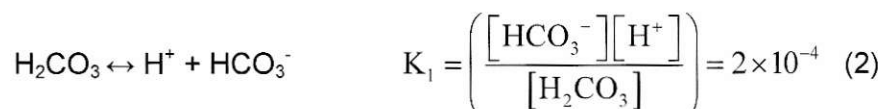
El ión Calcio forma complejos solubles débiles con los carbonatos, como es el CaCO_3^0 y el CaHCO_3^+ , y con los hidróxidos como el CaOH^+ , así como el $\text{CaCO}_3(\text{s})$ es poco soluble. El carbonato de calcio puro existe en dos formas cristalinas distintas; estas son la calcita sólida trigonal y la aragonita. Cuando el $\text{CaCO}_3(\text{s})$ precipita de soluciones que contienen altas concentraciones de magnesio, por ejemplo, agua de mar con una relación de $[\text{Ca}^{2+}]/[\text{Mg}^{2+}]$ de 0.9, se forma un sólido más soluble, llamado carbonato de calcio y magnesio.

Snoeyink & Jenkins (1995) plantean tres casos para el estudio de los equilibrios con $\text{CaCO}_3(\text{s})$, según el sistema en que se encuentre: i) disuelto en agua pura y cerrado a la atmósfera; ii) en disolución o precipitación en agua y abierto a la atmósfera y; iii) en equilibrio con agua, abierta a la atmósfera y a la cual se le han adicionado cantidades de ácido y base fuerte. A continuación se describe detalladamente el segundo caso.

Para evaluar la presencia de HCO_3^- en el agua se evalúan las posibles fuentes. Por una parte, puede ser producto de la reacción de agua y dióxido de carbono presente en la atmósfera, como se muestra en la siguiente reacción:



El H_2CO_3 y CO_2 en agua generan los siguientes equilibrios:



Para calcular la concentración de CO_2 en agua se utiliza la expresión (5), utilizando la constante de Henry:

$$\text{CO}_{2(ac)} = K_{\text{CO}_2} P_{\text{CO}_2} = 3,38 \times 10^{-2} \left(\frac{\text{moles}}{\text{L} \times \text{atm}} \right) \times 0,000355(\text{atm}) = 1,210^{-5} \left(\frac{\text{mol}}{\text{L}} \right)$$

Se utiliza la aproximación $\text{H}^+ \approx \text{HCO}_3^-$ y se reordena combinando las expresiones (1) y (2), se obtiene la siguiente expresión en función de k_1 .

$$K_1 = \frac{[\text{H}^+]^2}{[\text{CO}_{2(ac)}} = 4,45 \times 10^{-7}$$

Para representar el comportamiento de las especies carbonatadas en agua, se usan las ecuaciones de equilibrio del ácido carbónico expresadas como la fracción molar en función de H^+ .

$$\alpha_{\text{H}_2\text{CO}_3} = \frac{[\text{H}^+]^2}{[\text{H}^+]^2 + [\text{H}^+]K_1 + K_1K_2} = \frac{[\text{H}_2\text{CO}_3]}{[\text{CO}_2\text{total}]}$$

$$\alpha_{\text{HCO}_3^-} = \frac{[\text{H}^+]K_1}{[\text{H}^+]^2 + [\text{H}^+]K_1 + K_1K_2} = \frac{[\text{HCO}_3^-]}{[\text{CO}_2\text{total}]}$$

$$\alpha_{\text{CO}_3^{2-}} = \frac{K_1K_2}{[\text{H}^+]^2 + [\text{H}^+]K_1 + K_1K_2} = \frac{[\text{CO}_3^{2-}]}{[\text{CO}_2\text{total}]}$$

ANEXO 7: Calidad de agua según normas que aplican

Tabla A8. Comparación de resultados con los límites máximos permitidos según la NCh409/1.Of2005 de Calidad de Agua Potable.

