

UCh-FC
A. Ambiental
H 615
C.1



FACULTAD DE CIENCIAS

UNIVERSIDAD DE CHILE

“EVALUACIÓN DE RIESGOS, EN SUS ETAPAS PRELIMINAR Y CONFIRMATORIA, EN ASENTAMIENTOS HUMANOS PRÓXIMOS A SITIOS DE MINERÍA METÁLICA EN LA COMUNA DE TIERRA AMARILLA”

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

Químico Ambiental

Johan Gunther Heyer Alvarez

Directora de Seminario de Título y Profesora Patrocinante:
Dra. Isel Cortes Nodarse

Junio de 2013
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:

JOHAN GUNTHER HEYER ALVAREZ

“EVALUACIÓN DE RIESGOS, EN SUS ETAPAS PRELIMINAR Y CONFIRMATORIA, EN ASENTAMIENTOS HUMANOS PRÓXIMOS A SITIOS DE MINERÍA METÁLICA EN LA COMUNA DE TIERRA AMARILLA”

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 Cortes.
Directora Seminario de Título

Dra. Isel Cortes.
Profesora Patrocinante

M. Cs. Sylvia Copaja.
Correctora

M. Cs. Ximena Molina.
Correctora



Santiago de Chile, Junio 2013



Agradecimientos

En primer lugar quisiera agradecer al personal del MMA con quien se trabajo en este proyecto, sobre todo al personal perteneciente a la SEREMI del MMA de la región de Atacama.

Quisiera agradecer también a CENMA por acogerme como tesista para realizar este trabajo, así como también a la profesora Isél Cortés por poner su confianza en mí y darme trabajo en CENMA quedando entre otras labores, siendo uno de los personajes a cargo de la realización este proyecto y sin el cual no hubiera logrado ponerme al día con las deudas contraídas con la universidad, y por lo tanto demorado aun más el inicio de mi proceso de titulación.

Agradecer también al Dr. Julio Salinas, por su apoyo desinteresado en las dudas y problemas que surgieron en la realización de este seminario de título.

Sin embargo, la realización de este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo de mi familia, y en general de mi Madre, quien me dio su apoyo incondicional. A mi pareja Nicole por su apoyo e inyecciones constantes de energía, sin las cuales probablemente no hubiera terminado esta labor.

Agradezco especialmente a Nicole, Sergio y Víctor, quienes se convirtieron en mis amigos cuando recién emprendía esta carrera, agradezco toda su ayuda, la cual probablemente no imaginan cuan determinante fue.

Agradezco a algunos profesores que de verdad forman parte de una universidad pública.

Agradezco también, no por ser un apoyo en la realización de este trabajo, pero si por formar de la parte más importante del camino recorrido a lo largo de esta carrera, a quienes hicieron que de verdad sintiera la universidad como tal, amigos con los que se generaron espacios de discusión, de creación de conocimiento, con quienes se logro dar un sentido a lo que significo cursar esta carrera.

En este contexto quisiera agradecer a los amigos, amigas, compañeras y compañeros que compartimos en las hoy desmanteladas gradas de Calama, en donde se compartió, se discutió, y de donde nacieron variadas ideas y acciones. Agradecer también a los compañeros de movilizaciones, marchas y tomas, unos más amigos que otros, pero con los quienes de todas formas fue posible hacer universidad, teniendo pocas victorias claras, pero lleno de victorias emocionales en las acciones llevadas a cabo en contra del desarme de la valiosa institución que debiera ser la universidad.

INDICE

I	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Motivación del proyecto	1
1.2	Residuos Mineros	3
1.2.1	Relaves	6
1.2.2	Escorias.....	7
1.3	De la contaminación de suelos a la Evaluación de Riesgos.....	8
1.4	Evaluación de Riesgos.....	11
1.5	Caso de Estudio	18
1.6	Contaminantes de mayor preocupación y sus efectos tóxicos	23
1.6.1	Arsénico.....	23
1.6.2	Mercurio	23
1.6.3	Plomo.....	24
1.7	Metodología de evaluación de Riesgos.....	25
1.7.1	Priorización e investigación preliminar	25
1.7.2	Investigación Confirmatoria	27
1.7.3	Cuantificación del riesgo.	40
1.8	De la toma de muestras.....	50
1.9	Métodos analíticos.....	50
1.9.1	Plasma acoplado inductivamente - óptico.....	51

1.9.2	Espectroscopia de Absorción atómica	51
1.9.3	Fluorescencia de rayos X (FRX)	53
1.9.4	Determinación de pH, conductividad eléctrica y temperatura.	53
1.10	Objetivos	54
1.10.1	Objetivo General	54
1.10.2	Objetivos Específicos	55
II	RESULTADOS.....	56
2.1	Investigación preliminar.....	56
2.1.1	Antecedentes de la comuna de Tierra Amarilla	56
2.1.2	Identificación de elementos potenciales del riesgo.....	62
2.1.3	Investigación preliminar de cada sitio en estudio	64
2.1.4	Resultados Analíticos	77
2.2	Priorización	78
2.3	Investigación Confirmatoria	79
2.3.1	Muestreo del sitio Totoralillo	79
2.3.2	Muestreo suelos sin intervención (Valor Base)	81
2.3.3	Resultados de análisis químicos investigación confirmatoria.....	85
2.3.4	Procesamiento de datos y Obtención de UCL 95%	87
2.4	Caracterización del riesgo	91
2.4.1	Efectos no cancerígenos	91
2.4.2	Efectos Cancerígenos.....	92
III	DISCUSIÓN.....	93

3.1	Investigación Preliminar y priorización.....	93
3.2	Investigación confirmatoria	95
3.3	Caracterización del Riesgo.....	98
IV	CONCLUSIONES.....	101
V	REFERENCIAS.....	104
VI	ANEXOS.....	107



INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Principales residuos mineros asociados a las diferentes etapas del proceso productivo.	4
Figura 2. Elementos básicos del riesgo. (Rhim, Anaconda 2004)	12
Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología de evaluación de riesgos.	14
Figura 4. Relación de los distintos factores que influyen en la evaluación de riesgos; información, incertidumbre, costos y beneficios. (Fuente: curso evaluación de riesgos A. Rhim, agosto 2011)	17
Figura 5. Comunas Región de Atacama. (SII, Sistema de Información Laboral 2012) ..	19
Figura 6. Distribución de residuos mineros a orillas del río Copiapó (en azul) y los principales centros urbanos de la comuna de Tierra Amarilla. El área amarilla corresponde a la ciudad de Copiapó.....	21
Figura 7. Esquema de distribución de muestreo sistemática al tres bolillo o alternada. Los puntos negros corresponden a puntos de muestreo. (IHOBE 2002)	28
Figura 8. Curva dosis vs respuesta. (Page 2008)	47
Figura 9. Toma de muestras en Escorial Nantoco. Se observa la presencia de materiales sólidos de diferentes características como también la cercanía a la villa Nantoco. En el sector sur del Escorial, se encuentran predios agrícolas.	67
Figura 10. Modelo conceptual donde se describen las principales rutas de distribución de posibles contaminantes presentes en Escorial Nantoco. Población expuesta: residentes adultos y niños.	68

Figura 11. Arriba: vista de una fracción de relave Totoralillo. Abajo: canal de regadío y vivienda aledaña al relave	72
Figura 12. Modelo conceptual donde se describen las principales rutas de distribución de posibles contaminantes presentes en relave Totoralillo. Población expuesta: Residentes adultos y niños. Trabajadores fuera del sitio.....	73
Figura 13. Relave sitio Amolanas. Prácticamente todo el relave se encuentra al nivel del suelo, sin embargo su profundidad no se encuentra determinada.....	75
Figura 14. Modelo conceptual donde se describen las principales rutas de distribución de posibles contaminantes presentes en relave Amolanas. Población expuesta: principalmente trabajadores fuera del sitio	76
Figura 15. Muestreo sitio Totoralillo. Las marcas en amarillo corresponden a muestras del relave, las marcas en café a muestras de suelo y sedimento del canal de regadío, por último, las marcas en azul corresponden a muestras de agua del canal de regadío.	80
Figura 16. Referencia clasificación de suelos para puntos de muestreo Valor Base. (B) Imagen satelital GoogleEarth. (A) Carta geológica SERNAGEOMIN.....	83
Figura 17. Distribución de los puntos de muestreo obtenidos para Valores Base.	84
Figura 18. Resultados análisis de datos para Mercurio.....	88
Figura 19. Resultados análisis de datos para arsénico.	89
Figura 20. Resultados análisis de datos para plomo.	90

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Criterios establecidos para calidad de suelos en Canadá.....	31
Tabla 2. Criterios establecidos para calidad de suelos en Australia.	32
Tabla 3. Criterios establecidos para remediar suelos en México.....	34
Tabla 4. Valores orientadores para suelos en el estado de Sao Pablo, Brasil.....	35
Tabla 5. Valores límites para considerar un suelo alterado según usos del suelo en la Comunidad Autónoma del País Vasco.....	37
Tabla 6. Valores base en la zona de Copiapó y Tierra Amarilla.....	38
Tabla 7. Cuadro comparativo de valores de referencia.....	40
Tabla 8. Parámetros utilizados en el cálculo de la dosis por ingestión accidental de suelo.	43
Tabla 9 Parámetros utilizados en el cálculo de la dosis por ingestión accidental de suelo.	45
Tabla 10 Valores toxicológicos de referencia para el arsénico.....	46
Tabla 11. Antecedentes demográficos y económicos de la comuna de Tierra Amarilla.	56
Tabla 12. Información correspondiente al sitio Escorial Nantoco.....	65
Tabla 13. Información correspondiente al sitio Totalillo.	69
Tabla 14. Información correspondiente al sitio Amolanas.....	74
Tabla 15. Concentración de metales de metales para muestras sólidas.	77
Tabla 16. Resultados obtenidos en cuantificación de metales para muestras líquidas. ...	77
Tabla 17 . Puntajes obtenidos en fichas para evaluación de sitios de CCME.....	78
Tabla 18. Muestras investigación confirmatoria sitio Totalillo.....	81

Tabla 19. Puntos de muestreo para determinación de valor base.	82
Tabla 20. Resultados de análisis de mercurio, arsénico y plomo para las muestras del sitio Totoralillo.....	85
Tabla 21. Resultados de análisis de mercurio, arsénico y plomo para las muestras del suelos sin intervención (valor base).	86
Tabla 22. Resultados de análisis de mercurio, arsénico y plomo para las muestras de agua.	86
Tabla 23. Resultados análisis UCL 95% para mercurio y valores de referencia.	88
Tabla 24. Resultados análisis UCL 95% para arsénico y valores de referencia.	89
Tabla 25. Resultados análisis UCL 95% para plomo y valores de referencia.	90
Tabla 26. Resultados de dosis para niños y adultos por las vías ingesta y absorción dérmica, efectos no cancerígenos.....	91
Tabla 27. Coeficientes de peligro para efectos no cancerígenos.	91
Tabla 28. Resultados de dosis para niños y adultos por las vías ingesta y absorción dérmica, efectos cancerígenos.....	92
Tabla 29. Resultados de dosis para niños y adultos por las vías ingesta y absorción dérmica, efectos cancerígenos.....	92



RESUMEN

La Comuna de Tierra Amarilla consta con una docena de pasivos mineros en estado de abandono o paralización asociados al cauce del río Copiapó, y de la misma forma asociados a asentamientos humanos.

Debido a la cantidad de residuos mineros y el potencial deterioro de la salud de los pobladores producto de la contaminación con metales y elementos tóxicos es que la comuna de Tierra Amarilla es seleccionada como una de las integrantes del proyecto realizado entre el MMA y CENMA “Evaluación de riesgos para la salud en asentamientos humanos próximos a sitios de minería metálica”. Este trabajo contempla la realización de una evaluación del deterioro de la salud de las poblaciones asociadas a estos residuos mediante una evaluación de riesgos a la salud de un universo inicial de 3 sitios contaminados, dos relaves y un escorial.

La evaluación de riesgos consiste en el estudio de los tres elementos que deben existir para que se presente un riesgo, en este caso a la salud de la población, estos tres elementos son; una fuente contaminante, una vía de transporte de los contaminantes (vía de exposición) y receptores de estos contaminantes.

Para realizar esta tarea de evaluación de riesgos se consideraron distintas metodologías, logrando su adaptación en una aplicable a este caso.

La metodología aplicada posee tres etapas. Una primera etapa corresponde a un estudio histórico del sitio y visitas a este. Luego, a partir de esta información y por medio del uso de fichas de priorización, se seleccionó el sitio que poseía un mayor riesgo potencial para continuar con las siguientes etapas. El sitio Seleccionado fue el Relave Totoralillo,

el cual ha sido utilizado intermitentemente desde tiempos coloniales y se encuentra asociado principalmente la extracción de plata y oro por amalgamación con mercurio.

La segunda etapa corresponde a una etapa de confirmación, en la que se confirman los niveles de contaminación de la fuente, así como también la evaluación del riesgo asociado a estas concentraciones mediante la comparación con valores de referencia (normas internacionales y valores base para la zona). El relave Totoralillo presentó concentraciones muy por encima de los valores de referencia para mercurio, arsénico y plomo.

La etapa final consiste en el cálculo del riesgo, para lo cual se determina la probabilidad de que efectos adversos se presenten en la población mediante la comparación con valores toxicológicos de referencia, esto se hizo solo para el caso del arsénico. A partir del análisis estadístico de los resultados de las muestras colectadas se determinó una concentración nominal para el relave de 2052mg/kg (basado en el cálculo del límite superior de un intervalo de confianza del 95% para el promedio).

Finalmente se demostró que el riesgo para la salud de la población es alto, encontrándose entre los resultados, a modo de ejemplo, un riesgo extra de contraer cáncer asociado a la presencia de arsénico producto del relave de un $3,37 \times 10^{-3}$ para niños, es decir, se espera que cerca de 4 niños contraigan cáncer entre 1000 debido a la ingesta accidental de suelo. (los valores de referencia indican un riesgo aceptable de 1 caso en 10000)

ABSTRACT

The Commune of Tierra Amarilla has a dozen mining liabilities, in abandoned or paralyzed state, associated with Copiapó river bed and human settlements.

Due to the amount of mining waste and the potential health damage of residents because of metals and toxic elements contamination, Tierra Amarilla municipality was selected for the project carried out between the MMA and CENMA "Health Risk Assessment in Human Settlements Close to Metallic Mining Sites". This work aims to develop an assessment of health deterioration of populations associated with these residues by assessing health risks of an initial universe of three contaminated sites, two tailings and one slag.

Risk assessment is the study of the three elements that must be present for risk to exist, in this case to human health, these three elements are, a source of contamination, a pollutants transport means (exposure means) and receptors of these contaminants.

To perform this risk assessment task, different methodologies were considered, achieving an adaptation applicable to this case.

The methodology has three stages. The first stage corresponds to a historical study and visits to the sites. Then, based on this information and by using prioritization worksheets, the higher potential risk site was selected to continue with the following stages. The selected site was Totalillo tailings, which has been used intermittently since colonial times and is mainly associated to silver and gold extraction by amalgamation with mercury.

The second stage corresponds to a confirmation stage, in which source contamination levels are corroborated, as well as assessing the risk associated with these concentrations

I INTRODUCCIÓN.

1.1 Motivación del proyecto

Al recorrer la historia de nuestro País, esta se ha ido escribiendo de la mano del desarrollo minero, si bien, en general, la agricultura antiguamente, y el comercio y la actividad manufacturera hoy en día (INE 2010), han ocupado la mayor parte de la fuerza laboral de nuestro país, es la minería quien ha sido el principal sustento económico. Un buen exponente de esta situación es el caso particular de la provincia de Copiapó, la cual se consolidó como principal centro urbano de la región de Atacama luego del descubrimiento de importantes yacimientos mineros, principalmente de plata durante el siglo XIX, Chañarcillo (1832), uno de los yacimientos más grandes de Latino América y Elisa de bordos (1862) entre otros. Estos yacimientos fueron el principal sustento Nacional en ese entonces.

El descubrimiento de estos yacimientos acarreo consigo un gran desarrollo de la actividad minera en el sector, con la consecuente evolución tecnológica, destacándose los siguientes hitos (BGR y SERNAGEOMIN, 1998):

- Construcción del tercer ferrocarril de Sudamérica (Caldera a Copiapó), y su posterior ampliación.
- Mecanización de la explotación minera mediante extracción con huinches, riles y desagües, instalación de bombas, etc., con el consecuente aumento de la extracción y de los botaderos.

- Construcción de plantas de fundición de hierro y cobre en Nantoco y una de cobre en Tierra Amarilla, en la segunda mitad del siglo XIX.

La construcción de fundiciones y el desarrollo de una minería más industrializada provocó el aumento de la generación de residuos (escoriales y relaves) y su disposición a lo largo del valle y en general a orillas del río Copiapó, puesto que las materias primas requieren agua en su procesamiento, por lo que se trasladaban hasta las plantas instaladas en las cercanías del río.

Por otra parte, la explosión económica atrajo gran cantidad de trabajadores al valle de Copiapó, no ocupándose todos en la explotación de los grandes yacimientos, lo que genera el desarrollo de la pequeña minería, instalándose una serie de pequeñas plantas, generando gran cantidad de depósitos más pequeños.

Estos eventos generaron la actual situación del valle del río Copiapó. Hoy en día es posible contar cerca de 23 sitios con presencia de residuos mineros entre las comunas de Copiapó y Tierra Amarilla según catastros Sernageomin-JICA 2007-2010.

El catastro que se menciona, realizado en el marco la cooperación Chileno-Japonés FOCIGAM (Fortalecimiento de la Capacidad Institucional en la Gestión Ambiental Minera). Este catastro nace como necesidad luego del estudio elaborado por la OCDE y CEPAL “Evaluación del Desempeño Ambiental de Chile”, en donde se establece el tema de los residuos mineros relacionados a sitios abandonados como “desafío general” en los tratados de libre comercio.

A partir de esto nace una serie de otras gestiones para evaluar este tema. Siendo una de estas, iniciativa del MMA, el proyecto “Evaluación de riesgos para la salud en

by comparison with reference values (international standards and background values for the area). The Totoralillo tailings showed concentrations well above the reference values for mercury, arsenic and lead.

The final stage consists in risk calculation, for which the probability that adverse effects occur in a population is determined by comparing toxicological reference values, done only for the case of arsenic. After statistical analysis of the results of samples collected from the tailings a nominal concentration of 2052mg/kg was determined (based on the calculation of the mean with the upper confidence limit of 95%).

Finally it was demonstrated that the risk to populations health is high, obtaining, for example, an Excess Lifetime Cancer Risk associated to the presence of arsenic of 3.37×10^{-3} for children ie, it is expected that about 4 out of 1000 children could get cancer due to accidental ingestion of soil (the reference values indicate an acceptable risk of 1 case in 10,000).

asentamientos humanos próximos a sitios de minería metálica”, el cual se enmarca como uno de los proyectos del convenio de transferencia MMA-CENMA del año 2011.

El proyecto, se llevo a cabo en distintas localidades de la Región de Coquimbo y la Región de Atacama, siendo una de estas localidades la comuna de Tierra Amarilla, la que se ubicada a la altura del paralelo 28° en la provincia de Copiapó. El proyecto contempla la realización de una evaluación de riesgos a la salud de los sitios abandonados con presencia de residuos en las distintas localidades. Para el caso particular de este trabajo de seminario de título se aborda la evaluación de riesgos de sitios con residuos mineros próximos a asentamientos humanos en la Comuna de Tierra Amarilla, principalmente ubicados a lo largo del valle del río Copiapó a orillas de dicho río.