Substancia	Expresado como	NCh 409/1	Muestra I-A	Muestra I-B	Muestra I-E	Muestra II-A	Muestra II-C	Muestra III-B	Muestra III-D
		Límite Máximo [mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]
Cobre	Cu	2,0	0,03	< LD	< LD	0,001	< LD	< LD	< LD
Cromo total	Cr	0,05	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Fluoruro	F ⁻	1,5	-	-	-	0,081	0,1	-	-
Hierro	Fe	0,3	0,046	0,007	0,007	0,066	0,009	0,0315	0,0032
Manganeso	Mn	0,1	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	0,012	0,0023
Magnesio	Mg	125,0	-	-	-	18,3	1,81	-	-
Selenio	Se	0,01	0,025	0,015	0,051	0,063	0,045	<LD	0,029
Zinc	Zn	3,0	0,221	0,027	0,038	0,044	0,033	0,007	0,01
Arsénico	As	0,01	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Cadmio	Cd	0,01	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	0,0018	0,002
Nitrato	NO ₃ ⁻	50	-	-	-	53,70	3,31	-	-
Plomo	Pb	0,05	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Cloruros	Cl ⁻	400	-	-	-	30,64	8,89	-	-
Sulfatos	SO ₄ ²⁻	500	-	-	-	23,96	8,26	-	-
pH		6,0-8,5	7.33	7.79	6.69	7.72	8.34	7.21	7.26

Tabla A9. Resultados para muestras de agua según NCh1.333.Of1978 de Calidad de Agua para distintos usos.

Indicador	Unidad	Expresado como	NCh 1.333	Muestra I-C	Muestra I-D	Muestra II-B	Muestra III-A	Muestra III-C	Muestra III-E
			Límite Máximo [mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]
pH	Unidad	pH	5,5 – 9,0	7.55	7.58	7.97	7.45	8.1	7.26
Aluminio	mg/L	Al	5	0,02	0,01	0,27	0.02	0.40	0.39
Arsénico	mg/L	As	0,1	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Bario	mg/L	Ba	4	0,04	0,04	0,04	0.02	0.03	0.03
Berilio	mg/L	Be	0,1	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Boro	mg/L	Bo	0,75	<LD	<LD	<LD	<LD	0.02	0.04
Cadmio	mg/L	Cd	0,01	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	0.007
Cloruros	mg/L	Cl ⁻	200	-	-	7,36	-	-	-
Cobalto	mg/L	Co	0,05	<LD	<LD	<LD	0.04	<LD	<LD
Cobre	mg/L	Cu	0,2	< LD	< LD	0,005757	0.003	<LD	<LD
Cromo	mg/L	Cr	0,1	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Fierro	mg/L	Fe	5	0,056	0,021	0,492	0.42	0.68	0.58
Fluoruros	mg/L	F ⁻	1	-	-	0,067	-	-	-

Continuación Tabla A9.

Indicador	Unidad	Expresado como	NCh 1.333	Muestra I-C	Muestra I-D	Muestra II-B	Muestra III-A	Muestra III-C	Muestra III-E
			Límite Máximo [mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]
Manganeso	mg/L	Mn	0,2	0,275	0,255	0,235	2,23	0,40	0,20
Plomo	mg/L	Pb	5	<LD	<LD	<LD	0,013	<LD	<LD
Selenio	mg/L	Se	0,02	0,11	0,05	0,017	0,02	0,02	<LD
Sodio	%	Na	35,00 [%]	-	-	8,97	-	-	-
Sulfatos	mg/L	SO ₄ ²⁻	250	-	-	12,99	-	-	-
Vanadio	mg/L	Vn	0,1	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Zinc	mg/L	Zn	2	0,059	0,031	0,047	0,28	0,02	0,01

* En gris, valores sobre la norma.

ANEXO 8: Descripción de series de suelo

En orden de importancia por calidad, las siguientes series se encuentran en la comuna:

- Las Doscientas.
- Los Puercos.
- Cunculen.
- Quepo.
- Cabrería.
- Rauquén.
- Tutucura.
- San Javier.

En los sectores de lomajes y cerros se encuentran 2 asociaciones de suelo:

- Asociación Pocillas: ocupa la mayor proporción del territorio comunal.
- Asociación Treguaco: es la segunda con mayor superficie.

Descripción y localización (Infracon, 2006).

a.- Las Doscientas

Ocupa la mayor parte de los suelos planos con menor asentamiento en el valle, en la cuenca de Los Puercos, desde Litu hasta el límite con el Río Claro.

Corresponde a un Inceptisol. El material generado del perfil es arenisca compacta, con inclusiones de hierro y manganeso. Se encuentra sobre un substrato de terrazas remanentes. El horizonte A superficial es pardo oscuro. De textura franco arenoso fina. El horizonte B es también pardo oscuro. Son suelos planos y semi planos.

La Capacidad de Uso es III y IV, siendo frecuente la fase de drenaje restringido IVw, este drenaje imperfecto se produce por compactación de la arenisca.

Es un suelo de fácil trabajo y mediana calidad por profundidad, fertilidad y actitud para cultivos, praderas, como asimismo, vides. Hoy cuenta con regadío en su totalidad.

Tabla A10. Características del Suelo. Serie Las Doscientas.

Profundidad	0-19 cm	19-47 cm	47-98 cm
Materia Orgánica	1,6	0,5	0,2
pH	5,9	6,2	6,2
Capacidad de intercambio me/100	6,9	8,5	12,0

b.- Los Puercos

Igual que el anterior, este suelo ocupa los sectores planos del valle, desde Litu hasta las cercanías de Pencahue. Suelo aluvial estratificado profundo. Textura franco arenosa fina. Plano a ligeramente ondulado. Su Capacidad de Uso III, II y I.

Suelo de gran calidad, el mejor de la comuna, apto para toda clase de cultivos y plantaciones.

Tabla A11. Características del Suelo. Serie Los Puercos.

Profundidad	0-26 cm	26-57 cm	57-76 cm	76-96 cm
Materia Orgánica	2,8	1,0	0,5	
pH	5,3	6,0	6,2	6,3
Capacidad de intercambio me/100	14,4	14,2	12,0	12,0

c.- Cunculén

Suelo que ocupa los sectores más bajos del valle intercalado con los 2 anteriores en la parte central del valle al Norte y Sur de Pencahue.

Textura franco arenosa a franco arcilloso. Derivado de arenisca compactada, en formaciones de terrazas remanentes. El horizonte C es la arenisca compactada con nódulos de fierro y manganeso.

Profundidad de 25 a 95 cm. En general es plana y semiplana, de 1 – 5% de pendiente. Su Capacidad de Uso es III y IV. Hoy se encuentra totalmente habilitado con regadío.

Es un suelo regular a bueno, con condiciones para cultivos, vides y frutales.

Tabla A12. Características del Suelo. Serie Cunculén.

Profundidad	0-20 cm	20-54 cm	54 y más
Materia Orgánica	1,0	0,5	
pH	5,8	6,6	
Capacidad de intercambio me/100	6,4	23,4	14,8

d.- Cabrería

Se localiza en un pequeño sector al Sur de Botalcura.

Es un Inceptisol de origen coluvial estratificado moderadamente profundo. Se sitúa en topografía de piedmont. El horizonte A presenta un color pardo oscuro. El substrato presenta gravas y piedras en el perfil.

La Clase de Capacidad de Uso es III y IV. Su textura es franca. Es un buen suelo, apto para todos los cultivos.

Tabla A13. Características del Suelo. Serie La Cabrería.

Profundidad	0-17 cm	17-52 cm	52-80 cm
Materia Orgánica	2,4	1,2	0,7
pH	6,3	6,3	6,2
Capacidad de intercambio me/100	19,8	18	18

e.- Quepo

Se presenta en pequeños sectores al Sur de Pencahue. La serie Quepo es un miembro de la Familia fina, montmorillonítica, térmica de los Xeric Apiaquerts (Vertisol). Son suelos de color pardo oscuro, en el matiz 7.5YR; de textura franco arcillosa en superficie y de color gris muy oscuro a gris oscuro en el matiz 10, de textura franco arcillosa a arcillosa en profundidad. Presenta grietas de más de 1 cm. de grosor, que se extienden desde la superficie hasta 50 y más cm. de profundidad y que permanecen abiertas por más de noventa días consecutivos en los meses de verano.

La Serie Quepo es un suelo plano a suavemente ondulado (0,5 – 2% de pendiente) con microrelieve de gilgay; en posición de terraza remanente intermedia; ocupando dentro de ella los sectores deprimidos que llegan a constituir pequeñas cuencas. El régimen de humedad del suelo es xérico; la precipitación media anual es de 605 mm y la temperatura media anual es de 14,9° C.

Suelo muy arcilloso apto solo para pastos y hortalizas, en algunos casos siembra de cereales.

Tabla A14. Características del Suelo. Serie Quepo.

Profundidad	0-9 cm	9-53 cm	53-80 cm
Materia Orgánica	3,4	0,7	0,7
pH	6,2	7,0	8,0
Capacidad de intercambio me/100	21,9	27,8	28,5

f.- Tutucura

Se encuentra intercalado con los anteriores en toda la parte plana del valle.

La Serie Tutucura es un miembro de la Familia franca fina, mixta, térmica de los Aquic Xerochrepts (Inceptisol). Son suelos profundos; de textura superficial franca a franco arcilloso limosa y de color pardo a pardo oscuro

en el matiz 10YR; de textura franca a franco arcillo arenosa y color pardo grisáceo oscuro a gris oscuro en el matiz 10YR, en profundidad. De drenaje imperfecto, presenta nivel freático a 120 cm. de profundidad.