1.2 Residuos Mineros

La actividad minera contempla la extracción de grandes cantidades de suelo y roca en sus procesos, gran parte de este material corresponde a fracciones de roca sin valor comercial. Todos estos materiales sin valor son depositados, dando paso a lo que podríamos llamar residuos mineros. Los residuos mineros provienen de distintos puntos de los procesos productivos, por esto mismo poseen variadas características. En la Figura 1 se ilustran los principales residuos que se desprenden de los distintos procesos.

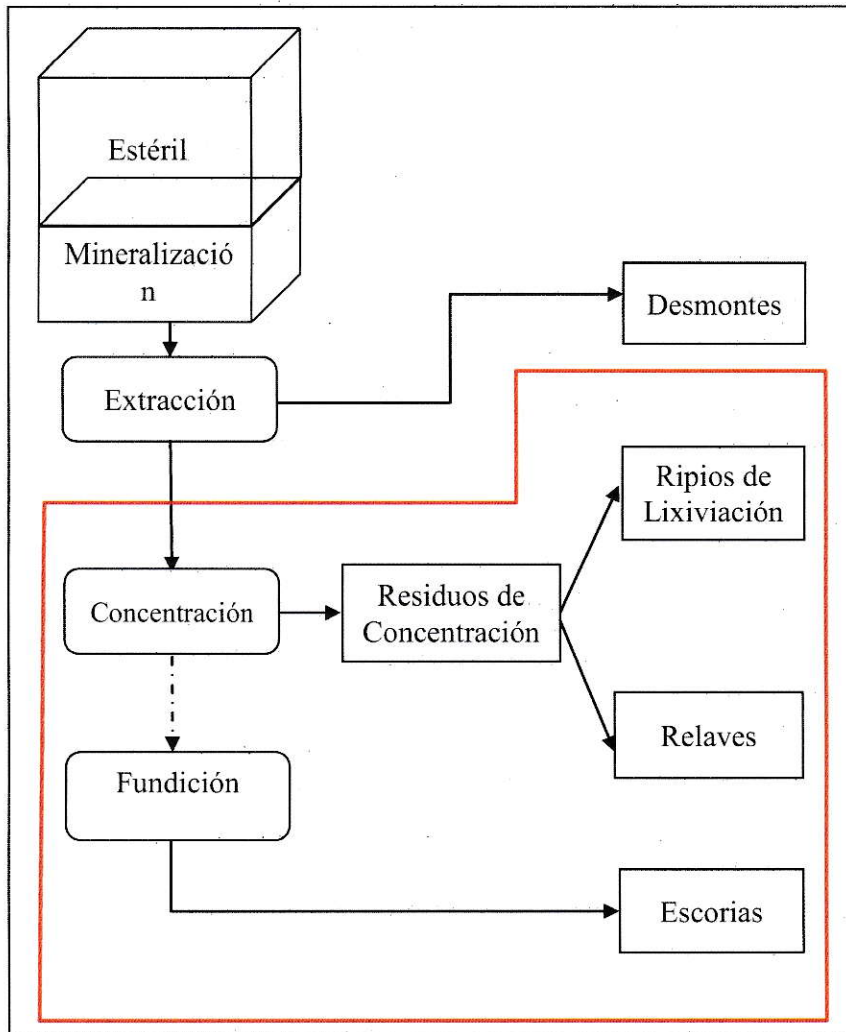


Figura 1. Principales residuos mineros asociados a las diferentes etapas del proceso productivo.

Para comprender la naturaleza de los residuos mineros es necesario tener una noción básica de los procesos productivos. El proceso, al verlo desde el punto de vista de los residuos, se puede explicar en 3 etapas principales. La primera Etapa es la extracción, la cual consiste en la remoción de material de la corteza, en esta etapa en general se retira el material estéril que se encuentra sobre el cuerpo mineralizado que posee el valor comercial, este material estéril se transforma en residuo y es dispuesto en el mismo lugar de la extracción. Luego comienza la extracción del mineral mismo, en donde las rocas con mineral de menor ley son depositadas en el lugar como un residuo. Los residuos de la extracción son conocidos como desmonte. Estos residuos son principalmente el mismo material que se puede encontrar en la corteza, sin embargo es material que comúnmente no se encuentra expuesto al aire, como por ejemplo minerales de sulfuros que se encuentran varios metros bajo la superficie, los cuales en presencia de humedad generan drenajes ácidos provocando la lixiviación de los metales y otros elementos presentes en la roca, siendo este su principal impacto, sin embargo, como se menciono anteriormente, estos residuos son depositados en la misma zona de extracción, las cuales en general se encuentran a varios kilómetros de los sectores poblados, por lo tanto para este estudio no son considerados.

Para este estudio, los residuos de relevancia corresponden a los relaves, escorias y ripios de lixiviación, siendo estos últimos los de menor importancia, por no encontrarse este tipo de residuos en la zona de estudio. Estos residuos deben interés a que estos son procesos que, exceptuando el caso de la gran minería, se llevan a cabo lejos del lugar de extracción, y que como requieren de agua en su desarrollo, históricamente se realizaban en las cercanías de ríos y otros cuerpos de agua naturales. Por lo tanto son los más

comunes de encontrar a lo largo del valle del río Copiapó, generalmente asociados a poblaciones y a otras actividades dependientes del agua como la agricultura. Cabe destacar que los residuos correspondientes a otros procesos de mantención y limpieza, como aceites o solventes no se incluyen, ya que dichos residuos se consideran como residuos industriales no particulares de la minería.

1.2.1 Relaves

Los relaves corresponden a 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 un circuito de molienda fina (DS 248/2006, ministerio de minería, art. 5).

La etapa de concentración se lleva a cabo luego de una etapa previa de molienda de la roca extraída. Esta se lleva a cabo por diferentes métodos dependiendo del material de interés.

Para el caso del oro, la concentración se lleva a cabo agregando mercurio a la roca finamente dividida y mezclada con agua, de esta manera el mercurio forma una amalgama con el oro, la que luego es separada de material de descarte. Actualmente este proceso es popular principalmente en la minería artesanal, siendo el más utilizado a mayor escala la separación gravimétrica y posterior cianuración, proceso en el que se provoca la concentración por medio de la adición de una sal de cianuro, el cual forma un complejo con el oro para su posterior extracción y separación.

En el caso de la minería de sulfuros de cobre, el mineral es concentrado por flotación, proceso en el que por medio de la adición de surfactantes y espumantes se logra la flotación del mineral con la consecuente separación de este (junto con otros minerales no deseados) de los aluminosilicatos que lo acompañan. Como resultado del proceso de la flotación se obtiene un concentrado del mineral y un residuo líquido que contiene agua y el material separado del mineral. A este residuo líquido le es extraído el exceso de agua, el cual generalmente es reinyectado al proceso de flotación, el residuo restante a lo que se le llama relave.

Si bien existen otros procesos, estos son los que tendrán importancia dados los residuos que se someterán a análisis. Cabe destacar que en los dos procesos descritos, la concentración se lleva a cabo sin que se produzca una transformación química.

Dado que en el caso de la pequeña minería las plantas de tratamiento reciben materia prima de distintos centros de extracción, y que en general en un yacimiento las concentraciones de componentes en la roca también poseen una fuerte variación, los depósitos de relaves son residuos sumamente heterogéneos.

1.2.2 Escorias

Las escorias corresponden a materiales vidriosos inertes con una compleja estructura química, incluyendo óxidos de metal, material refractario y otros materiales. Las escorias se obtienen como residuo de la fundición y está compuesto principalmente por silicatos y materias calcáreas.

Debido a las características del proceso, las escorias deberían tener concentraciones muy bajas de Hg y As, por estos elementos muy volátiles. En general tienen tamaños de partícula bastante grande (mayor a 2 pulgadas), lo cual dificulta su dispersión producto del viento. Por otra parte son productos vítreos, los cuales requieren de condiciones muy ácidas para que se lleguen a solubilizar los contaminantes ocluidos en el material.

1.3 De la contaminación de suelos a la Evaluación de Riesgos

Los residuos anteriormente descritos son comúnmente depositados en el lugar de realización del proceso respectivo. En nuestro caso de estudio estos residuos son dispuestos directamente sobre el suelo desnudo, sin ningún tipo de impermeabilización, por lo tanto el principal componente ambiental afectado es el suelo. Si bien de manera secundaria el aire y el agua pueden ser contaminadas por estos residuos, la fuente se encuentra directamente dispuesta sobre el suelo, por lo que resulta lógico apuntar a la evaluación y remediación de dicho componente.

Sin embargo, es en la tarea de evaluar estos residuos en donde nuestra legislación muestra sus mayores falencias, colocando la tarea cuesta arriba. Si bien en Chile es posible encontrar normas que protegen la contaminación de distintos medios acuáticos, o normas que persiguen mantener los límites de contaminación en el aire, para los suelos no existe legislación que proteja dicho medio y/o establezca límites permisibles para la concentración de elementos inocuos en el suelo.

De todas formas, frente al problema de estos residuos se intenta buscar en la legislación alguna ley norma o decreto bajo la cual estos queden al menos incluidos y clasificados

como perjudiciales para la salud, y de esta manera precisar la realización de algún tipo de gestión de estos residuos.

El Decreto Supremo 148 “Reglamento Sanitario Sobre Manejo de residuos Peligrosos”, podría tomarse como norma de referencia aplicable, sin embargo, en el artículo 23 se excluyen los residuos mineros de la clasificación de residuos peligroso:

“Para efectos de la aplicación del presente reglamento y siempre que la disposición final no se realice en conjunto con residuos sólidos domésticos u otros similares, los siguientes residuos mineros masivos que provengan de las operaciones de extracción, beneficio o procesamiento de minerales no serán considerados peligrosos:

- a) los estériles,*
- b) los minerales de baja ley,*
- c) los residuos de minerales tratados por lixiviación,*
- d) los relaves y*
- e) las escorias...”*

Por lo tanto los relaves y escorias quedan excluidos del DS148.

Como lo que buscamos es una clasificación en la que estos residuos queden clasificados como potencialmente inocuos para la salud de las personas, podemos apegarnos a que el sitio está contaminado. En ley 19300 de Bases del Medio Ambiente, según el artículo 2 letra c), contaminación corresponde a:

“La presencia en el ambiente de sustancias, elementos, energía o combinación de ellos, en concentraciones o concentraciones y permanencia superiores o inferiores, según corresponda, a las establecidas en la legislación vigente.”

Por lo tanto, ya que nuestro país carece de legislación vigente para los suelos, no resulta posible hablar de contaminación de suelos productos de los residuos en cuestión. Sin embargo, en la letra d) del mismo artículo, se define contaminante como:

“Todo elemento, compuesto, sustancia, derivado químico o biológico, energía, radiación, vibración, ruido, o una combinación de ellos, cuya presencia en el ambiente, en ciertos niveles, concentraciones o períodos de tiempo, pueda constituir un riesgo a la salud de las personas, a la calidad de vida de la población, a la preservación de la naturaleza o a la conservación del patrimonio ambiental”

Es decir, si es que logramos demostrar que el relave presenta un riesgo a la salud de las personas o a la calidad de vida de la población, podríamos hablar de que el sitio en donde está depositado el residuo presenta presencia de contaminantes, y por consiguiente, mientras no demostremos el riesgo presente, podemos hablar de sitios con potencial presencia de contaminantes.

Como ya se mencionó debemos demostrar que los sitios en donde se depositan relaves y escorias presentan riesgo a la salud de las personas, para lo cual se decidió utilizar la **evaluación de riesgos**. La evaluación de riesgos consiste en cuantificar la probabilidad de que un contaminante entre en contacto con algún receptor con consecuencias adversas para la salud de las personas o el medio ambiente (Sabroso & Pastor, 2004). Por lo tanto, esta herramienta nos permite cuantitativamente determinar si el sitio presenta un riesgo para la salud de la población, y, en consecuencia, demostrar que el sitio presenta contaminantes.

1.4 Evaluación de Riesgos

La evaluación de riesgos es una herramienta multidisciplinaria, integrándose en ella las áreas como la toxicología, ecología, química, física, estadística, ciencias ambientales, e incluso ciencias sociales, entre otras, la cual permite establecer prioridades y proponer medidas de gestión en base a la cuantificación del riesgo asociado a un sitio en particular.

Como herramienta la evaluación de riesgos es relativamente nueva, teniendo sus orígenes en la gestión ambiental hace no más de 30 años. En Chile, la evaluación de riesgos ambiental comienza a entrar recién en la última década, formando parte de estudios puntuales correspondientes principalmente a trabajos en conjunto con instituciones estatales (SERNAGEOMIN, MINSAL, CONAMA, MMA).

Antes de profundizar en las metodologías de evaluación de riesgos es necesario comprender el concepto de riesgo.

El riesgo corresponde a la probabilidad de sufrir un daño (Rhim, Ananacona 2004), es decir, el riesgo describe la posibilidad de que bajo ciertas circunstancias una sustancia específica produzca un daño. Para que esto ocurra es necesario que se encuentren tres elementos básicos; la sustancia, la vía o ruta de exposición y un receptor (figura 2). Por lo tanto, se puede hablar de ausencia del riesgo cuando cualquiera de estos no se encuentre presente.

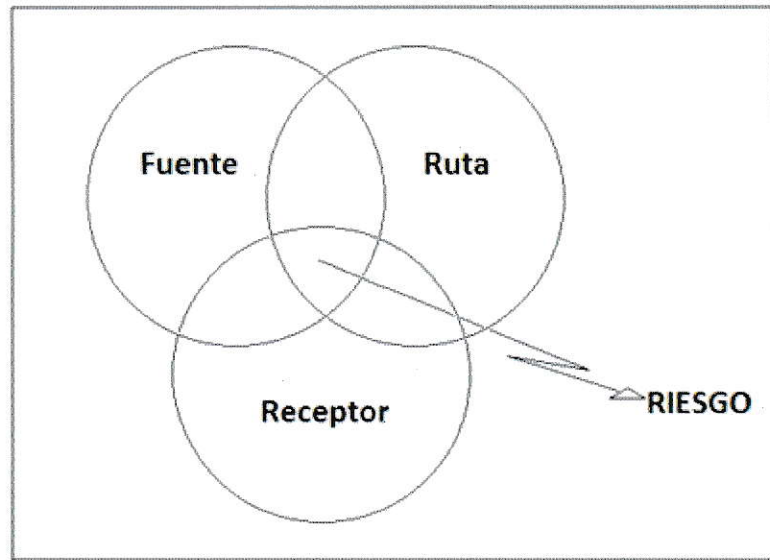


Figura 2. Elementos básicos del riesgo. (Rhim, Anacona 2004)

Entendiendo que el riesgo corresponde a la probabilidad que un contaminante llegue de la fuente a algún receptor en cantidades suficientes para causarle daño, es posible adentrarse en la metodología de evaluación de riesgos, la cual es son procesos iterativo de evaluación de esta probabilidad (riesgo), la cual se va haciendo más profunda en a medida que se avanza en las etapas.

En el caso del presente trabajo se revisó una serie de metodologías, llegando a definir un proceso “genérico” de la evaluación de riesgos (figura 2), tomando los elementos más comunes y relativamente imprescindibles de una evaluación. Posteriormente esta metodología “base” fue modificada y adaptada a nuestro caso de estudio. Las metodologías revisadas para generar nuestro modelo fueron:

- EPA, United States Environmental Protection Agency
- CCME, Canadian Council of ministers of environment
- OPS, Organización Panamericana de la Salud
- IHOBE, Sociedad Publica de Gestión Ambiental, Gobierno Vasco
- SERNAGEOMIN – BGR

Las metodologías revisadas tienen ya varios años en funcionamiento en sus respectivas localidades, con excepción de la metodología desarrollada por SERNAGEOMIN, la cual nace como iniciativa para la generación de un catastro de residuos mineros a nivel nacional. Por este mismo motivo las 4 primeras tienen bastantes elementos en común.

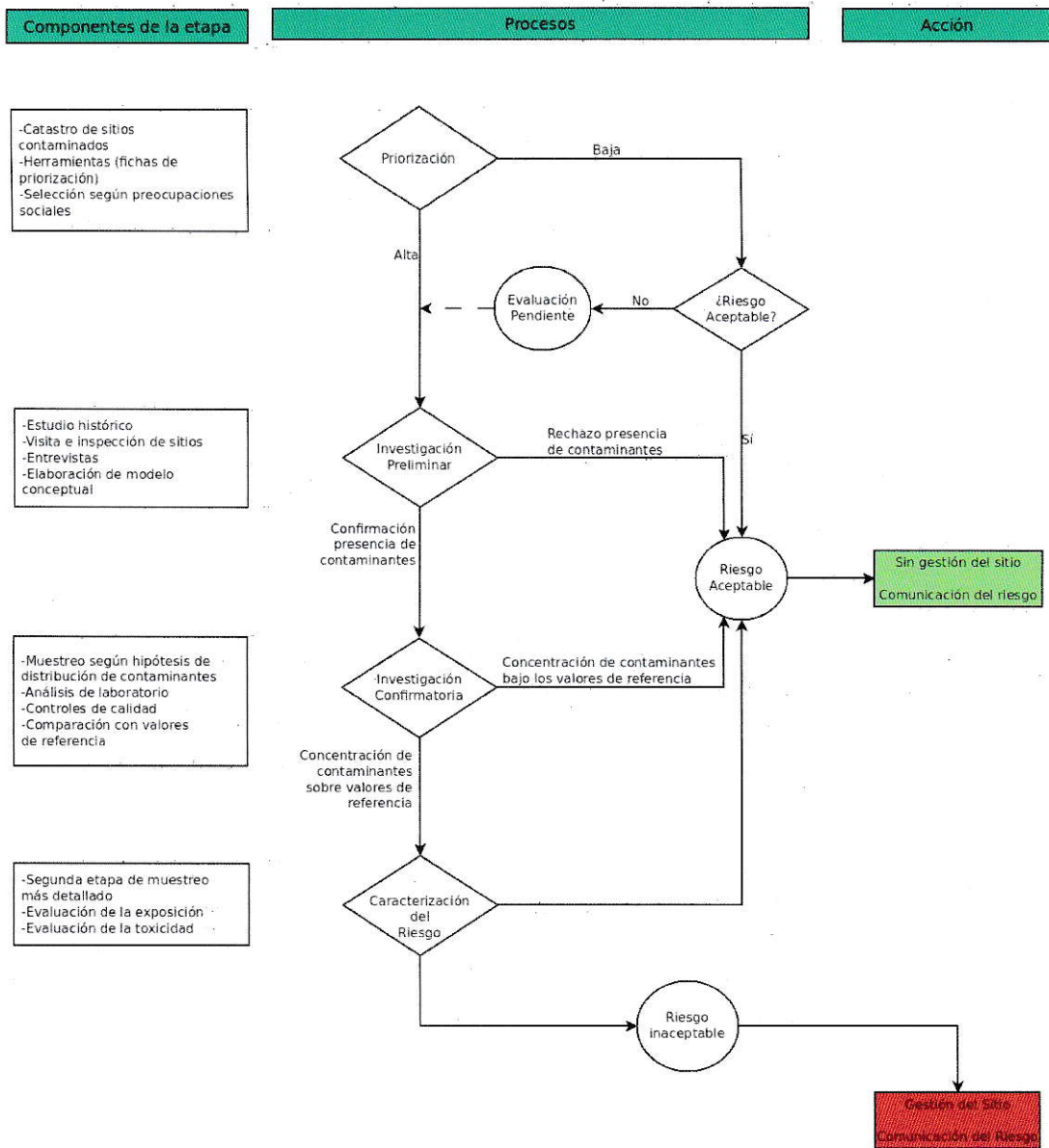


Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología de evaluación de riesgos.