Es un suelo plano, con ligero microrelieve, en posición de terraza aluvial.

Capacidad de Uso III y IVw, ocasionalmente pasa a la fase profunda.

Hoy en día se presenta totalmente habilitada con regadío. Tiene buena aptitud para cultivos y para frutales en la fase de Clase I y Clase III con drenaje.

Tabla A15. Características del Suelo. Serie Tutucura.

Profundidad	0-19 cm	19-63 cm	63-95 cm	95-110 cm
Materia Orgánica	2,4	1,4	1,0	0,9
pH	6,2	6,9	7,1	7,4
Capacidad de intercambio me/100	19,2	15,8	15,7	13,0

g.- Rauquén

Se localiza en una extensa franja en la ribera Norte del Río Claro, en toda la longitud en que el Río constituye el límite sur de la comuna.

La Serie Rauquén es un miembro de la Familia franca gruesa mixta, térmica de los Tepic Xerochrepts (Inceptisol). Son suelos planos, profundos; de textura superficial franca y de color pardo amarillento oscuro en el matiz

10YR, de color pardo amarillento oscuro en el matiz 10YR y de textura franco arenosa a arena francosa en profundidad. Presentan buena porosidad y arraigamiento en todo el perfil.

La profundidad efectiva del suelo varía entre 30 y más de 120 cm., sobre un substrato aluvial constituido por gravas, piedras y bolones de hasta 25 cm. de diámetro, de origen mixto que ocupan entre el 65 y 95% del volumen, con matriz arenosa a arena gruesa.

Esta serie es un suelo plano, con ligero microrelieve, en posición de terraza aluvial. Capacidad de uso III, II y I. Es un suelo de terraza del Río Claro, de buena calidad, apto para todos los cultivos y plantaciones de la zona.

Tabla A16. Características del Suelo. Serie Rauquén.

Profundidad	0-20 cm	20-59 cm	59-87 cm	87-120 cm
Materia Orgánica	3,2	1,0	0,5	0,2
pH	5,6	6,2	6,6	6,7
Capacidad de intercambio me/100	17,4	16,4	16,3	11,8

h.- San Javier

Se localiza en la ribera Norte del Río Maule, en suelos aterrizados en Curtiduría y Tanguao. Suelo sedimentario de origen aluvial, en posición de terraza aluvial reciente. De textura areno francosa, de color pardo grisáceo muy oscuro en superficie y de textura arenosa de color gris muy oscuro en profundidad.

Suelo ligeramente profundo, de topografía plana, de drenaje excesivo, permeabilidad rápida y escurrimiento superficial lento. Capacidad de Uso III y IV. Profundidad variable. Aptitud frutal solo en los mejores sectores.

Tabla A17. Características del Suelo. Serie San Javier

Profundidad	0-20 cm	20-46 cm	16-110 cm
Materia Orgánica	1,7	0,8	0,2
pH	6,0	6,5	6,5
Capacidad de intercambio me/100	15,8	12,5	6,7
Saturación de Sodio %	1,7	2,5	3,7

i.- Asociación Treguaco

Ocurre en 2 amplios sectores de la vertiente oriental de la Cordillera de La Costa en la comuna. El pedón representativo de uno de los componentes de la Asociación Treguaco es un miembro de la Familia franca fina, mixta, térmica de los Dystric Xerochrepts (Inceptisol). Suelo profundo, bien evolucionado y formado a partir de rocas metamórficas especialmente micasitas y gneis muy meteorizado; de textura franco arcillo limosa en todo el perfil y de colores pardo en matices 10YR y 7.5YR en la superficie y pardo oscuro en el matiz 7.5YR en profundidad. Descansa sobre un substrato constituido por rocas metamórficas muy meteorizadas con alto contenido en mica y cuarzo. Ocupa dentro de la Cordillera de La Costa preferentemente los sectores altos y la vertiente oriental en contacto con la formación granítica. Son suelos bien estructurados, friables, de buena porosidad que permiten un buen desarrollo de las raíces. La topografía varía de moderadamente ondulada a muy escarpada con pendientes complejas variables entre 5 y más de 45% en las caídas a quebradas. Capacidad de Uso predominantemente VII.

Tabla A18. Características del Suelo. Asociación Treguaco.