La Evaluación de Riesgos consta de una primera etapa de priorización, en general esta etapa corresponde a un listado o catastro de los sitios identificados a nivel nacional o regional según corresponda, en el cual se han sometido los sitios a identificación, estudios bibliográficos y recopilación de información. En esta etapa en general se jerarquizan los sitios de acuerdo al potencial riesgos que estos presentan, dadas sus condiciones. Es decir, se realiza la identificación y a grandes rasgos la magnitud, de la fuente, las vías de exposición y los receptores. Para esto se suelen utilizar fichas de priorización, las cuales son elaboradas por los organismos pertinentes. Estas fichas por medio de la asignación de puntaje a los distintos tópicos (fuente, vías de exposición y receptores), otorgan un valor a cada sitio, el cual por comparación permite realizar una priorización o jerarquización de los sitios de acuerdo al potencial riesgo que estos presentan.

En base a la priorización de sitios es que se seleccionan los sitios más urgentes de sufrir una evaluación, cuando un sitio es seleccionado para avanzar con la evaluación este es sometido a una investigación preliminar, la cual consta de visitas al sitio, estudio histórico de este, entrevistas, revisión de quejas y denuncias que este presenta entre otros. El fin de esta etapa es constatar la presencia de un potencial riesgo, es decir, verificar la presencia de la fuente, o la presencia de contaminantes. Ya que algunas fuentes por ejemplo podrían no existir al momento de realizar esta etapa, ya sea porque fue removido intencionalmente, o porque por inundaciones u otros fenómenos estos residuos hayan desaparecido. También es adecuado en esta etapa constatar de problemas o daños que asociables a la fuente y la determinación de las posibles vías de exposición. Uno de los resultados más importantes de esta etapa es la elaboración de un modelo

conceptual. El modelo conceptual consta de un diagrama representativo del riesgo, mostrando la fuente, las posibles rutas por las que los contaminantes pueden dispersarse y llegar a los receptores, así como también a que receptores, en resumen, es una descripción escrita de las posibles relaciones entre la fuente y los receptores.

Una vez realizada la evaluación preliminar y confirmada la presencia de una fuente, se procede a una investigación confirmatoria, la cual tiene como principal objetivo evaluar la presencia de contaminantes en cantidades o concentraciones capaces de generar un daño, para lo cual se debe realizar como mínimo un muestreo de la fuente capaz de resultar en una caracterización de los contaminantes de esta. Para esto, ya que la mayoría de las metodologías analizadas provienen de regiones en las que existen normativas que establecen valores límites de contaminantes (generalmente basadas en la evaluación de riesgos), se comparan los valores de concentración encontrados en la fuente con los estipulados por las normas.

Por último, si es que se encuentra que el sitio supera los valores normados, se procede con la determinación del riesgo, la cual consiste en la obtención de una probabilidad, la cual puede ser aceptable, o en su defecto inaceptable. Para esto idealmente se debe realizar un muestreo y análisis detallado de la fuente, el cual debería incluir la caracterización no solo de la concentración, sino una especiación de los contaminantes, así como también análisis que permitan identificar las tasas de transporte de contaminantes a través de las diferentes vías.

En el caso de encontrarse un riesgo inaceptable se debe proceder a realizar acciones para disminuir esta probabilidad hasta hacerla aceptable. Aquí es donde se hace más notoria una de las virtudes de la evaluación de riesgos, ya que al tener una caracterización

precisa de la fuente y las vías, es posible atacar directamente las vías de exposición más contundentes, haciendo un uso más eficiente de los recursos.

Si bien en el proceso de evaluación de riesgos se podría eliminar la iteración del proceso y realizar inmediatamente la última etapa, una de las bases de los procesos de evaluación de riesgos es buscar la eficiencia de los recursos a utilizar en medidas de gestión de los residuos, lo cual es bastante gráfico en la figura 4.

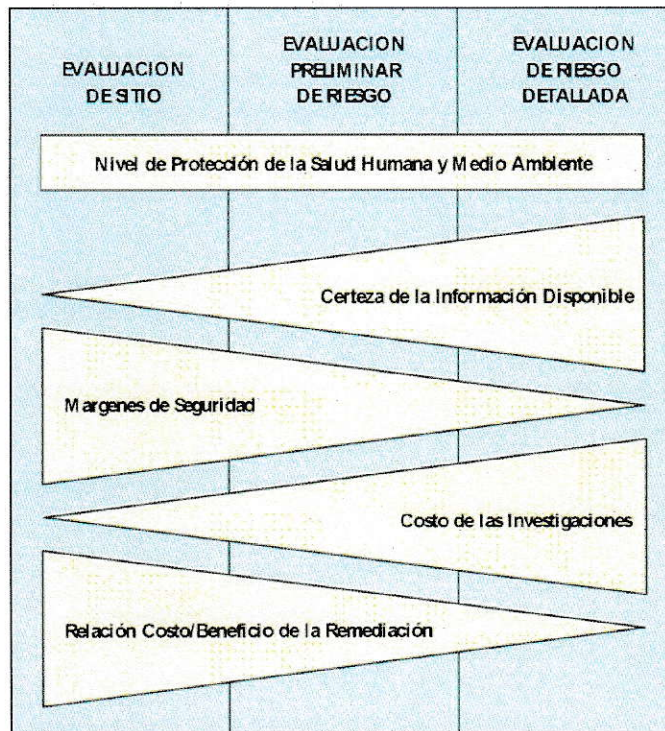


Figura 4. Relación de los distintos factores que influyen en la evaluación de riesgos; información, incertidumbre, costos y beneficios. (Fuente: curso evaluación de riesgos A. Rhim, agosto 2011)

1.5 Caso de Estudio

Las comunas de Copiapó y Tierra Amarilla, ubicadas ambas en la Provincia de Copiapó, Región de Atacama (figura 5), han sido territorio de explotación minera de cobre, oro y plata desde el siglo XIX hasta el presente. El primer mineral de importancia descubierto en la zona corresponde al mineral de Chañarcillo (plata) el cual fue un pilar fundamental de la época para el desarrollo de la región. A pesar de haber atravesado por épocas de decaimiento económico y disminución en el sector Minero, ésta ha permanecido como principal actividad económica de la región, constituyendo una fuente de ingresos para la comunidad, tanto en la minería a gran escala como también en la que realizan pirquineros y plantas de procesamiento de Pequeña Minería, quienes luego comercializan sus productos en sectores industriales tales como Fundición Hernán Videla Lira (Ex - Paipote) de ENAMI.

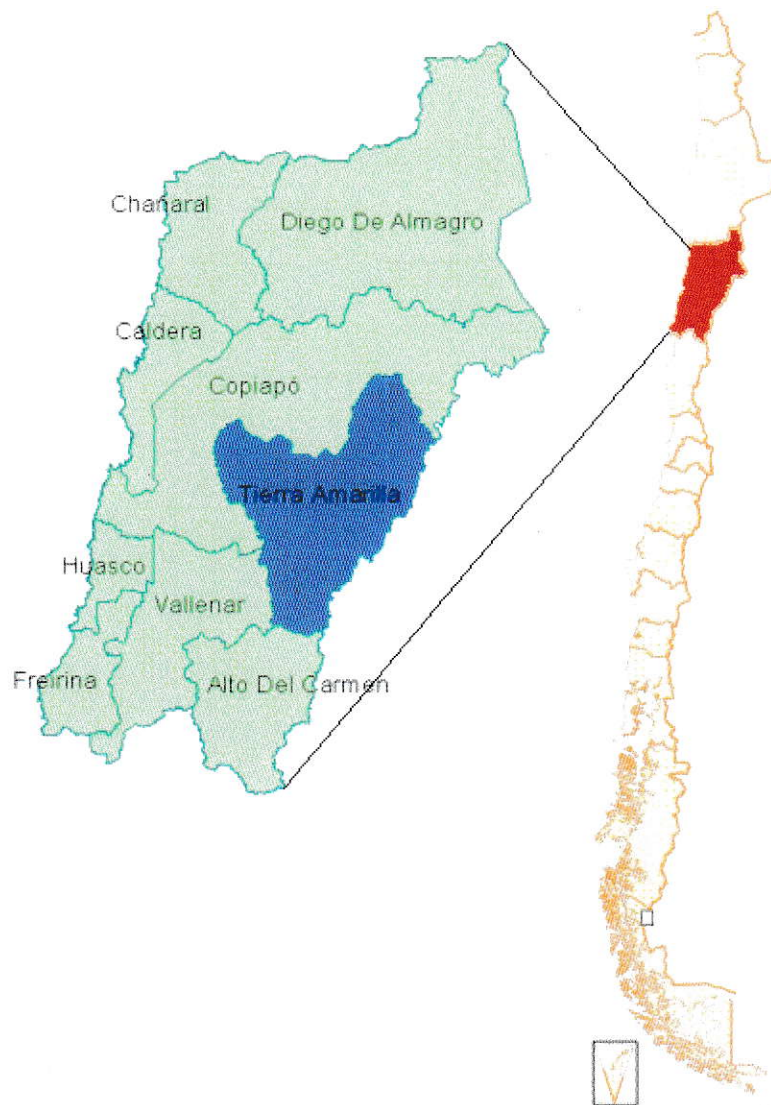


Figura 5. Comunas Región de Atacama. (SII, Sistema de Información Laboral 2012)

Esto ha generado la existencia de cerca de un centenar de relaves mineros a orillas de los cursos de agua y cercanos a los habitantes de la comuna (Figura 6). Por otra parte, desde la década de 1980 hasta la actualidad, debido a la implementación de tecnologías (por ejemplo riego por goteo), se ha desarrollado también el sector Agropecuario-Silvícola, con una destacada producción de vitivinícola, la que constituye la segunda actividad de

mayor importancia en la región. Frente a este escenario resulta necesario comenzar el proceso de evaluación de estos residuos con vistas a determinar el eventual riesgo de estos pasivos ambientales. En la imagen que se presenta a continuación, es posible apreciar la numerosa cantidad de pasivos ambientales mineros que se han acumulado a lo largo del tiempo en la zona.

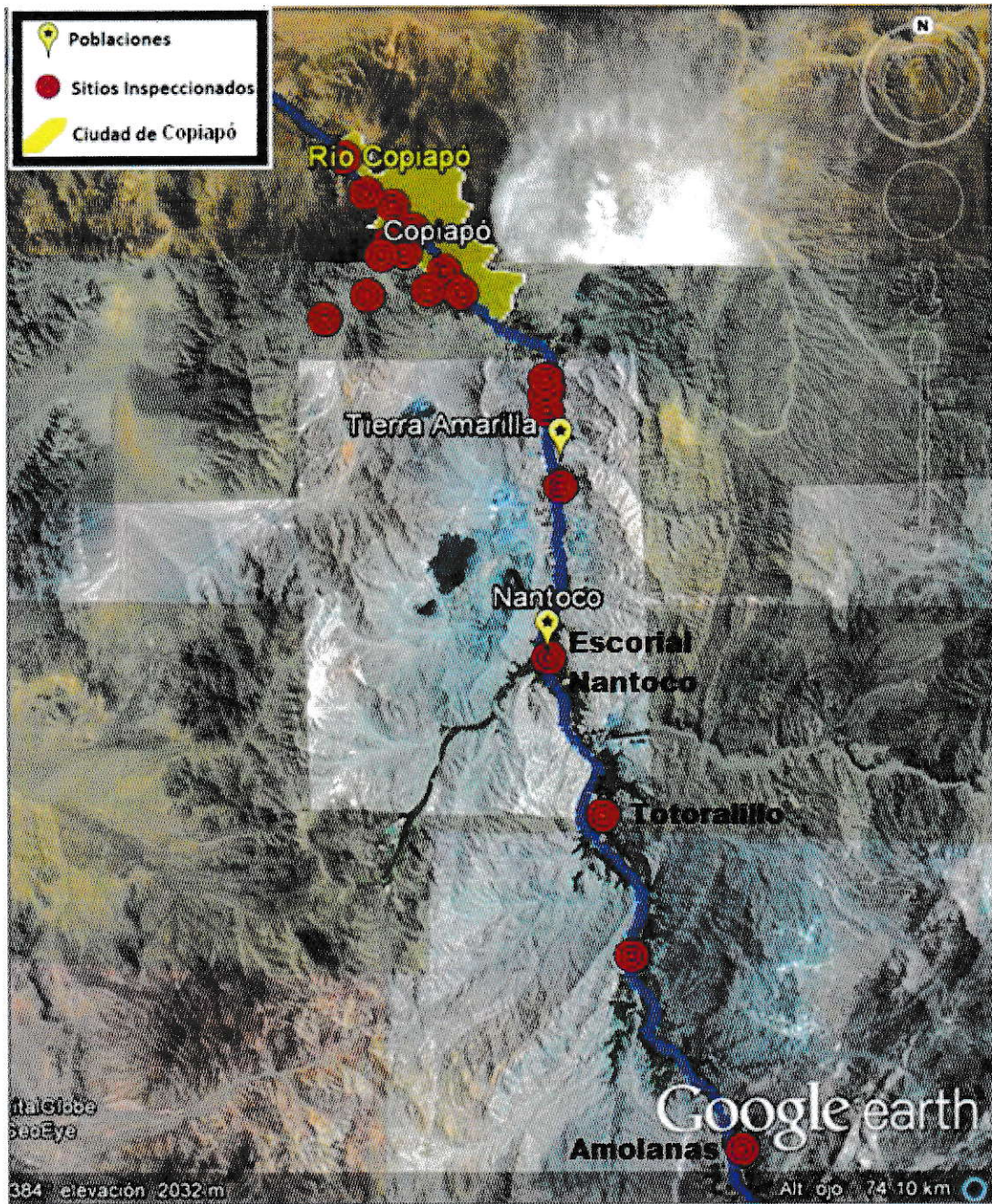


Figura 6. Distribución de residuos mineros a orillas del río Copiapó (en azul) y los principales centros urbanos de la comuna de Tierra Amarilla. El área amarilla corresponde a la ciudad de Copiapó.

De estos sitios solos algunos fueron seleccionados para ser incluidos en el proceso de Evaluación de riesgos, estos sitios fueron escogidos en base al catastro SERNAGEOMIN-JICA de 2010 y conversaciones con personal de la SEREMI MMA de la región de Atacama. De esta selección se obtuvo 2 depósitos de relaves y un depósito de escorias:

- Relave Totoralillo
- Relave Amolanas
- Escorial Nantoco

Estos tres sitios se encuentran en la comuna de Tierra Amarilla, todos en la cuenca del río del Copiapó y a escasos metros del lecho del mismo. Sin embargo cabe destacar que el río Copiapó se encuentra como tal hasta unos pocos kilómetros más abajo del embalse Lautaro, el cual se encuentra en el extremo sur de la cuenca del río Copiapó. Más abajo del embalse Lautaro, el río, debido a la extracción por parte de la minería y la agricultura a lo largo del cauce, muestra un caudal muy reducido, encontrándose solo como canales de regadío y su lecho completamente seco.

Los detalles de ubicación y contexto en el que se encuentran los residuos seleccionados se consideran parte de los resultados de la priorización e investigación preliminar.

Los Sitios serán evaluados para los elementos arsénico, plomo y mercurio, por la sobresaliente preocupación debido a la peligrosidad de estos elementos para la salud humana, además se tiene evidencia de altas concentraciones en los sitios (BGR, SERNAGEOMIN 1998).

1.6 Contaminantes de mayor preocupación y sus efectos tóxicos

Los contaminantes de mayor preocupación y que serán abarcados en este estudio corresponden al arsénico, mercurio y plomo. Esto debido a; en primer lugar la gran probabilidad de encontrar estos elementos dados los procesos industriales que dan origen a los residuos evaluados. En segundo lugar lo altamente tóxicos que son estos elementos para los organismos. A continuación se detalla un breve perfil toxicológico de estos elementos.

1.6.1 Arsénico

El arsénico y el fósforo por encontrarse en el mismo grupo tienen comportamientos similares, es por esto que es asimilado con facilidad por el organismo. El As(III) es más tóxico que el As(V), de hecho es probable que la toxicidad del As(V) se deba a su reducción en el organismo a As(III). Si bien el mecanismo de toxicidad del arsénico no está muy claro, es que por procesos internos del organismo genere moléculas altamente reactivas que afecten el ADN. Por esto el arsénico es principalmente un gran precursor de cáncer. El arsénico también inhibe ciertos receptores de hormonas que suprimen el cáncer y regulan el azúcar en la sangre, por lo que también es un precursor de diabetes. (Spiró & Stigliani 2009)

1.6.2 Mercurio

Si bien la toxicidad del mercurio se asocia principalmente al metilmercurio ingerido por el consumo de pescados, el mercurio elemental (especie más probable para nuestro caso)

también posee una alta toxicidad, sobre todo por la inhalación de este y su consiguiente ingreso al torrente sanguíneo. Al igual que el metil mercurio, el mercurio elemental fácilmente ingresa en las células del sistema nervioso, generando síntomas como parálisis, pérdida de la visión, audición y coordinación muscular, dentro de los efectos del mercurio también se presentan trastornos mentales. El mercurio, entre los tres contaminantes descritos es el que tiene una tasa de eliminación del organismo más pequeña, por lo que se acumula fácilmente. (Spiro & Stigliani 2009)

1.6.3 Plomo

Dentro de los efectos tóxicos del plomo se puede indicar dos principales efectos, en primer lugar el plomo inhibe la enzima responsable de la síntesis del grupo hemo, afectando el punto de unión del oxígeno y su transporte. Como principal consecuencia de este efecto se puede mencionar la presencia de anemia. Por otra parte, el plomo afecta las células del sistema nervioso, disminuyendo la velocidad de transmisión de las señales nerviosas. Esto ha generado en los eventos de contaminación la disminución de las capacidades cognitivas de niños, quienes son los que se ven más afectados, debido a su menor masa corporal y principalmente a que, a diferencia del caso del mercurio y el arsénico, quienes en moléculas inorgánicas tienen una baja absorción por el tracto intestinal, esta es una buena ruta para la absorción de plomo en el organismo. (Spiro & Stigliani 2009)

1.7 Metodología de evaluación de Riesgos

1.7.1 Priorización e investigación preliminar

(Ver diagrama de flujo en figura 3).

En primera instancia se realizó una visita a los sitios, en la cual se realizó una inspección visual de cada sitio y entrevistas. Asimismo, en esta visita se tomó una muestra puntual de cada sitio así como también una muestra puntual de algún cuerpo de agua cercano.

Para esta visita se utilizó una ficha de inspección, con el fin de realizar un orden en el ingreso de la información colectada, con el fin de facilitar el posterior manejo de esta misma. En esta ficha se ingresaron datos como la ubicación del sitio, tamaño, comentarios de entrevistados y aspectos relevantes observados como usos actuales del sitio y de los sitios colindantes, entre otros.

Posterior a esta visita se decidió someter los sitios a un proceso de priorización, por este motivo se adaptó la metodología “base” extraída de las metodologías estudiadas, unificando las etapas de priorización y de investigación preliminar. Por esta razón los resultados de priorización y de investigación preliminar no se presentan como parte de una fase diferente. Por el mismo motivo, podríamos decir que se perdió un filtro del proceso al unificarse dos filtros diferentes, sin embargo, dada la secuencia de los hechos, y la cantidad de información que se inyectó al proceso con esta visita previa, se logró concluir en base a la completitud de los resultados de ambas etapas.

Para la parte de esta primera etapa correspondiente a la priorización como tal, se aplicó la ficha de inspección del CCME (Canadian Council of Ministers of Environment), se eligió esta ficha debido a su simplicidad, la cual no contempla aspectos que tengan que

ser obtenidos de otros procesos y calificaciones incluidos en la misma normativa, sino que tomaba principalmente características comunes. Por otra parte, esta ficha su manual de uso se distribuye de manera gratuita en el sitio web del CCME.