Profundidad	0-28 cm	28-60 cm	60-150 cm
pH	5,8	5,1	5,0
Capacidad de intercambio me/100	11,9	13,39	9,38

j.- Asociación Pocillas

Se encuentra en todo el límite exterior de la comuna y hasta encontrarse con la planicie del Valle de Los Puercos, cubriendo todos los cerros al oriente y los del poniente, compartiendo éstos últimos con la Asociación Treguaco.

La asociación alberga en el sector Nor- Oriente , uno de los restos de vegetación nativa de bosque y matorral arborescente que aún permanece en la comuna. Asimismo, contiene la mayor superficie forestada y una parte del área de pastos.

Suelo desarrollado "in situ" a partir de rocas metamórficas, profundo, de textura franco arcillosa, de color pardo rojizo oscuro en el matiz 5YR en la superficie y textura arcillo limosa de color rojo amarillento en el matiz 5YR en profundidad. Descansa sobre un substrato de rocas muy meteorizadas con matriz arcillosa que permite el desarrollo de las raíces en profundidad. Presenta grava angular tanto meteorizada como fresca bajo los 50 cm. de escasa a común. Ocupa una posición de lomajes y cerros en la vertiente oriental de la Cordillera de La Costa.

Suelo bien estructurado, de texturas que permiten un buen almacenamiento de agua, de permeabilidad moderada y buen desarrollo de raíces en todo el perfil.

Capacidad de Uso principalmente VI, pero con VII en los cerros más abruptos y IV en los pequeños sectores de menor pendiente. Estos suelos no cuentan con regadío. Suelo de secano de lomajes y cerros, cubierto en parte por pastos matorrales. Buen suelo para forestación. Presenta poca erosión.

Tabla A19. Características del Suelo. Asociación Pocillas.

Profundidad	0-26 cm	26-54 cm	54-115 cm
pH	6,0	6,1	6,5
Capacidad de intercambio me/100	19,4	20,3	19,9

ANEXO 9: Resultados para agua según sectores de la cuenca del estero Los Puercos.

ANEXO 9: Resultados para agua según sectores de la cuenca del estero Los Puercos.

Tabla A20. Resultados de las muestras de agua para cada sector de la cuenca.

	Sector Las Palmas				Sector Botacura		Sector Pencahue						
	I-A (P)	I-B (P)*	III-A (S)	III-B (P)*	I-C (S)*	III-C (S)*	I-D (S)*	I-E (P)**	II-A (P)**	II-B (S)*	II-C (P)	III-D (P)**	III-E (S)*
Metales	Concentración (ug/L)												
Cd	< LD	< LD	< LD	1,803	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	2,033	0,7233
Zn	221,00	27,04	286,4	7,312	58,96	20,23	30,52	38,18	44,02	46,69	32,96	17,42	15,77
Cr	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
As	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Cu	34,13	< LD	3,791	< LD	< LD	2,12	< LD	< LD	1,51	5,757	< LD	< LD	< LD
Ni	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	5,71	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Pb	< LD	< LD	13,6	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Al	23,04	9,73	20,58	33,34	20,54	406,3	10,25	15,45	19,74	541,2	7,869	9,571	392,9
Se	25,29	15,43	20,03	< LD	112,80	23,01	47,27	51,12	62,88	17,45	44,7	29,13	< LD
Mn	22,93	< LD	2236	12,14	550,00	231,8	255,40	5,59	< LD	234,9	< LD	2,347	201,8
Ag	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
V	< LD	8,08	< LD	8,536	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	21,59	< LD	< LD
Ba	10,34	7,26	27,84	6,933	41,62	31,17	40,60	86,66	89,79	44,94	< LD	85,03	30,14
Co	< LD	< LD	41,05	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Mo	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Be	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
B	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	27,87	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	41,46
Fe	46,34	6,99	424,3	31,47	55,69	684,2	20,93	7,00	65,87	984,2	9,189	3,212	588,8

ANEXO 10. Contenido de metales pesados en suelos superficiales y profundos en la cuenca del estero Los Puercos.

Tabla A21. Resultados de las muestras de suelos superficiales y profundos para cada sector de la cuenca.