La ficha consiste en una serie de preguntas con opciones fijas de respuesta, las cuales pueden ser sí o no, o contemplar rangos, ya sea de área, volatilidad, solubilidad, u otro. Es importante hacer notar que todas las preguntas incluyen la posibilidad de respuesta “no conocido”. Cada respuesta posee un puntaje diferente, siendo este mayor en el caso asociado a un mayor riesgo, en el caso de las respuestas “no conocido”, el puntaje asignado es el correspondiente a la situación media. Luego, de la suma de los puntajes obtenidos para un sitio, se obtiene el valor final del sitio, el cual concluye la clasificación del sitio en una de las clasificaciones que la normativa indica, las cuales pueden ser:

- Class 1 - High Priority for Action (Total NCS Score >70)
- Class 2 - Medium Priority for Action (Total NCS Score 50 - 69.9)
- Class 3 - Low Priority for Action (Total NCS Score 37 - 49.9)
- Class N - Not a Priority for Action (Total NCS Score <37)
- Class INS - Insufficient Information (>15% of Responses are "Do Not Know")

Esta ficha está dividida en 3 tópicos principales; características de los contaminantes (fuente), potencial migración (rutas) y exposición (receptores), sin embargo, este último se divide en dos, receptores humanos y receptores ecológicos. Ya que en este caso solo se desea evaluar el riesgo sobre la población, para mantener la posibilidad de comparar los resultados obtenidos para cada sitio, se asignó el mínimo puntaje a la parte referente

a receptores ecológicos. El detalle de la hoja de resumen de puntajes de la ficha puede verse en Anexo I.

Cabe destacar que el llenado de la ficha fue más fluido y completo gracias a la visita previa realizada y las muestras tomadas, lo cual permitió responder con facilidad las preguntas contenidas en la ficha de priorización.

En base al resultado obtenido en la priorización, se consideró someter al resto del proceso de evaluación de riesgos el sitio con el mayor puntaje, el cual fue Totoralillo.

Otro de los resultados obtenidos en esta etapa fue la elaboración de un modelo conceptual para cada sitio, en base a lo observado en la visita, lo cual permitió entregar una descripción gráfica de la situación en cuanto a relaciones fuente-receptores.

1.7.2. Investigación Confirmatoria

(Ver diagrama de flujo en figura 3)

El sitio Totoralillo por lo tanto fue sometido a una investigación confirmatoria, por lo cual fue sujeto a un muestreo intensivo con el fin de comparar la concentración de contaminantes con algún valor de referencia. En este punto se hace compleja la comparación, ya que el Relave del sitio Totoralillo, si bien es una fuente definida con fronteras claras, es un residuo de características muy heterogéneas, encontraremos puntos de concentraciones altas y bajas, llegando a diferencias en una o dos magnitudes entre muestras de un mismo sitio, por lo tanto necesitamos obtener valor “nominal” de concentración para cada analito en el sitio, entendiéndose este valor “nominal” como la concentración media a la que los receptores estarán sometidos.

Para este fin se elaboro un plan de muestreo del sitio considerando un muestreo al tresbolillo o alternado (figura 7), basados en la guía “Investigación de la Contaminación del Suelo”, del País Vasco (IHOBE, 2007), de acuerdo a lo recomendado para un sitio con dichas características de heterogeneidad y fronteras.

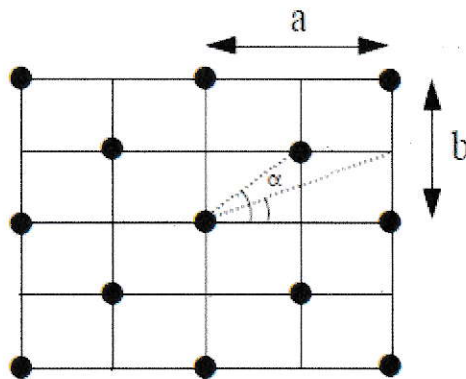


Figura 7. Esquema de distribución de muestreo sistemática al tres bolillo o alternada. Los puntos negros corresponden a puntos de muestreo. (IHOBE 2002)

El muestreo se realizo en superficie (primeros 30cm) a pesar de que los residuos presentes en los sitios presentan profundidades de entre 0,5 y 2m, ya que se espera que el material más externo sea el que entre en contacto con los receptores.

La cantidad de muestras, de acuerdo a lo recomendado por la guía “Investigación de la Contaminación del Suelo”, del País Vasco (IHOBE, 2002), se obtiene con la siguiente fórmula:

$$n = 5 + A \quad \text{ec.1}$$

Donde n es el número de puntos de muestreo y A corresponde al área del sitio en hectáreas.

El resultado del muestreo puede verse en la figura 14. En la sección Resultados.

Las muestras colectadas fueron analizadas para As, Pb y Hg, obteniéndose las concentraciones para cada muestra. Sin embargo, como ya se mencionó, es necesario obtener una concentración nominal.

Respecto a cómo conseguir este valor existe una continua discusión en el ámbito de la evaluación de riesgos, por lo que no hay una manera consensuada de hacerlo. Entre las opciones más comunes está; el promedio, la moda, en casos más conservadores el máximo, entre otras opciones.

Basados principalmente en la idea de que la media aritmética podía “ocultar” muestras con un contenido alto en mayoría de resultados más bajos, se optó por utilizar la recomendación de la USEPA (USEPA 2002), la cual recomienda utilizar el límite de confianza superior (UCL por sus siglas en inglés) de la media aritmética basado en la distribución que mejor describe la dispersión de los resultados. Para calcular este valor la EPA distribuye de manera gratuita el programa proUCL, el cual con solo agregar los datos en formato Excel permite calcular este valor de manera simple.

Dado que Chile no posee Normas de Calidad para suelos, no es posible establecer cuáles son los valores de concentración para cualquier compuesto que sea detectado en un suelo en evaluación que permita definirlo como suelo contaminado o de calidad no aceptable.

Por esto se recurrió a comparar con normas internacionales y con valores base.

En este estudio se consideraron los valores de concentraciones que entregan las normativas de los siguientes países o regiones:

- Canadá
- Australia
- Estados Unidos Mexicanos
- Estado de São Paulo, Brasil
- Comunidad Autónoma del País Vasco, España.

Las comparaciones directas con criterios (o Valores de Referencia) usados en distintos países se hace necesario debido a la ausencia de normativa nacional. A pesar de que las normativas extranjeras fundamentan los valores límite la evaluación de riesgos y en la toxicología, hay que tener en consideración que las condiciones para cada localidad (país, región, etc), pueden variar muchísimo y de la misma manera variar la tolerancia de la personas a los distintos contaminantes dependiendo de las condiciones de su entorno. Un común ejemplo de esto es el contenido de arsénico en los suelos de la zona de Antofagasta, el cual, a pesar de tener orígenes naturales, supera varias normas internacionales.

Por otra parte, si bien algunas de las normas y guías utilizadas pueden proponer distintas maneras de obtener la concentración de contaminante en la fuente. En base a lo investigado este es un tema en aún en discusión, por lo tanto, como ya se planteo anteriormente nosotros utilizamos el límite superior de confianza del 95% del promedio como valor a comparar.

1.7.2.1 Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health (Septiembre 2007)

Esta guía Canadiense proporciona valores de concentración de diversos parámetros para distintos usos de suelos. Están divididos en dos secciones, la primera de ellas corresponden a los valores de las Normas Canadienses de la Calidad del Suelo y la segunda sección corresponde a criterios provisionales para la remediación del suelo que aún no han sido reemplazados por las Normas Canadienses de Calidad de Suelo (Interim remediation criteria for soil that have not yet been replaced by Canadian Soil Quality Guidelines), destacadas en la tabla a continuación.

Tabla 1. Criterios establecidos para calidad de suelos en Canadá.

Parámetro (mg/Kg)	Uso de Suelo			
	Uso agrícola	Uso residencial/parques	Uso comercial	Uso industrial
Hg	6,6	6,6	24	50
As	12	12	12	12
Pb	70	140	260	600

* Criterios provisionales para la remediación del suelo que aún no han sido reemplazados por las Normas Canadienses de Calidad de Suelo. Se muestran solo los elementos de interés.

(Fuente: *Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health* (Septiembre 2007))

1.7.2.2 Assessment Levels for Soil, Sediment and Water (Febrero 2010).

El “Assessment levels for Soil, Sediment and Water” de Australia, establece valores límite de concentración de diversos parámetros, indicando valores tanto para investigación de nivel ecológico como para una investigación a nivel de la salud (en el contexto de evaluaciones de riesgo). En la siguiente tabla se entregan los valores para investigación en salud, en los diferentes escenarios de uso de suelo para población expuesta que entrega la norma. La norma propone comparar el promedio de la fuente con estos valores.

Tabla 2. Criterios establecidos para calidad de suelos en Australia.

Parámetro (mg/Kg)	Uso de Suelo			
	Uso Residencial con jardín accesible	Uso residencial con acceso restringido a suelos	Uso para Parques	Uso comercial
Hg	15	60	30	75
As	100	400	200	500
Pb	300	1200	600	1500

*Se muestran solo los elementos de interés.

(Fuente: *Assessment Levels for Soil, Sediment and Water, Febrero 2010*).

1.7.2.3 Norma Oficial Mexicana para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004).

En México, la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (2003), establece las bases para prevenir la contaminación de sitios por el manejo de materiales y residuos, así como para definir los criterios a los que se sujetará su remediación. Los conceptos fundamentales son:

Concentración de referencia total (CRT) es la masa del elemento químico regulado, expresada en mg/kg de suelo, expresada en base seca, por encima de la cual se considera que existe riesgo de que se generen efectos adversos para la salud. Se establece para diferentes usos la cual se considera que existe riesgo de que se generen efectos adversos para la salud. Se establece para diferentes usos.

A continuación se presentan los valores de concentración para los diferentes parámetros que se evalúan en este estudio, según la norma de México:

Tabla 3. Criterios establecidos para remediar suelos en México

Parámetro (mg/Kg)	Uso de Suelo	
	Uso agrícola/residencial/comercial	Uso industrial
Hg	23	310
As	22	260
Pb	400	800

*Se muestran solo los elementos de interés.

(Fuente: Norma Oficial Mexicana para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004))

1.7.2.4 Valores orientadores para suelos en el estado de Sao Pablo, Brasil. “Artigo 1º Decisão de Diretoria Nº 195-2005-E, de 23 de novembro de 2005”.

La Compañía de Tecnología de Saneamiento Ambiental de Sao Pablo, Brasil, mediante su Directriz No 195 de noviembre de 2005 estableció las Disposiciones sobre la aprobación de valores orientadores para suelos y aguas subterráneas en el Estado de Sao Pablo.

Valor de Referencia de Calidad (VRQ) es la concentración de una determinada sustancia en suelo (o agua subterránea) que define a un suelo como limpio o de calidad natural a partir de una información estadística de análisis realizados en el estado de San Pablo. Debe ser utilizado como referencia para acciones de prevención de la contaminación.

Valor de Prevención (VP) es la concentración de una determinada sustancia por encima de la cual pueden ocurrir alteraciones perjudiciales a la calidad del suelo y del agua

subterránea. Este valor indica la calidad de un suelo de ser capaz de sustentar sus funciones primarias protegiendo tanto sus funciones primarias como receptor ecológico y la calidad de las aguas subterráneas. Este valor de prevención (VP) debe ser considerado para autorizar la introducción de sustancias en el suelo.

Valor de Intervención (VI) es la concentración de una sustancia en suelo y agua subterránea por encima de la cual existen riesgos potenciales directos e indirectos a la salud humana considerando un escenario de exposición genérico.

En la tabla a continuación se presentan las concentraciones permitidas de los parámetros en estudio, para los diferentes valores orientadores antes explicados.

Tabla 4. Valores orientadores para suelos en el estado de Sao Pablo, Brasil

Parámetro (mg/Kg)	Valor base de referencia	Valor de prevención	Uso de Suelo		
			Valor de intervención/Usos agrícola	Valor de intervención/Usos residencial	Valor de intervención/Usos industrial
Hg	0,05	0,5	12	36	70
As	3,5	15	35	55	150
Pb	17	72	180	300	900

*Se muestran solo los elementos de interés.

(Fuente: Artigo 1º Decisão de Diretoria Nº 195-2005-E, de 23 de novembro de 2005)

1.7.2.5 Ley de Prevención de la contaminación del suelo del País Vasco Ley 1/2005, de 4 febrero.

En la comunidad del País Vasco, España, la Ley 10/1998 de residuos, establece el régimen jurídico para recuperar los suelos que hayan sido declarados como contaminantes mediante resolución expresa; se ocupa de la declaración de los suelos que se consideran contaminados. Se utilizan los siguientes conceptos:

Valor indicativo: Corresponde al límite superior del intervalo de concentraciones en que una determinada sustancia se encuentra de forma natural en los suelos de la Comunidad Autónoma del País Vasco; por lo que consecuentemente, si la concentración encontrada supera el VALOR INDICATIVO, se requiere una evaluación del caso para determinar su grado de alteración.

Sin embargo, habiendo superado el VALOR INDICATIVO, la evaluación permite discernir si el suelo se encuentra alterado o no, según el siguiente concepto:

Suelo alterado: Es todo aquel suelo en el cual se identifiquen concentraciones de sustancias que superen los valores indicativos de evaluación que se especifican en el anexo I de la legislación referida, para diferentes usos.

En la tabla a continuación se presentan los valores según uso, para los elementos evaluados en este estudio.

Tabla 5. Valores límites para considerar un suelo alterado según usos del suelo en la Comunidad Autónoma del País Vasco.

Parámetro (mg/Kg)	Uso de Suelo				
	Uso industrial	Uso como parque público	Uso urbano	Uso en área de juego infantil	Otros usos
Hg	40	15	4	4	4
As	200	30	30	30	30
Pb	1000	450	150	120	120

*Se muestran solo los elementos de interés.

(Fuente: Ley de Prevención de la contaminación del suelo del País Vasco Ley 1/2005, de 4 febrero)

1.7.2.6 Valor Base

Chile no dispone de un estudio nacional tipo “línea base” que permita discernir cuáles eran los niveles de elementos en épocas anteriores a la intervención antrópica. De este modo, una alternativa razonable para comparar los efectos de la actividad humana en una zona específica, consiste en establecer áreas de referencia, que conserven la mayor similitud geológica posible con la zona de estudio, pero con un nivel despreciable de intervención antrópica.

Para el presente estudio, se tomaron muestras en zonas cercanas o dentro de la comuna de Tierra Amarilla, donde no existe actividad minera ni uso urbano. La elección de los puntos de muestreo se basó en el hecho de que la zona norte del país presenta suelos poco desarrollados y es posible identificar la clasificación que se presenta en cartas geológicas (de SERNAGEOMIN) que describen la zona en que se emplazan los relaves

en estudio, permitiendo seleccionar puntos de características similares a los lugares donde se han depositado los residuos.

Para obtener el valor base se tomaron tres muestras de cada unidad geológica seleccionada, las cuales fueron 4 en total. Los puntos a muestrear fueron seleccionados en terreno, previa definición, de las zonas en las que correspondía tomar las muestras para cada unidad mediante la superposición de cartas geológicas utilizando GoogleEarth. Esto dio un total de 12 muestras, a partir de las cuales se obtuvieron los valores de la tabla 6.

Tabla 6. Valores base en la zona de Copiapó y Tierra Amarilla.

Parámetro	*UCL (mg/Kg)
Hg	0,479
As	< LD
Pb	16,33

*(UCL: Upper Confidence Level 95% (límite superior de confianza del 95%) estimación estadística de la concentración de muestras obtenidas en terreno-explicado más adelante)

Las zonas muestreadas (Figuras 15 y 16), corresponden con las siguientes unidades geológicas:

TKg: Batolito andino (principalmente granodiorita).

Monzodioritas cuarcíferas y dioritas cuarcíferas gris verdosas de clinopiroxeno, anfíbola y biotita (en cúmulos) de grano medio a grueso. Hospedan vetas con mineralización de Cu, Au y Fe (Mina San Juan de Patacones, Manchada, Delaida, Verde Negra,

Esmeralda, Mosquito, Elvira, Paloma, Fortuna, menas principales: de oro y oxidos de cobre)

Qal: Depósitos aluviales. (Gravas, ripios, arenas y limos asociados al drenaje activo y esporádico con desarrollo local de terrazas. También incluyen aluvios depositados como cubiertas sobre planicies extensas. Los depósitos coluviales corresponden a gravas y ripios sueltos, de mala selección, que se restringen a conos y faldeos en taludes de quebradas y cerros).

Kan: Formaciones Abundancia y Nantoco. (Estas rocas albergan mineralización de óxidos y sulfuros de cobre como malaquita, azurita, atacamita, calcopirita, bornita, covelina y calcosina.

Ktp: Formaciones Totalillo y Pabellón. (Totalillo: calizas gris claras a amarillentas, con buena estratificación, organizadas en subsecuencias grano y estrato crecientes.

Pabellón: Secuencia calcárea arenosa de 430 m de espesor. (SERNAGEOMIN, 1995)

1.7.2.7 Comparación valores de referencia

A continuación en la tabla 7 se presenta un cuadro comparativo de los valores utilizados como referencia, dado el caso de estudio se muestran solo los valores correspondientes a uso residencial. Si bien todas las normas presentan valores dentro de ciertos rangos para cada contaminante, cabe recordar que cada localidad o región posee sus propios niveles base, y por lo tanto, la población expuesta presenta tolerancia características de cada

una. Desde este punto de vista, el valor base sería el valor más adecuado para realizar la comparación. Sin embargo, el valor base a pesar de ser muy preciso en descartar el riesgo en caso de no encontrarse fuentes con concentraciones que lo superen, no necesariamente un concentración superior al valor base indicara necesariamente un riesgo inaceptable, debido a que existe un rango de tolerancia por parte de la población para cada contaminante o la combinación de estos.

Tabla 7. Cuadro comparativo de valores de referencia.

	Valor Base	País vasco	Sao Paulo	México	Australia	Canadá
Hg [mg/kg]	0,479	4	36	23	15	6,6
As [mg/kg]	< LD	30	55	22	100	12
Pb [mg/kg]	16,33	150	300	400	300	140

1.7.3 Cuantificación del riesgo.

(Ver diagrama de flujo en figura 3)

Luego de la etapa de investigación confirmatoria, si se encuentran niveles de contaminantes superiores al valor de referencia utilizado, el sitio debe ser sometido a la última etapa, en la que se espera cuantificar el riesgo, es decir, obtener el valor correspondiente a la probabilidad de que los contaminantes alcancen a los receptores con consecuencias adversas.

En general en esta etapa se requiere una densidad de muestreo mucho mayor que la obtenida en la evaluación confirmatoria, así como también un muestreo específico para

cada ruta, a manera de disminuir la incertidumbre de la determinación al máximo, logrando así direccionar de la manera más correcta y eficiente las acciones de mitigación y remediación. Sin embargo, esta etapa no estaba contemplada por el acuerdo entre CENMA y el MMA, por lo que no se realizó un muestreo adecuado para la caracterización del riesgo, a pesar de esto se caracteriza el riesgo dentro a modo de ejercicio a partir de los resultados de la investigación confirmatoria. Las vías de exposición que serán contempladas, serán la ingesta de polvo y la absorción dérmica de contaminantes, el resto de las vías resulta imposible evaluarlas debido a que no se dispones de datos para estas. Cabe destacar que se toma solo una variable de la ingesta (ingesta accidental de polvo). La ingesta de agua, hortalizas y otros alimentos también requiere de datos específicos con los cuales no se cuenta.