METALES	Sector Tapihue		Sector Botalcura		Sector Pencahue	
	Concentración (mgKg ⁻¹)					
	Relave (S-01)	Profundo (S-02)	Superficial (S-03)	Profundo (S-04)	Superficial (S-05)	Profundo (S-06)
Cd	51,5	2,61	3,22	2,55	3,27	2,9
Zn	11541,03	65,07	187,97	67,01	71,76	74,02
Cr	12,73	5,89	22,05	6,41	26,06	28,01
As	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Cu	1037,36	41,92	54,13	45,24	42,08	33,4
Ni	< LD	< LD	3,1	< LD	8,57	11,58
Pb	4465,48	24,33	80,26	35,59	14,03	15,92
Al	11899,6	11147,65	11129,08	13916,5	17810,03	22661,69
Se	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Mn	911,44	773,59	857,33	736,58	613,79	614,01
Ag	1,34	-	-	-	-	-
V	102,32	199,85	220,48	179,92	185,85	173,05
Ba	165,19	66,89	130,7	114,65	69,69	75,59
Co	15,27	17,13	24,34	16,47	19,92	23,51
Mo	2,29	< LD	< LD	< LD	0,97	0,8
Be	4,28	10,46	13,36	9,46	13,16	14,11
B	106,74	95,2	115,82	81,53	82,78	71,13
Fe	41452,64	40529,43	46255,26	34509,61	37846,31	35978,44

ANEXO 11: Resumen de normativas chilenas relacionadas con la minería.

Las normativas que atañen a la minería y a otras industrias se describen a continuación:

- Ley de Bases Generales del Medio Ambiente, N°19.300, MINSEGPRES, 1994
Modificada por la Ley 20.417 de 2010, establece el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA). El inciso i) del artículo 10 dispone que los proyectos de desarrollo minero deberán someterse al sistema de evaluación de impacto ambiental. Por otro lado, el literal h) señala que el EIA debe contener un plan de medidas de mitigación, reparación y/o compensación que describirá las medidas que se adoptarán para eliminar o minimizar los efectos adversos del proyecto o actividad y las acciones de reparación y/o compensación que se realizarán cuando ello sea procedente (González, 1999).
- Disposiciones sobre protección agrícola (DFL N° 3557, Min. de Agricultura, 1980)
Establece que los establecimientos que manipulen productos susceptibles de contaminar la agricultura deben adoptar medidas a fin de evitar dicha contaminación (art. N° 11).
- Código Sanitario (DFL N° 725, MINSAL, 1967)
Prohíbe descarga de residuos industriales y mineros sin tratamiento a fuentes que proporcionan agua potable o de riego alguna población (art. N° 73).
- Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves (D.S. N° 248, Min. Minería, 2007)
Vela porque cada depósito de relave construido en Chile tenga una calidad estructural y cierre adecuados, para garantizar la seguridad ambiental y de la población que se emplaza en la zonas aledañas a ellos. Se incluyen atribuciones del SERNAGEOMIN, como fiscalización y capacidad de dictar sanciones según lo dispuesto en el Reglamento de Seguridad Minera.
- Reglamento Sanitario Sobre Manejo de Residuos Peligrosos (D.S. N° 148, MINSAL, 2005)
Establece disposiciones respecto de las condiciones sanitarias y de seguridad mínimas a que deberá someterse los residuos peligrosos (“residuo o mezcla de residuos que presenta riesgo para la salud pública y/o efectos adversos al medio ambiente, ya sea directamente o debido a su manejo actual o previsto”).
- Reglamento de Seguridad Minera (D.S. N° 132, Min. Minería, 2002)
Establece el marco regulatorio general al que deben someterse las faenas de la industria minera. Incluye proteger la integridad física de las personas que se desempeñan en la industria y de las instalaciones e infraestructura que hacen posibles las operaciones.

- Reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo (D.S. N° 594, MINSAL, 2000)
Reglamenta las condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo y establece los límites permisibles de exposición ambiental a agentes químicos y físicos. Además, dispone que en ningún caso podrán incorporarse los relaves mineros o aguas contaminadas con productos tóxicos o peligrosos de cualquier naturaleza, sin ser previamente sometidos a los tratamientos de neutralización o depuración, a las napas de agua, canales, ríos, esteros, quebradas, lagos, lagunas, embalses o en masas o en cursos de agua en general.

- Norma de Emisión Para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales (D.S. N° 90, MINSEGPRES, 2000)
Establece el control de contaminantes asociados a los residuos líquidos que se descargan a cuerpos de agua receptores. Contiene 5 normas de emisión, estableciendo límites máximos diferenciados para la descarga de residuos líquidos según sea el cuerpo receptor.

- Norma de Emisión que Regula las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas (D.S. N° 46, MINSEGPRES, 2002)
Controla la disposición de los residuos líquidos que se infiltran a través del subsuelo a los acuíferos.