Existen muchos modelos matemáticos para cuantificar el riesgo, sin embargo la mayoría llega a resultados similares y que se presentan en un mismo formato, el cual corresponde a una probabilidad. A pesar de esto, debido a la poca información para realizar una cuantificación completa y el hecho de que la intención principal es mostrar los resultados que pueden obtenerse, no se hizo una investigación mayor de los métodos. Por este motivo se basa el cálculo en el trabajo “Riesgos Ambientales Asociados a Sitios Contaminados” elaborado por Rhim y Anacona en el año 2004, el cual basa sus cálculos en la metodología de la USEPA.

Para evaluar el riesgo se lleva a cabo en primer lugar una etapa de Evaluación de la exposición, la cual consiste en la determinación de una dosis para cada ruta a partir de la concentración en las distintas matrices ambientales. La segunda etapa es la

caracterización del riesgo, la cual comprende la comparación de las dosis obtenidas con dosis de referencia.

Esto debe hacerse para cada contaminante y para cada vía. En nuestro caso solo tomaremos en cuenta dos vías y realizaremos la evaluación para un solo contaminante, en este caso el que resulto tener una concentración mayor en la caracterización de la fuente, el arsénico. Por otra parte los efectos tóxicos deben evaluarse por separado de los efectos crónicos o cancerígenos, el arsénico presenta ambos tipos de efectos. De la misma forma los cálculos deben hacerse tomando en cuenta si los receptores corresponden a adultos o niños, ya que eso modificara las tasas de ingestión.

1.7.3.1 Evaluación de la exposición

La exposición será evaluada para las vías ingestión accidental de suelo y absorción dérmica.

1.7.3.1.1 Ingestión accidental de suelo

Las siguientes tabla y ecuación corresponden a las variables consideradas para el cálculo de la ingesta accidental de suelo y la manera en que estas se combinan para obtener una dosis.

$$Dosis_{ingestión} = \frac{C_{suelo} \times EF \times FI \times ED \times IR \times CF_1}{BW \times AT \times CF_2} \quad ec.2$$

Tabla 8. Parámetros utilizados en el cálculo de la dosis por ingestión accidental de suelo.

PARÁMETRO	UNIDAD	RESIDENCIAL
Concentración en suelo, C_{suelo}	mg/kg	Específico para cada contaminante
Factor conversión CF_1	kg/mg	1,00E-06
Frecuencia exposición, EF	días/año	350 (U.S. EPA, 1989a)
Fracción de ingestión de la fuente contaminada, FI	Adimensional	Sitio específico; en ausencia de info emplear FI=1
Duración de exposición, ED	años	24 (adulto) 6 (niño) (U.S. EPA, 1989a)
Tasa de ingesta suelo, IR	mg/día	100 (adulto) 200 (niño) (U.S. EPA, 1991b)
Peso corporal, BW	kg	70 (adulto) 15 (niño) (U.S. EPA, 1991b)
Factor de conversión CF_2	días/año	365
Periodo vital, LT	años	70 (U.S. EPA, 1989a)
Tiempo Promediación, AT	años	LT (cancerígeno) ED (no cancerígeno)

(USEPA 1997)

1.7.3.1.2 Contacto dérmico

Las siguientes tabla y ecuación corresponden a las variables consideradas para el cálculo de contacto dérmico y la manera en que estas se combinan para obtener una dosis.

$$Dosis_{d\acute{e}rmica} = \frac{C_{suelo} \times CF_4 \times SA \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT \times CF_2} \quad ec.3$$

Tabla 9 Parámetros utilizados en el cálculo de la dosis por ingestión accidental de suelo.

PARAMETRO	UNIDAD	RESIDENCIAL
Concentración en suelo, C_{suelo}	mg/kg	Específico para cada contaminante
Factor de conversión, CF_4	$(\text{kg}\cdot\text{cm}^2)/(\text{mg}\cdot\text{m}^2)$	0,01
Superficie expuesta de piel, SA	$\text{m}^2/\text{día}$	0,53 Manos, antebrazos, cabeza, piernas (U.S. EPA, 1992)
Factor de adherencia de la tierra (suelo) a la piel, AF	mg/cm^2	1 (U.S. EPA, 1992)
Factor de absorción dérmica, ABS	adimensional	0,03 (arsénico)
Frecuencia de exposición, EF	días/año	350 (U.S. EPA, 1991a)
Duración de la exposición, ED	años	30 (U.S. EPA, 1989a)
Peso corporal, BW	kg	70 (adulto) (U.S. EPA, 1991a)
Factor de conversión, CF_2	días/año	365
Periodo vital, LT	años	70 (U.S. EPA, 1989a)
Tiempo de Promediación, AT	años	LT (cancerígeno) ED (no cancerígeno)

(USEPA 1997)

1.7.3.2 Caracterización del Riesgo

Este proceso se realiza por separado para efectos cancerígenos y efectos tóxicos. En este proceso, por medio de la comparación con valores toxicológicos de referencia se obtiene una probabilidad indicativa del riesgo que presenta el sitio. Las dosis de referencia y factores de pendiente específicos para cada contaminante y ruta se encuentran en la literatura y son determinados experimentalmente a partir de indicadores como; NOAEL (nivel sin observación de efectos adversos por sus iniciales en inglés), LOAEL (nivel menor con observación de efectos adversos por sus siglas en inglés) y curvas Dosis-Respuesta. En este caso los valores de referencia fueron obtenidos del Integrated Risk Information System (IRIS por sus siglas en inglés), el cual tiene estos valores publicados en internet (<http://www.epa.gov/IRIS/>). Los valores utilizados para el arsénico se señalan a continuación.

Tabla 10 Valores toxicológicos de referencia para el arsénico.

Efectos no cancerígenos	
Dosis de referencia oral	3,0E-04mg/Kg/día
Efectos cancerígenos	
Factor de pendiente oral	1,5E+00(mg/Kg/día) ⁻¹

(IRIS 2011)

Se toma como referencia para la vía de exposición dérmica el valor oral, la diferencia se hace en el cálculo de la dosis, en donde se aplica un factor de corrección por absorción específica para el contaminante.

1.7.3.2.1 Efectos no cancerígenos

Para obtener el riesgo, se calcula un cociente de peligro (CP), el cual se obtiene por la división entre la dosis obtenida en la evaluación de la exposición, y la dosis de referencia (ecuación 4), RfD por su sigla en inglés (ecuación 4). Por lo tanto, si el CP es menor que uno, el peligro es aceptable, si el CP es mayor que uno, el peligro se encontrara fuera de lo aceptable. Es decir, mientras mayor sea la dosis calculada en la evaluación de la exposición, más inaceptable será el riesgo, sin embargo, esto es hasta ciertas concentraciones, ya que la curva dosis vs efecto y la dosis letal siguen un comportamiento asintótico (Figura 8).

$$CP = \frac{Dosis}{RfD}$$

ec.4

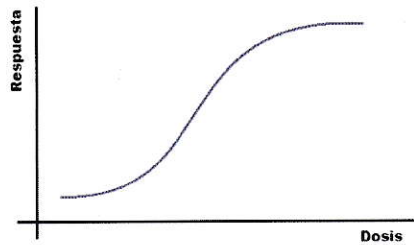


Figura 8. Curva dosis vs respuesta. (Page 2008)

Este cálculo se realiza para cada ruta y para cada contaminante, luego por sumatoria se obtiene el riesgo total para efectos no cancerígenos.

$$CP_T = CP_{AX} + CP_{BY} + \dots$$

ec.5

Donde:

CP_T = Cociente de peligro total

CP_{AX} = Cociente de peligro contaminante A ruta X

CP_{BY} = Cociente de peligro contaminante B ruta Y

Etc...

1.7.3.2.2 Efectos cancerígenos

En cálculo del riesgo para efectos cancerígenos se obtiene el CP como la probabilidad extra de sufrir un cáncer producto de la exposición al contaminante o fuente. Para esto se multiplica la Dosis calculada en la evaluación de la exposición por la probabilidad específica para el contaminante de obtener cáncer por unidad de dosis, la cual se expresa como un factor de pendiente (FP).

$$CP = Dosis \times FP$$

ec.6

Este cálculo se realiza para cada ruta y para cada contaminante, luego por sumatoria se obtiene el riesgo total para efectos no cancerígenos.

$$CP_T = CP_{AX} + CP_{BY} + \dots$$

ec.7

Donde:

CP_T = Cociente de peligro total

CP_{AX} = Cociente de peligro contaminante A ruta X

CP_{BY} = Cociente de peligro contaminante B ruta Y

Etc...

1.7.3.3 Tolerancia

La tolerancia que se tendrá sobre los CP definirá sobre qué valor estos serán considerados como indicadores de un riesgo inaceptable y cuando no. Para el caso de los efectos no cancerígenos se tendrá como límite de tolerancia el valor uno, es decir, CP's iguales o mayores que uno serán considerados como inaceptables, mientras que valores menores que 1 serán considerados aceptables.

Para el caso de los efectos cancerígenos, valores de CP mayores que 10^{-4} serán considerados como inaceptables, esto basado en que las legislaciones internacionales en general consideran valores de 10^{-6} , 10^{-5} y 10^{-4} (Rhim & Anacona, 2004), en nuestro caso, dados los resultados que esperamos, utilizaremos el factor más permisivo.

1.8 De la toma de muestras

El muestreo realizado en este estudio para llevar a cabo la Investigación Confirmatoria, se realizó durante la semana del 7 de Noviembre del 2011 y fue realizado según la norma ASTM correspondiente (ASTM D 4687-95: Standard Guide for General Planning of Waste Sampling)

Personal en terreno: El muestreo fue realizado por personal del Laboratorio de Química Ambiental de CENMA Las vistas a relaves, pozos y cursos de aguas superficiales, fueron realizadas en conjunto con personal de la correspondiente SEREMI MA de la Región de Atacama.

Toma de muestras y preservación: Las muestras de suelo fueron tomadas del nivel superficial entre 10 - 30 cm de profundidad colectadas con palas plásticas, envasadas en bolsas plásticas tipo Ziploc y transportadas en recipiente adiabático (cooler). Las muestras de aguas fueron colectadas directamente en los frascos de HDPE de 1L (previamente ambientados), a las cuales se les midió *in situ* pH, conductividad eléctrica y temperatura, luego fueron preservadas con ácido nítrico concentrado (HNO₃), hasta obtener un pH = 2. Una vez en los frascos, fueron debidamente etiquetadas y rotuladas.

1.9 Métodos analíticos

Las muestras colectadas pueden clasificarse en muestras sólidas y muestras líquidas, los analitos a determinar tanto en muestras líquidas como en sólidos fueron mercurio, arsénico y plomo. El primero fue analizado por absorción atómica y fluorescencia de

rayos X (FRX), mientras que arsénico y plomo fueron analizados por ICP-OES. Para el caso de las muestra líquidas también fueron medidos en terreno los parámetros de rutina conductividad eléctrica, temperatura y pH

1.9.1 Plasma acoplado inductivamente - óptico

La determinación de arsénico y plomo se realizó por análisis en equipo ICP-OES según método USEPA, SW 846. Method 6010 C

El mismo consiste en la digestión ácida asistida por microondas de una porción adecuada de las muestras sólidas homogenizadas y sin humedad (0,30g aprox.), la solución resultante se filtra y completa a un volumen de 25mL con ácido nítrico diluido, manteniendo pH ácido que mantiene los metales en fase disuelta. Esta solución es aspirada en un espectrómetro de plasma inductivamente acoplado Perkin Elmer modelo Optima 3300 XL, que permite registrar las intensidades de emisión a diferentes longitudes de onda y cuantificar los elementos de interés mediante interpolación en sus respectivas curvas de calibración. Este procedimiento permite determinar los contenidos totales de metales en muestras sólidas y líquidas.

1.9.2 Espectroscopia de Absorción atómica

1.9.2.1 Espectroscopia de absorción atómica – técnica Mercuriometro.

En el caso de las muestras solidas el mercurio fue determinado por absorción atómica en mercuriometro. La técnica se basa en la liberación del mercurio desde la muestra sólida

a través del secado y descomposición térmica de la misma en un horno catalítico que asegura la eliminación de interferentes presentes en la muestra y otros componentes de la matriz sólida. Posterior a la vaporización del mercurio elemental, el mismo es disuelto en un amalgamador que contiene oro y liberado nuevamente por calentamiento a mayor temperatura. Finalmente, el mercurio elemental es arrastrado con un gas portador (oxígeno) hasta el paso óptico de una celda espectrofotométrica (Absorción Atómica) en la cual se mide la absorbancia a 253,7nm. Se utiliza un equipo Milestone, modelo DMA-80, según el principio descrito en la metodología EPA 7473. Una de las dificultades que presento este equipo, fue con muestras con alto contenido de mercurio, las cuales quedaban fuera de la curva de calibración del equipo. Como en este equipo la muestra se ingresa sólida, no existe posibilidad de diluir, solo de ingresar menos masa. Sin embargo, bajo cierta masa el equipo pierde su precisión. Por este motivo las muestras sobre el límite de detección superior del equipo se analizaron por FRX.

1.9.2.2 Espectroscopia de absorción atómica, técnica vapor frío

La determinación de mercurio en muestras líquidas se realizó según el procedimiento ILMAL-018 del Laboratorio de Química Ambiental de CENMA. El mismo consiste en la digestión de una porción de muestra en medio ácido en presencia de oxidantes, para asegurar una completa liberación de mercurio presente en la muestra líquida previamente homogenizada (100 mL).

La muestra digerida reacciona con una solución de borohidruro de sodio, en medio ácido, lo que permite la reducción del mercurio desde la solución hasta mercurio elemental en fase de vapor, que es arrastrado con un gas portador neutro (nitrógeno)

hacia el paso óptico de una celda espectrofotométrica. Se mide la absorbancia a 253,7 nm y a partir de una curva de calibración se determina la concentración de mercurio en la muestra utilizando para ello un equipo Perkin Elmer modelo AAnalyst 700. Este procedimiento está basado en la metodología EPA 7470.

1.9.3 Fluorescencia de rayos X (FRX)

Esta técnica de análisis no destructiva, permite cuantificar elementos al detectar las emisiones de elementos en las muestras que presentan excitación inducida por el bombardeo con Rayos-X de alta energía. Una vez que el detector recibe las señales respectivas de longitud de onda específica para cada elemento, es capaz de cuantificarlo a través de un software incorporado en el equipo de medición.

Se utiliza un equipo Bruker S1 Turbo SD LE (software en modo GeoChem Trace Analysis). Las mediciones se realizaron de acuerdo a la metodología de medición US-EPA 6200, con lecturas en septuplicado de cada una de las muestras previamente secadas y homogeneizadas. Se informa el promedio de las siete mediciones. Se recalca que por esta técnica se analizaron las muestras solidas que se encontraban sobre el límite de detección superior por la técnica de absorción atómica en mercuriometro.

1.9.4 Determinación de pH, conductividad eléctrica y temperatura.

Al momento de tomar las muestras de aguas se realizó *in situ* el análisis de pH, conductividad eléctrica y temperatura. Esto se realizó utilizando un equipo portátil

HACH SensION, con sonda de pH conductividad y temperatura. Durante el muestreo el equipo fue calibrado al comienzo de cada día con las soluciones patrón de pH y conductividad eléctrica distribuidas por el proveedor. Corroborando el comportamiento del equipo tanto en el pH como en la conductividad. Posterior a este análisis se agregaron los conservantes pertinentes.

1.10 Objetivos

1.10.1 Objetivo General

Efectuar una evaluación de Riesgo a la Salud como herramienta de apoyo a la gestión pública de los asentamientos humanos de Tierra Amarilla próximos a sitios de minería metálica, histórica y actual, con potencial presencia de contaminantes.

1.10.2 Objetivos Específicos

- Estudiar y seleccionar una metodología de evaluación de riesgos a la salud.
- Realizar muestreos que permitan determinar la cantidad, el tipo y la magnitud de los contaminantes en los sitios en cuestión.
- Implementación de la metodología seleccionada en sitios potencialmente contaminados en la Comuna Tierra Amarilla.
- Determinar el riesgo asociado en base a las etapas Preliminar y confirmatoria de la evaluación de riesgos.

II RESULTADOS

2.1 Investigación preliminar

2.1.1 Antecedentes de la comuna de Tierra Amarilla

2.1.1.1 Demográficos y económicos

La Comuna de Tierra Amarilla se encuentra en la provincia de Copiapó, la cual se ubica al centro de la región de Atacama. La comuna se ha desarrollado principalmente en base a la actividad minera, así como también la agricultura a los costados del río Copiapó, siendo estas zonas de los principales exportadores de uva del país. Sus principales características demográficas y económicas se presentan en la tabla a continuación:

Tabla 11. Antecedentes demográficos y económicos de la comuna de Tierra Amarilla.

Indicador	Tierra Amarilla
Población	12.888 habitantes
Población entre 0 a 11 años	24,7
Población mayor a 60 años	8,22
Cobertura de agua potable	66,8%
Hogares en situación de indigencia	1%
Hogares en situación de pobreza	8,7%
Vivienda tipo precaria	5,9%
Personas empleadas según rubro minería	16,4
Personas empleadas según rubro agricultura	41%
Personas empleadas según rubro construcción	4,2%
Personas empleadas según rubro comercio y hotelería	15,3%

(Fuente: Observatorio urbano, MINVU 2011)

Como se puede apreciar, la agricultura, la minería y el comercio son las principales actividades económicas de la comuna en estudio. Es por esta razón que las problemáticas relacionadas a residuos mineros es un tema de constante preocupación, dado que los relaves depositados en la zona podrían provocar contaminación de aguas y suelos y de este modo influir también en productos agrícolas, lo que potencialmente afectaría una de las actividades económicas más importantes (la agricultura), que incluso abarca cerca de un 40% de la fuerza de trabajo de la comuna de Tierra Amarilla.

Por otra parte, en la comuna de Tierra Amarilla los niños y adultos mayores alcanzan a cubrir cerca de un 33% de la población, lo que indica que cerca de un tercio de los habitantes de la comuna corresponden a los grupos etarios más vulnerables en cuanto a la salud.

Finalmente, el índice de cobertura del servicio de agua potable en Tierra Amarilla indica que cerca de un tercio de la población no cuenta con dicho servicio, por lo que esta sección de la población está consumiendo agua de cauces superficiales y pozos carentes de fiscalización, la cual podría estar contaminada con sustancias provenientes de los relaves.

2.1.1.2 Climatológicos

La región de atacama presenta clima desértico, sin embargo, debido a la influencia costera y las diferencias de altura, se pueden distinguir 3 condiciones distintas:

- a. Clima desértico con nublados abundantes
- b. Clima desértico marginal bajo
- c. Clima desértico marginal de altura

En el caso de la zona en estudio se presenta principalmente un clima desértico marginal bajo, con algunas influencias de la costa, aportando humedad pero no nubosidad, disminuyendo las condiciones desérticas. La amplitud térmica anual es mucho mayor que en el litoral. La diferencia entre el mes más cálido y el más frío es de 7° a 8° C en Copiapó. Mucho mayor es la amplitud térmica diaria que alcanza del orden de 13° a 15° C. Las zonas con este clima se ubican bajo el nivel de la inversión de temperatura, con temperaturas moderadas y humedad suficiente para permitir la generación de algún tipo de vegetación de estepa en los sectores bajos. Las precipitaciones aumentan con la latitud y con la altura, concentrándose en los meses de invierno. Los totales anuales llegan a 12 mm en Copiapó (Enciclopedia de la Flora Chilena, 2010).

2.1.1.3 Geomorfológicos

La morfología de la Región Atacama depende principalmente de los factores climáticos, geológicos y tectónicos. En la región se aprecia especialmente la presencia de:

1. Cuencas cerradas - sectores sin afluente natural
2. Extensas llanuras de escombros y detritus.
3. Ríos de poca madurez con una inclinación extrema
4. Alturas extremas

5. morfologías "suaves" los cerros están "hundidos" en escombros
6. la mayoría de los valles son "quebradas" es decir sin afluentes permanentemente activos
7. Morfología correspondiente a la actividad volcánica

La zona de estudio corresponde a una zona vegetal desértica, más específicamente a la subregión del desierto florido. Esta sub-región se extiende desde el norte de la Serena hasta el valle del Río Copiapó (III y IV región). Recibe precipitaciones en forma periódica las que permiten el desarrollo de plantas efímeras que florecen sólo aquellos años que las condiciones de humedad lo permiten. (Enciclopedia de la Flora Chilena, 2010)

2.1.1.4 Hidrografía

Las precipitaciones y la presencia de nieves en las altas cumbres permiten el desarrollo de cursos de agua, cuyo régimen de alimentación es pluvionival. Esto condiciona el escurrimiento de agua durante todo el año. El río Copiapó posee una hoya hidrográfica de 18.400 kilómetros cuadrados y una longitud de 162 kilómetros. Nace de la unión de los tributarios Jorquera, Pulido y Manflas. La presencia de terrazas fluviales y sectores de vega con abundante humedad permiten que el río Copiapó sea intensamente utilizado en faenas agrícolas. Sin embargo, el excesivo uso del agua de dicho cauce, por minería y agricultura, provocan su total desaparición más allá de Tierra Amarilla.

En cuanto a los acuíferos, destacan claramente dos tipos de escurrimientos: uno en dirección SSW que corre paralelo a la quebrada de Paipote por un lecho de rocas de muy baja permeabilidad hasta su confluencia con el río Copiapó.

El otro acuífero se origina de la confluencia de las aguas subterráneas desde los ríos Manflas a Jorquera que se unen en el sector de Embalse Lautaro. A partir del sector Embalse Lautaro, escurre paralelo al río Copiapó en dirección NNW hasta la altura de Copiapó con profundidades freáticas que varían de los 53 a 11 m (Copiapó). Esta zona se destaca por tener un intenso uso para riego. (DGA, 2004)

2.1.1.5 Edafológicos

Los suelos del valle de la cuenca corresponden a sedimentos fluviales actuales que podrían ser materiales antiguos retrabajados, este tipo de depositación ha sido influenciado por los aportes de sedimentos de quebradas que desembocan en el valle, el que presenta dos fases diferentes de evolución. En el curso superior y medio se observan formas juveniles, de paredes abruptas y sin meandros y en el curso inferior se presenta una etapa de mayor avance en el desarrollo, las pendientes de las paredes son menos escarpadas y el fondo del valle es plano – penillanura. En el curso superior y medio predominan los materiales gruesos y sólo localmente hay depositación de elementos finos producto de condiciones lacustrinas o pantanosas originadas por sedimentos de las quebradas que obstruyeron parcialmente el río. (DGA 2004)

2.1.1.6 Geológicos

A grandes rasgos en el sector las rocas magmáticas y sedimentarias clásticas muestran una fuerte predominancia. Rocas metamórficas solo afloran en algunas áreas determinadas quedando hundidas en rocas sedimentarias y magmáticas. (DGA 2004). Por otra parte cabe destacar que debido a la baja meteorización de los suelos del norte de Chile, las sales más solubles se encuentran disponibles para ser solubilizadas por las aguas superficiales, sumándose a esto el escaso contenido de materia orgánica (agente complejante en los suelos) que estos poseen, sumado a la poca vegetación que crece sobre estos, aumenta esta disolución.

2.1.1.7 Calidad de las aguas

Las aguas superficiales y subterráneas, según estudio de DGA “Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua Según Objetivos de Calidad, Cuenca Río Copiapó”, presentarían una calidad natural buena, teniendo altas concentraciones de algunos metales debido a la geología del lugar. Sin embargo, se presenta una mala calidad del agua posterior a la ciudad de Copiapó debido a los aportes de metales atribuidos a la actividad minera y al aumento de la lixiviación de las sales de los suelos debido a la tala del matorral, lo cual deja los suelos desnudos.

Por otra parte el río Copiapó en eventos aislados presenta crecidas importantes, lo que podría provocar el arrastre de parte de los relaves que se encuentran en la ribera del mismo, generando gran inclusión de material al cauce y al sedimento depositado en el

lecho del río. Exceptuando estos eventos de crecidas puntuales por eventos pluviales, el río Copiapó se encuentra seco a la altura de tierra Amarilla.

En lo que respecta al agua de consumo humano, hay constantes reclamos por parte de la población respecto a la calidad del agua potable entregada por Aguas Chañar, debido a que generalmente presenta problemas con los sulfatos y sólidos totales disueltos.

Finalmente no se cuenta con información del agua consumida por la parte de la población que no cuenta con servicio de agua potable, la cual sería en su mayoría extraída de pozos. (DGA 2004)

2.1.2 Identificación de elementos potenciales del riesgo

Para todos los casos evaluados en el presente estudio, la **fente primaria de contaminación está constituida por depósitos de minería del tipo relaves y un escorial (de fundición)**, en todos los casos en calidad de abandono (inactivos). Los relaves estudiados presentan estructuras similares, no encontrándose en estos alturas de más de 1 m o 1,5 m sobre el nivel del suelo. Se pueden ver imágenes de cada sitio más adelante.

Estos relaves están sometidos a mecanismos físicos que podrán eventualmente causar descargas de contaminantes hacia otros compartimentos ambientales. Dichos procesos físicos dan paso a fuentes secundarias de contaminación, las cuales constituyen a su vez rutas que favorecen la migración de los contaminantes hacia los receptores. En el

estudio, fue posible establecer que las principales potenciales fuentes secundarias de contaminación son:

- ◇ Resuspensión de material particulado por la erosión del viento.
- ◇ Posible volatilización de mercurio, en los casos en que este ha sido utilizado para el procesamiento de oro.
- ◇ Lixiviación y disolución de contaminantes hacia napas subterráneas (contaminando aguas de pozo que se utilizan para abastecimiento de agua).
- ◇ Contaminación de aguas superficiales por aportes de material particulado o por crecidas del río que movilicen parte del relave.
- ◇ Contaminación de frutas, hortalizas y/o ganado que se encuentren en zonas aledañas al sector en estudio, posiblemente afectados por los fenómenos antes mencionados (aguas contaminadas, depositación de material particulado, otros) en los sitios que presentan actividad agrícola en las cercanías.

Estos mecanismos de transporte en su conjunto propiciarán la exposición de los receptores a través de las rutas que permiten el ingreso de los contaminantes hacia los organismos, por la vía oral, por contacto dérmico o las vías respiratorias. La exposición podrá haber ocurrido durante periodos de tiempo ya pasados, en el presente o proyectarse hacia un periodo a largo plazo en el futuro. En el sector en estudio se identifica que los receptores, según sea el caso, estarán compuestos de residentes adultos y niños y trabajadores en el sitio.

Habiendo identificado para cada sitio en particular los componentes antes explicados que afectan el medio ambiente, se elaboraron modelos conceptuales que los describen. Dichos modelos conceptuales se presentan en las secciones a continuación.

2.1.3 Investigación preliminar de cada sitio en estudio

Los resultados que se presentan a continuación son producto de la recopilación de antecedentes disponibles para los sitios en evaluación. En ellos se presentan datos generales, una descripción del tipo de procesamiento de minerales realizado en los sitios y finalmente modelos conceptuales para los sitios.

2.1.3.1 Escorial Nantoco

Tabla 12. Información correspondiente al sitio Escorial Nantoco.

Sitio		Escorial Nantoco
Georreferencia (UTM/WGS84)		374601 m E / 6952989 m S (Zona 19J)
Dueño actual		Sin Información
Dirección		Ruta C-35 s/n (Cercano a cruce con Ruta C-411)
Límites	Este	Sitio de uso agrícola
	Oeste	Ruta C-35
	Norte	Villa Nantoco / Escuela rural G44 Paul Harris
	Sur	Parcela N° 9 Nantoco (uso agrícola)
Acceso		Libre
Usos terrenos vecinos		Residencial /Agrícola
Procesamiento		Procesamiento de mineral de cobre
Origen de materia primas procesadas		Minerales provenientes de diferentes zonas regionales
N° de trabajadores		Actualmente se encuentra en abandono
Fecha actividad		Sin Información
Población aledaña		Villa Nantoco
N° de habitantes		Sin Información
Suelo		Depósitos aluviales (permeables)
Escorial		1 Escorial
Estado		Abandonado
		Es estable dadas sus características fisicoquímicas y la altura del deposito
Área aprox.		2,6 ha
Cursos de Agua		Si

Los materiales depositados en este sitio, corresponden a escorias generadas por la fundición de minerales de cobre. Según consulta local, los escoriales de Nantoco, ya estaban en este lugar desde mediados del siglo XX.

Las escorias de fundición son materiales vítreos, de alta estabilidad química, poco lixiviables. Es por ello que, bajo las condiciones climáticas de la región, se deben considerar estos residuos como estables.

En la Villa Nantoco el agua potable proviene de pozo, mientras que el agua para el riego por goteo de las viñas vecinas proviene del canal de regadío (aguas superficiales de la cuenca que son de caudal controlado por el embalse del río)

No hay crecimiento de vegetación sobre las escorias, pero en los alrededores es abundante, principalmente asociado a los canales de regadío.

Sobre el escorial hay una vivienda precaria. Además, han sido depositados una gran cantidad de desechos domiciliarios, convirtiendo el lugar en un potencial vertedero ilegal, lo cual significa riesgos adicionales como atracción de vectores y con ellos enfermedades, además de malos olores y aumento de la lixiviación de los metales.

Los pobladores de la zona manifiestan su interés en utilizar el predio para la construcción de soluciones habitacionales para un parte de la población que aun vive en tomas de terreno a quienes no se les asignó vivienda en la Villa Nantoco, cuando esta última fue construida.

Según pobladores de la Villa Nantoco, los terrenos pertenecerían a Minera Candelaria.



Figura 9. Toma de muestras en Escorial Nantoco. Se observa la presencia de materiales sólidos de diferentes características como también la cercanía a la villa Nantoco. En el sector sur del Escorial, se encuentran predios agrícolas.

Dados los antecedentes expuestos, se considera un modelo conceptual inicial que describe la situación del relave, graficado a continuación. La posibilidad de lixiviación a napas subterráneas es baja, dadas las características fisicoquímicas típicas de este tipo de estructuras sólidas, pero será considerada en el modelo conceptual hasta corroborar esta condición con resultados analíticos. Se debe tener presente que este modelo conceptual está sujeto a actualizaciones y modificaciones, dado que a medida que se recopila una mayor cantidad de información (especialmente obteniendo datos de muestras), es posible una mayor comprensión del sistema en estudio. A su vez, el receptor **Población** incluiría: Residentes tanto adultos como niños en las viviendas cercanas.

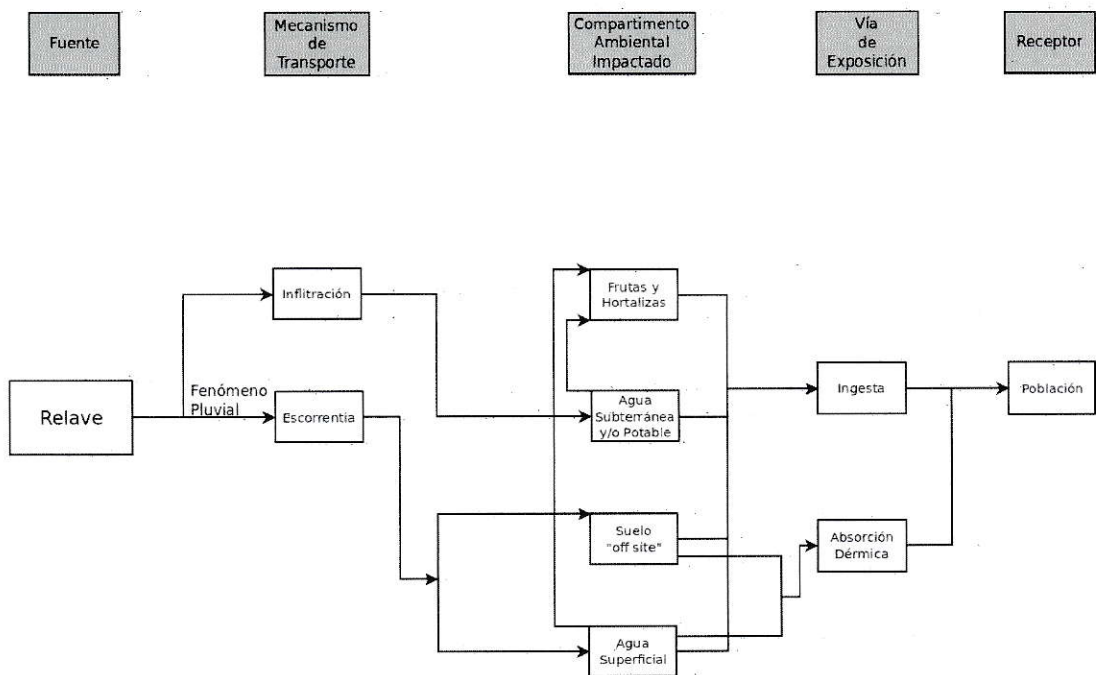


Figura 10. Modelo conceptual donde se describen las principales rutas de distribución de posibles contaminantes presentes en Escorial Nantoco. Población expuesta: residentes adultos y niños.

2.1.3.2 Totoralillo

Tabla 13. Información correspondiente al sitio Totoralillo.

Sitio		Relave Totoralillo
Georreferencia (UTM/WGS84)		379737 m E / 6946442 m S (Zona 19J)
Dueño actual		Sin Información
Dirección		Ruta C-35 s/n Sector Totoralillo
Límites	Este	Cerros Pampa Larga
	Oeste	Sectores agrícolas (viñedos)
	Norte	Sectores agrícolas (viñedos)
	Sur	Sectores agrícolas (viñedos)
Acceso		Parcialmente Restringido (cercado)
Usos terrenos vecinos		Residencial /Agrícola
Procesamiento		Procesamiento de mineral de oro y plata
Origen de materia primas procesadas		Minerales provenientes de Chañarcillo y mina Elisa
N° de trabajadores		Actualmente se encuentra en abandono
Fecha actividad		Sin información
Población aledaña		No hay presencia de poblaciones, solo caseríos
N° de habitantes		Sin información
Suelo		Depósitos aluviales (permeables)
Relave		1 Relave
Estado		Inactivo
		Estructuralmente estable, aunque poco consolidado
Área aprox.		7,5 ha
Cursos de Agua		Canal de regadío

Durante el periodo de operación de la planta que generó los relaves de este sitio, se utilizó la técnica de amalgamación con mercurio para el procesamiento de los minerales de oro y plata (mineral de Chañarcillo se caracterizó por su alto contenido de plata). Estos depósitos se originaron durante el siglo XIX y en ellos se depositaron altas concentraciones de mercurio. Es por esto que se debe prestar especial atención a las

concentraciones probables que se encuentren del metal, el cual constituye un elemento de alta toxicidad cuando se presenta en altas concentraciones.

El crecimiento de vegetación es muy bajo, sobre todo si se considera que estos relaves provienen de actividades realizadas durante el siglo XIX.

Está altamente expuesto a la erosión eólica, dado que se encuentra poco consolidado. A su vez, no presenta riesgos estructurales, ya que no se encuentra material acumulado a altura mayor de 1 m. La profundidad que posee el relave no está definida, pero estudios anteriores realizados en el recinto han encontrado altas concentraciones de mercurio a profundidades de cerca de 2 m.

En el recinto se practica el secado de frutos en plásticos (uvas para producción de pasas), dispuestos sobre el relave, lo cual es de especial importancia, ya que:

- El mercurio es un metal que posee una presión de vapor tal que lo hace altamente volátil
- El material particulado del relave, que a su vez contiene mercurio inorgánico (en general de tamaños cercanos a los 75 micrones) está permanentemente siendo resuspendido

Ambos factores que podrían provocar contaminación en los frutos que se secan sobre el relave.

Es un sector de caseríos, donde la mayor actividad es para producción de frutos en especial parronales. El uso de aguas está ligado al canal de regadío que atraviesa los predios y también hay pozos los cuales hasta hace poco estuvieron secos a los 70 m, lo que obligó a la frutícola a aumentar la profundidd hasta laos 180 m. donde el nivel freático abastece de agua subterránea hasta el presente.

El propietario del lugar donde se encuentran los relaves riega sus hortalizas con el agua del canal y además tiene algunos animales como gallinas, ovejas y caballos.

Existió un proyecto denominado “Procesamiento de Minerales y Relaves para la Extracción y Recuperación de Oro, Plata y Cobre”, elaborada por CCM Pabellón, quienes presentaron una Declaración de Impacto Ambiental que fue aprobada en el año 2000, que pretendía extraer los relaves de la zona de Pabellón y Totoralillo y reprocesarlos en la Planta Farah, que se encontraba en ese tiempo operativa. Por razones que se desconocen, este proyecto no se concretó, ya que los relaves están aun prácticamente intactos en el lugar (en Totoralillo se alcanzó a extraer algunas cargas de material, pero la labor fue abandonada).

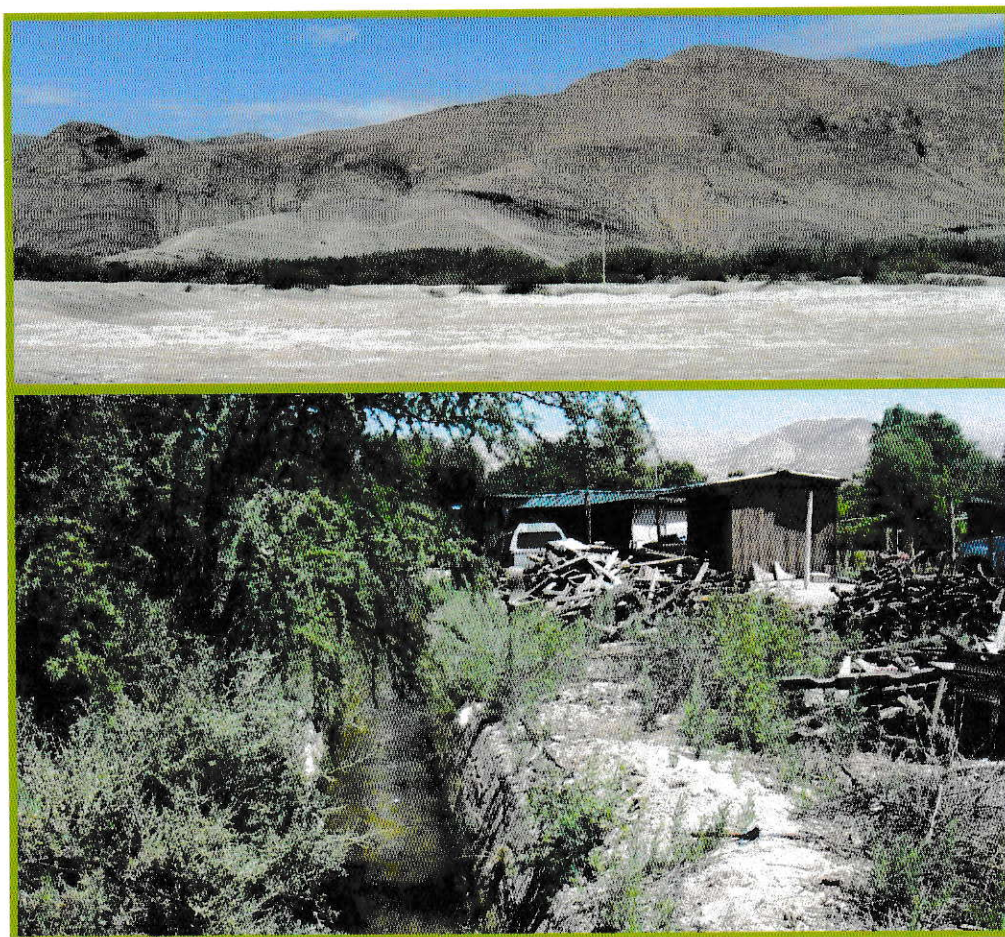


Figura 11. Arriba: vista de una fracción de relave Totoralillo. Abajo: canal de regadío y vivienda aleña al relave

Dados los antecedentes expuestos, se considera un modelo conceptual inicial. Receptor **Población** incluiría: Trabajadores fuera del sitio, residentes adultos y niños.

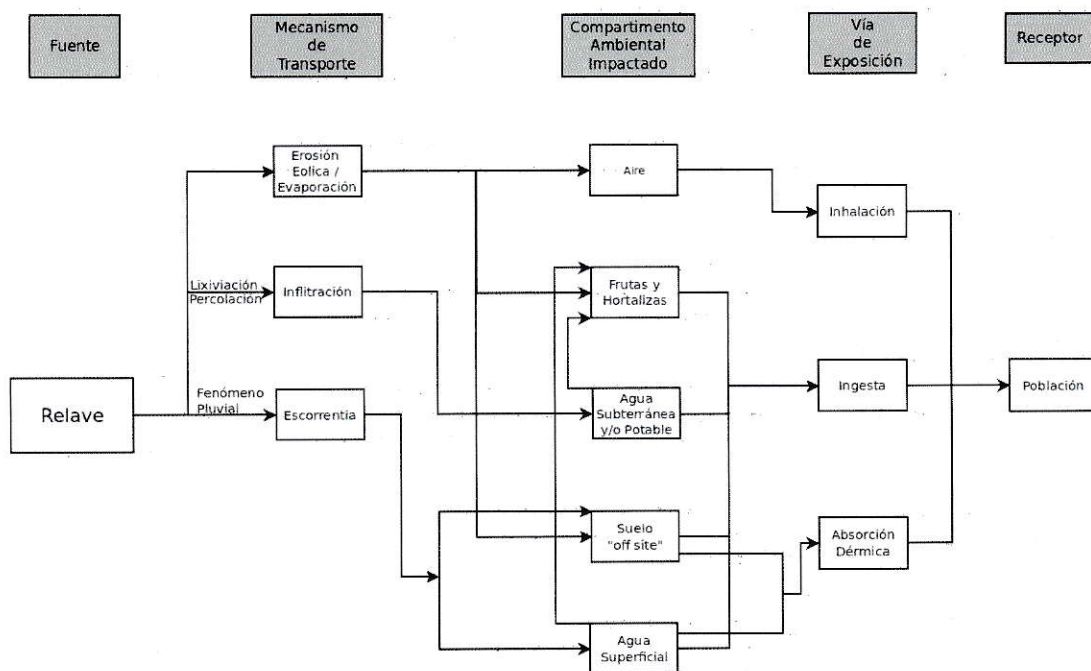


Figura 12. Modelo conceptual donde se describen las principales rutas de distribución de posibles contaminantes presentes en relave Totoralillo. Población expuesta: Residentes adultos y niños. Trabajadores fuera del sitio

2.1.3.4 Amolonas

Tabla 14. Información correspondiente al sitio Amolonas

Sitio		Relave Amolonas
Georreferencia (UTM/WGS84)		400216 m E / 6901669 m S (Zona 19J)
Dueño actual		Minera Collancura
Dirección		
Límites	Este	Cerros Pampa Larga
	Oeste	Sectores agrícolas (viñedos)
	Norte	Sectores agrícolas (viñedos)
	Sur	Sectores agrícolas (viñedos)
Acceso		Liberado
Usos terrenos vecinos		Agrícola
Procesamiento		Procesamiento de mineral sulfurados de cobre
Origen de materia primas procesadas		
N° de trabajadores		Actualmente se encuentra en abandono
Fecha actividad		Sin información
Población aledaña		Solo caseríos a 3Km aproximadamente
N° de habitantes		Sin información
Suelo		Depósitos aluviales (permeables)
Relave		1 Relave
Estado		Inactivo
		Estructuralmente estable, aunque poco consolidado
Área aprox.		2,5 ha
Cursos de Agua		Canal de regadío

El sitio se encuentra en la parte más alta del río Copiapó. Durante el periodo de operación de la planta Amolonas (ubicada en el mismo sitio) se generó los relaves de este sitio, en la planta se procesaban sulfuros de cobre por flotación, procesamiento que genero estos relaves. El sitio se encontraba activo al menos hasta el año 2000.

Está altamente expuesto a la erosión eólica, dado que se encuentra poco consolidado. A su vez, no presenta riesgos estructurales, ya que no se encuentra material acumulado a altura mayor de 1m. La profundidad que posee el relave no está definida.



Figura 13. Relave sitio Amolanas. Prácticamente todo el relave se encuentra al nivel del suelo, sin embargo su profundidad no se encuentra determinada.

Los sitios aledaños son en su totalidad agrícolas, donde el producto corresponde completamente de viñas. El uso de aguas está ligado al regadío de dichas viñas

A unos 5km del sitio se encuentra el embalse Lautaro, el cual acumula el cauce del río Copiapó, para distribuirlo de manera controlada río abajo. Sin embargo, la

contaminación hacia el embalse podría ser baja debido a que estos se encuentran separados por un cerro de por lo menos 30 metros de altura desde el nivel del suelo.

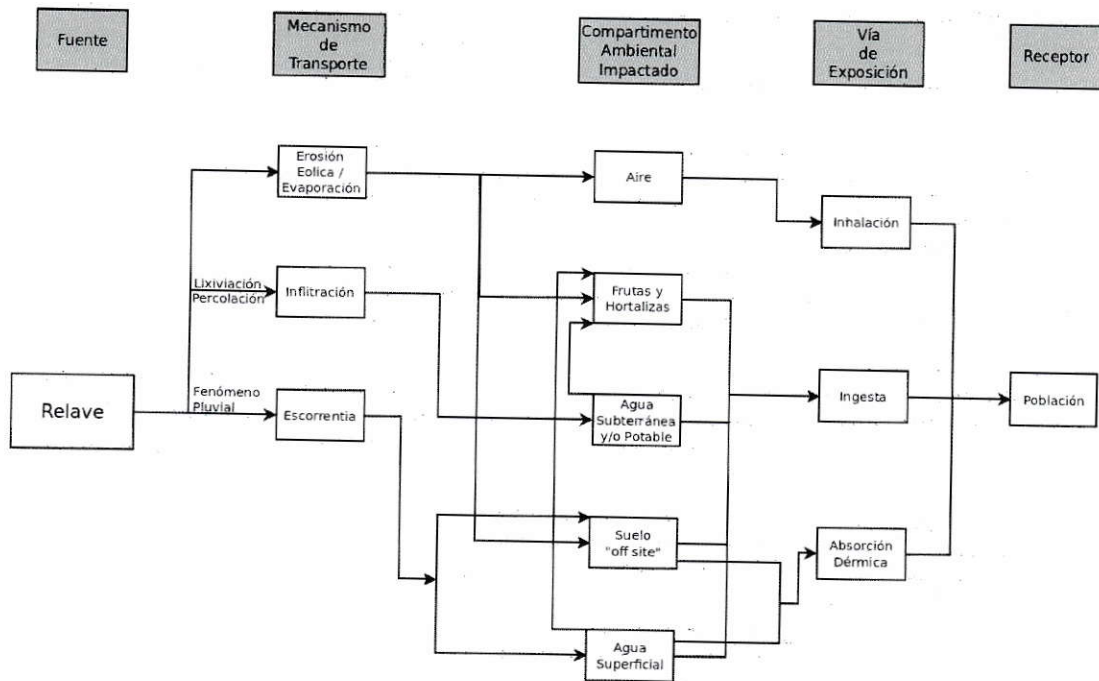


Figura 14. Modelo conceptual donde se describen las principales rutas de distribución de posibles contaminantes presentes en relave Amolanas. Población expuesta: principalmente trabajadores fuera del sitio.

2.1.4 Resultados Analíticos

A continuación se presentan los resultados de los análisis de las muestras sólidas., el fin primero de los datos era dar una idea comparativa de la contaminación, sin entrar en detalle respecto a lo “toxicológicamente” altas o bajas que pudieran ser las concentraciones encontradas. Sin embargo, a modo de comentario preliminar, los resultados obtenidos en la muestra sólida colectada, son por si solo valores extremadamente altos, no requiriendo mayor análisis en esta etapa.

En cuanto a las muestras de aguas, no se encontró ninguno de los tres analitos en cuestión por sobre el límite de detección

Tabla 15. Concentración de metales de metales para muestras sólidas.

Muestra	Hg [mg/Kg]	As [mg/Kg]	Pb [mg/Kg]
	mg/Kg		
Escorial Nantoco	<LD	306,34	951,23
Relave Totalillo	4986	5917,46	1240,55
Tranque Relave Amolanas	<LD	<LD	14,98
LD mg/Kg	13	2,33	0,27

Tabla 16. Resultados obtenidos en cuantificación de metales para muestras líquidas.

Muestra	Hg [µg/L]	As [µg/L]	Pb [µg/L]
	µg/L		
Escorial Nantoco (agua de pozo)	< LD	<LD	<LD
Amolanas (agua de riego)	< LD	<LD	<LD
Totalillo canal	< LD	<LD	<LD
LD µg/L	0,170	6,36	3,93

2.2 Priorización

Luego de aplicar las Fichas del CCME a los sitios estudiados se obtuvieron los puntajes y respectivas clasificaciones presentados en la Tabla 17 (revisar “Summary score sheet” en Anexo I). Según la metodología los sitios que obtuvieron los mayores puntajes son los que presentan una mayor prioridad en cuanto a continuar la evaluación de riesgos hasta una etapa más avanzada, es decir, estos sitios son los que presentarían un mayor riesgo potencial. Además, en el caso de estas fichas, los puntajes se agrupan en rangos que indican la necesidad de continuar con la investigación de la siguiente manera: Clase 1: Prioridad alta para acción; Clase 2: Prioridad media para acción; Clase 3: Prioridad baja para acción; Clase N: Sin prioridad para acción; Clase INS Información insuficiente.

Tabla 17 . Puntajes obtenidos en fichas para evaluación de sitios de CCME.

Sitio	Puntaje	Clasificación
Totalillo	63,2	2
Escorial Nantoco	51,7	2
Planta Amolanas	47,2	3

En base a los resultados de la investigación histórica del sitio, los resultados analíticos y los resultados de las fichas de inspección se elige priorizar el sitio Totalillo para continuar adelante con el proceso de evaluación, pasando a la etapa de investigación confirmatoria.

2.3 Investigación Confirmatoria

Para llevar a cabo la investigación confirmatoria, se elaboraron programas de muestreo y análisis. El muestreo fue realizado la semana del 7 de Noviembre 2011, por personal de CENMA y estuvo presente personal de la SEREMI MA de la Región de Atacama. La identificación de los puntos de muestreo por sitio y sus respectivas georreferencias se presentan en la sección a continuación. Posteriormente se presenta el análisis de los datos de concentraciones de metales obtenidos en las muestras.

2.3.1 Muestreo del sitio Totoralillo

En base a lo indicado en el apartado 2.7.2, se obtuvo un total de 15 puntos de muestreo distribuidos según muestreo alternado. Adicionalmente se tomaron 2 muestras de agua del canal de regadío que cruza por el costado poniente del relave, una muestra de suelo cercana al límite poniente del relave y una muestra de sedimento del canal de regadío que se encuentra en el costado oriente del relave, el cual al momento del muestreo se encontraba encharcado. Es posible visualizar los puntos de muestreo en la Figura 15. Algunos de los puntos no respetan completamente lo indicado por el muestreo alternado, sin embargo, esto se debe a que la situación en terreno no es exactamente idéntica a lo que se observa en la imagen de GoogleEarth, habiendo algunas zonas del relave que han sido desplazadas, o que se encuentran ocupadas por ejemplo por acumulación de materiales (pallets o escombros).

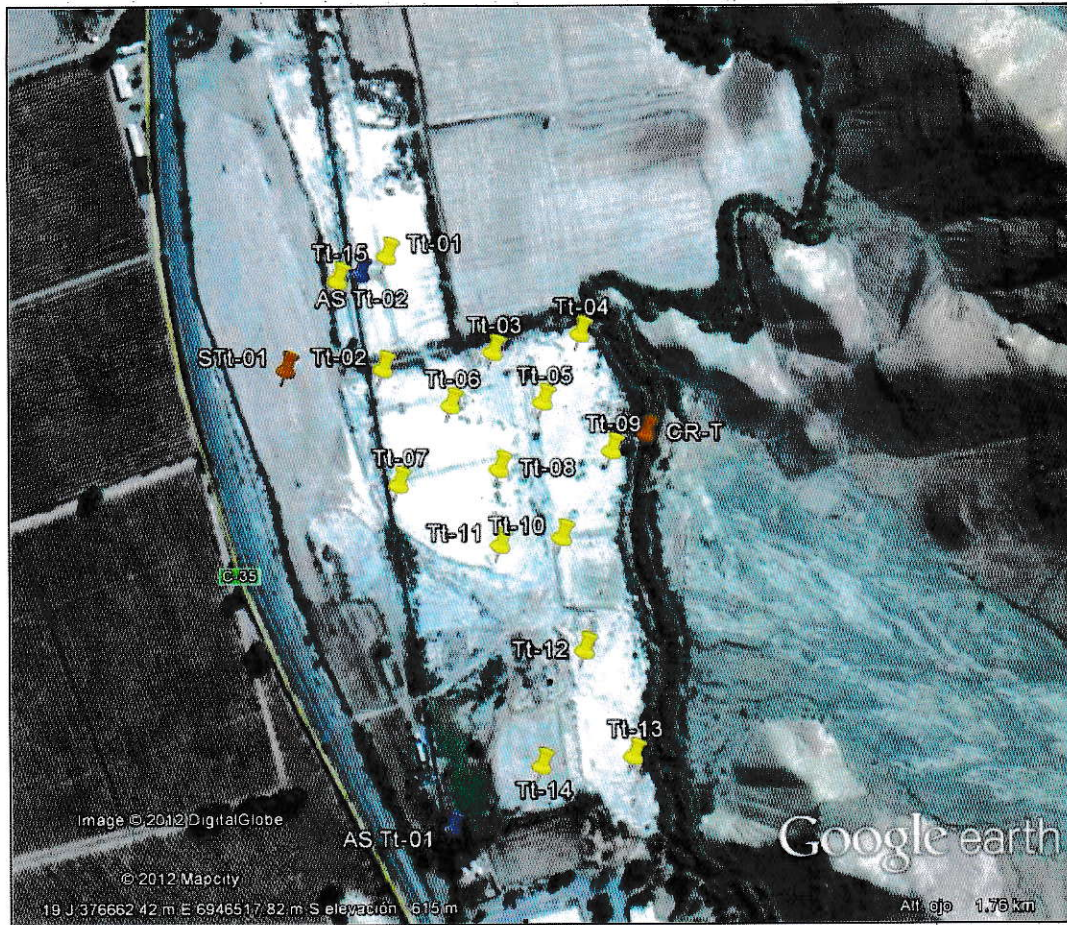


Figura 15. Muestreo sitio Totoralillo. Las marcas en amarillo corresponden a muestras del relave, las marcas en café a muestras de suelo y sedimento del canal de regadío, por último, las marcas en azul corresponden a muestras de agua del canal de regadío.

El detalle de las muestras colectadas se muestra en la tabla 18 a continuación.

Tabla 18. Muestras investigación confirmatoria sitio Totoralillo.

Totoralillo			
Superficie del sitio = 7,5 Ha			
n = 13 muestras			
ID	Matriz	Coord UTM Datum WGS84	
		Zona 19J	
		Este	Norte
Tt-01	Relave	376812,50	6946663,72
Tt-02	Relave	376810,97	6946580,66
Tt-03	Relave	376891,18	6946593,26
Tt-04	Relave	376955,23	6946607,84
Tt-05	Relave	376928,25	6946556,63
Tt-06	Relave	376860,79	6946553,57
Tt-07	Relave	376822,70	6946494,66
Tt-08	Relave	376896,77	6946506,50
Tt-09	Relave	376978,69	6946520,71
Tt-10	Relave	376942,25	6946456,13
Tt-11	Relave	376897,11	6946450,87
Tt-12	Relave	376959,83	6946373,15
Tt-13	Relave	376995,09	6946296,36
Tt-14	Relave	376928,78	6946288,93
Tt-15	Relave	376763,66	6946645,74
CR-T	Sedimento	377003,36	6946534,00
STt-01	Suelo	376738,35	6946579,26

2.3.2 Muestreo suelos sin intervención (Valor Base)

En primer lugar se muestra en imágenes GoogleEarth la determinación de las zonas a muestrear junto con la carta geológica que fue superpuesta para determinar dichas zonas.

En segundo lugar se muestran los puntos en los que se tomaron las muestras destinadas a la determinación del valor base. La idea siempre fue buscar el sitio con menos intervención. Debido al acceso a estas zonas, o la intensiva actividad agrícola, se

produjeron situaciones como las de la zona correspondiente a la formación geológica Qal, el cual se tomo en un camino entre terrenos agrícolas. Sin embargo, la intervención del suelo por la agricultura, dificilmente generara grandes aumentos en cuanto al contenido de arsénico, plomo y mercurio.

Tabla 19. Puntos de muestreo para determinación de valor base.

Valor Base		
n = 12 muestras		
ID	Coord UTM Datum WGS84	
	Zona 19J	
	Este	Norte
VBKan-01	372187,77	6950877,89
VBKan-02	372166,19	6950931,10
VBKan-03	372164,98	6950990,51
VBKtp-01	379108,62	6942509,27
VBKtp-02	379111,78	6942489,24
VBKtp-03	379123,57	6942559,71
VBQal-01	363561,81	6974912,42
VBQal-02	363585,04	6974935,96
VBQal-03	363632,46	6974984,72
VBTKg-01	364361,16	6976085,38
VBTKg-02	364385,83	6976071,33
VBTKg-03	364428,75	6976113,91

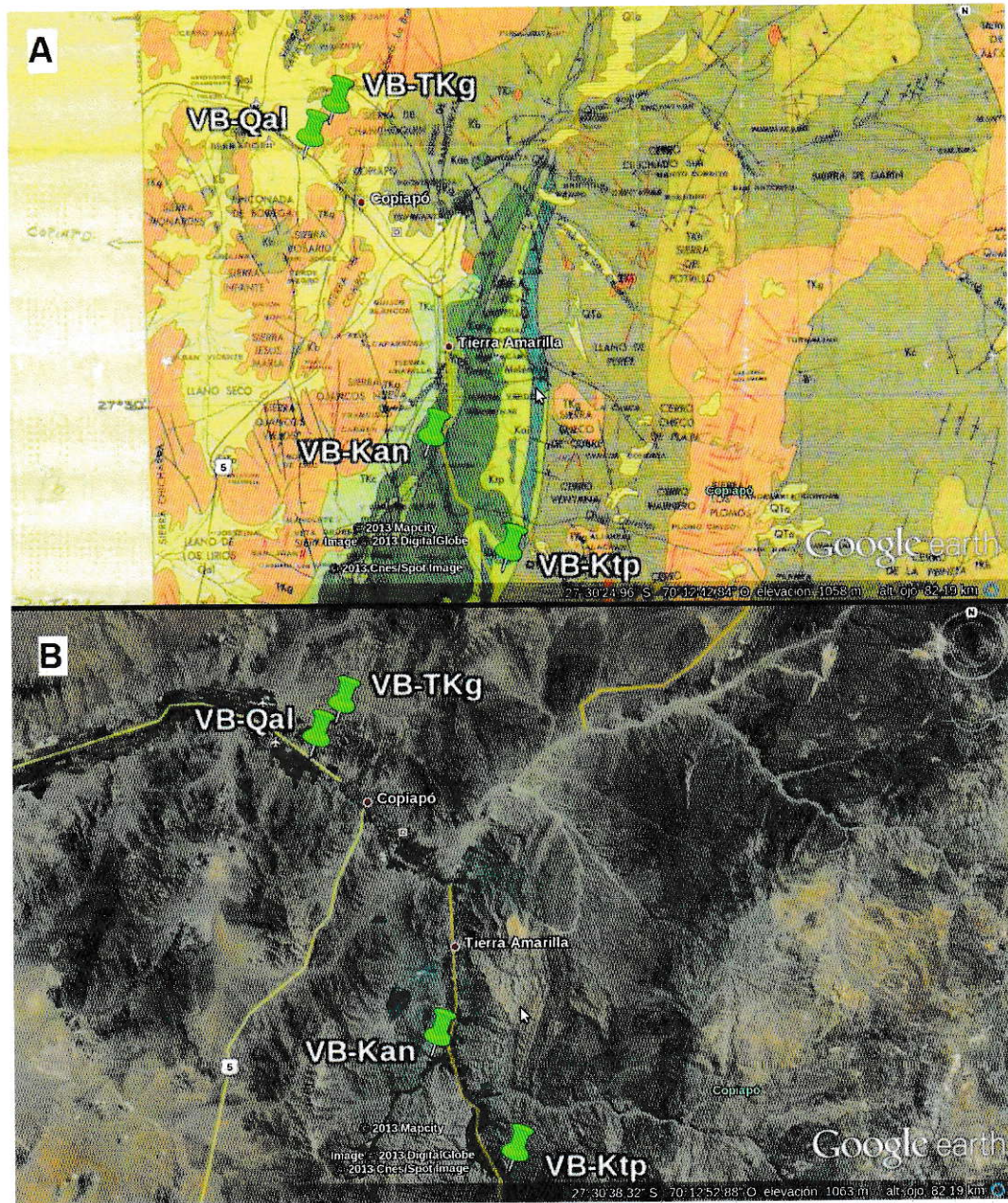


Figura 16. Referencia clasificación de suelos para puntos de muestreo Valor Base.
(B) Imagen satelital GoogleEarth. **(A)** Carta geológica SERNAGEOMIN.

2.3.3 Resultados de análisis químicos investigación confirmatoria

A continuación se presentan los resultados de análisis químico de las muestras sólidas.

El arsénico y el plomo fueron determinados por ICP, mientras que el mercurio fue determinado en mercuriometro por AA, y por FRX en caso que concentración de la muestra se encontrara por sobre el límite de detección superior del equipo de AA.

Tabla 20. Resultados de análisis de mercurio, arsénico y plomo para las muestras del sitio Totoralillo.

ID muestra	Matriz	Hg (mercuriometro) [mg/Kg]	Hg (XRF) [mg/Kg]	As (ICP) [mg/Kg]	Pb (ICP) [mg/Kg]
Tt-01	Relave	16,00	<LD	138,74	52,06
Tt-02	Relave		386,43	135,37	62,15
Tt-03	Relave		490,86	210,36	134,91
Tt-04	Relave		2052,86	223,20	122,60
Tt-05	Relave		2060,00	117,18	63,09
Tt-06	Relave		1587,14	812,15	591,52
Tt-07	Relave		4545,71	301,67	104,64
Tt-08	Relave		466,14	335,93	222,88
Tt-09	Relave		3304,29	530,25	218,28
Tt-10	Relave		6288,57	4592,01	1050,55
Tt-11	Relave		3398,57	330,49	154,32
Tt-12	Relave		8830,00	1460,26	868,38
Tt-13	Relave		3301,43	549,92	346,30
Tt-14	Relave		3334,29	1454,78	794,56
Tt-15	Relave	<LD	<LD	249,19	131,15
CR-T	Sedimento		1163,57	770,39	491,98
STt-01	Suelo	41,43	<LD	58,16	48,59

Tabla 21. Resultados de análisis de mercurio, arsénico y plomo para las muestras del suelos sin intervención (valor base).

ID Cliente	Matriz	Hg (mercuriometro) [mg/Kg]	As (ICP) [mg/Kg]	Pb (ICP) [mg/Kg]
VBKan-01	Suelo	0,26	17,97	34,36
VBKan-02	Suelo	0,05	<LD	8,81
VBKan-03	Suelo	0,14	<LD	15,38
VBKtp-01	Suelo	0,05	<LD	11,30
VBKtp-02	Suelo	0,11	<LD	12,04
VBKtp-03	Suelo	0,10	<LD	7,73
VBQal-01	Suelo	0,74	<LD	9,38
VBQal-02	Suelo	0,69	3,04	14,45
VBQal-03	Suelo	0,60	<LD	10,88
VBTKg-01	Suelo	0,02	35,93	6,66
VBTKg-02	Suelo	0,08	<LD	11,84
VBTKg-03	Suelo	0,01	<LD	8,48

Tabla 22. Resultados de análisis de mercurio, arsénico y plomo para las muestras de agua.

ID	pH	T [°C]	CE [µs/cm]	Hg (AA) [mg/Kg]	As (ICP) [mg/Kg]	Pb (ICP) [mg/Kg]
AS Tt-01	8,69	25,8	1149	<LD	<LD	<LD
AS Tt-02	8,67	27,1	1171	<LD	<LD	<LD

2.3.4 Procesamiento de datos y Obtención de UCL 95%

En los análisis de riesgo, una evaluación correcta de los datos es fundamental. La Agencia de Protección del Medioambiente de EEUU (Environmental Protection Agency-EPA), recomienda utilizar concentraciones promedio, para representar una estimación razonable de la concentración de contacto más probable en el tiempo. Las guías EPA indican que dada la incertidumbre asociada a estimar la concentración promedio verdadera en un sitio, se debe utilizar el límite superior de confianza del 95% de la media aritmética, estimada según la distribución estadística de los datos. Se conoce como **UCL 95%** por su sigla en inglés (**Upper Confidence Limit 95%**)

La principal dificultad que se presenta para lograr dicho objetivo es que, en general, la distribución del conjunto de datos no es evidente, sobre todo cuando la cantidad de valores esta tan limitada, como suele pasar en medioambiente. Por esto, cuando no se conoce la distribución, se deben utilizar pruebas estadísticas que permitan identificar la mejor hipótesis de distribución para el conjunto particular de datos en estudio. Hay diferentes métodos para calcular UCL 95% e identificar el mejor ajuste de los valores. Esto constituye una parte crucial en las etapas exploratorias.

En el caso de este estudio, se obtuvo el UCL de cada conjunto de datos utilizando el programa ProUCL. Para calcular el valor de concentración de los elementos de interés para cada sitio se calculó el UCL correspondiente utilizando el conjunto de datos obtenidos para el sitio. Para realizar estos cálculos se reemplazaron los valores bajo el LD por el valor LD/2, según recomendaciones de la guía del programa ProUCL. En el caso de que más del 50% de los datos se encuentre <LD, no se realiza el reemplazo, ya que los datos resultan insuficientes para la obtención de resultados aceptables.

A continuación se presentan las graficas para cada elemento con los resultados obtenidos del análisis de muestras, análisis de datos (calculo UCL 95%) y las normas a modo de comparación.

2.3.4.1 UCL95% Mercurio

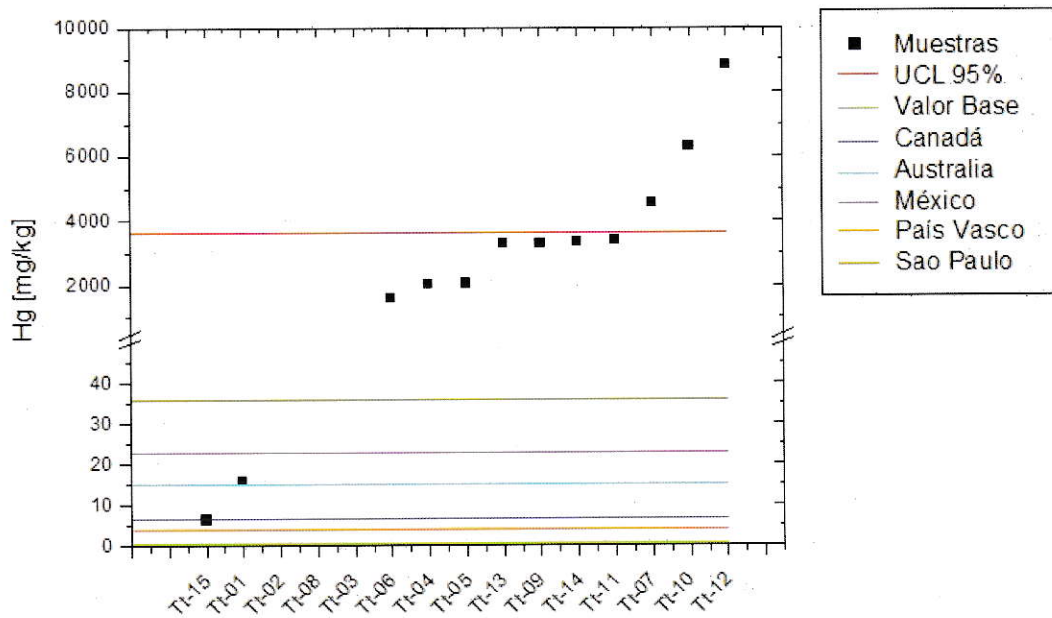


Figura 18. Resultados análisis de datos para Mercurio.

Tabla 23. Resultados análisis UCL 95% para mercurio y valores de referencia.

Hg [mg/Kg]					
UCL 95%		Mínimo	Máximo		
3654		6,50	8830		
Valores de Referencia para Hg [mg/Kg]					
Valor Base	Canadá	Australia	México	País Vasco	São Paulo
0,48	6,6	15	23	4	36

2.3.4.2 UCL95% arsénico

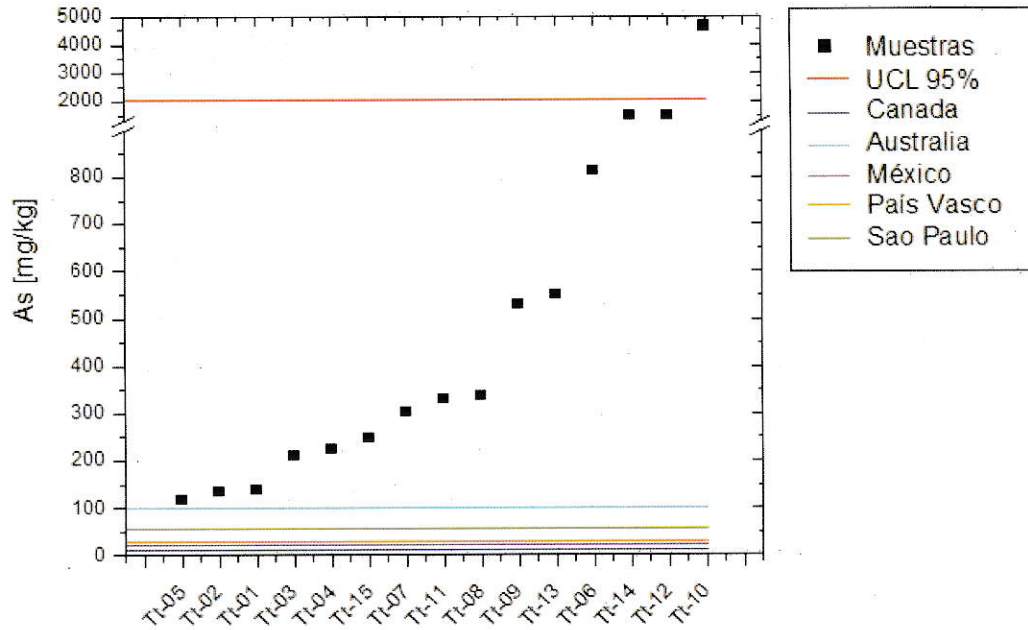


Figura 19. Resultados análisis de datos para arsénico.

Tabla 24. Resultados análisis UCL 95% para arsénico y valores de referencia.

As [mg/Kg]					
UCL 95%		Mínimo		Máximo	
2052		117,2		4592	
Valores de Referencia para As [mg/Kg]					
Valor Base	Canadá	Australia	México	País Vasco	São Paulo
*	12	100	22	30	55

* Más de 50% de las muestras de valor base se encontraron bajo el LD

2.3.4.3 UCL95% plomo

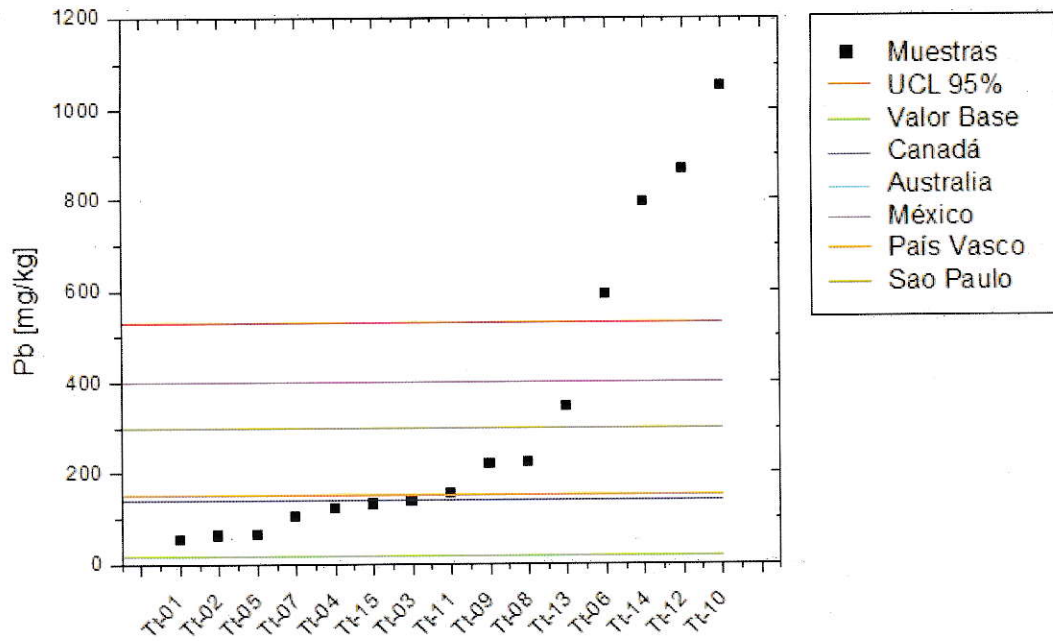


Figura 20. Resultados análisis de datos para plomo.

Tabla 25. Resultados análisis UCL 95% para plomo y valores de referencia.

Pb [mg/Kg]					
UCL 95%		Mínimo	Máximo		
529,1		52,06	1051		
Valores de Referencia para Pb [mg/Kg]					
Valor Base	Canadá	Australia	México	País Vasco	São Paulo
16,33	140	300	400	150	300

2.4 Caracterización del riesgo

2.4.1 Efectos no cancerígenos

El CP para efectos no cancerígenos fue calculado para las vías de ingestión y dérmica. Los resultados de la Dosis a la que los receptores se encuentran expuestos se presentan a continuación, tanto para niños como para adultos para el contaminante arsénico, para estos cálculos se utilizó la concentración de arsénico en la fuente calculado en la fase exploratoria, es decir el UCL 95% para arsénico (2052mg/Kg de arsénico).

Tabla 26. Resultados de dosis para niños y adultos por las vías ingesta y absorción dérmica, efectos no cancerígenos.

		niño	adulto
Dosis ingesta	mg/Kgxdía	2,62E-02	2,81E-03
Dosis Dérmica	mg/Kgxdía	2,09E-02	4,47E-03

Al dividir estos valores en la RfD (RfD_{oral} para ambas vías, $3,0E-4$) para obtener el CP de arsénico se obtienen los siguientes resultados. Recordar que estos valores son el cociente entre dos dosis, por lo que son adimensionales:

Tabla 27. Coeficientes de peligro para efectos no cancerígenos.

	niño	adulto
CP ingesta	8,75E+01	9,37E+00
CP Dérmica	6,95E+01	1,49E+01
CP Total	1,57E+02	2,43E+01

Notar que todos los valores se encuentran por sobre 1, indicativos de un riesgo inaceptable.

2.4.2 Efectos Cancerígenos

A continuación se presenta la dosis obtenida al evaluar el caso de los efectos cancerígenos, la cual difiere a la de los efectos no cancerígenos debido principalmente a la consideración de tiempos mayores.

Tabla 28. Resultados de dosis para niños y adultos por las vías ingesta y absorción dérmica, efectos cancerígenos.

		niño	adulto
Dosis ingesta	mg/Kgxdía	2,25E-03	9,64E-04
Dosis Dérmica	mg/Kgxdía	8,94E-03	1,92E-03

El CP para este caso se obtuvo al multiplicar el FP por la dosis calculada a partir de la concentración de arsénico en la fuente. En este caso también se utiliza el FP oral para ambas rutas.

Tabla 29. Resultados de dosis para niños y adultos por las vías ingesta y absorción dérmica, efectos cancerígenos.

	niño	adulto
CP ingesta	3,37E-03	1,45E-03
CP Dérmica	1,34E-02	2,87E-03
CP Total	1,68E-02	4,32E-03

Estos valores son adimensionales, representativos de la probabilidad de contraer cáncer. Notar que todos los valores indican una probabilidad de contraer cáncer superior a 10^{-4} , indicando un riesgo inaceptable.

III DISCUSIÓN

3.1 Investigación Preliminar y priorización

En base a los resultados obtenidos en la investigación preliminar fue posible completar un buen esbozo de la situación de cada sitio desde el punto de vista de la evaluación de riesgos, logrando reconocer las fuentes, así como los contaminantes más probables y preocupantes en base a las actividades que históricamente generaron los residuos en cuestión. De la misma forma fue posible identificar las rutas más probables de transporte a de estos contaminantes, encontrándose que para el caso de los relaves, la contaminación atmosférica por evaporación y resuspensión de polvo, en segundo lugar la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas; producto de escurrimiento superficial y la percolación, el cual de todas formas no debería alcanzar altos niveles dados los índices de pluviometría. En tercer lugar se encuentra la contaminación de frutas y hortalizas, tanto de las viñas como de huertos de los residentes de los sectores principalmente producto de la resuspensión de material y su posterior deposición sobre las frutas y hortalizas, lo cual resulta más preocupante en el sitio Totoralillo, en el cual se evidencio el secado de uvas sobre plásticos dispuestos directamente en la superficie del relave. Por medio de estas rutas más probables es por donde se podría generar la exposición de los receptores, los cuales corresponden en el caso de los sitios Totoralillo y Escorial Nantoco a residentes, por lo que además era posible encontrar receptores adultos e infantes, solo para el caso del sitio Amolanas los receptores residentes se encuentran bastante alejados, siendo trabajadores de los sectores agrícolas aledaños los más expuestos.

Estos mismos resultados, más los resultados de obtenidos del sector en estudio, se llenaron las fichas de priorización del CCME, obteniéndose la priorización del sitio Totoralillo, lo cual concuerda con lo esperado en base a los resultados de la investigación preliminar, siendo el sitio Totoralillo el de mayor tamaño, en donde la presencia de mercurio, elemento peligroso y volátil, era esperable dado que el relave proviene de la extracción de oro y plata, así como también presentaba residentes en el sitio, además de la muy probable contaminación de pasas por el secado de estas sobre el relave. Estas características resultaron en el mayor puntaje entre los tres sitios, indicando la mayor prioridad asignada a este sitio.

De los resultados de análisis químico de las muestras colectadas cabe mencionar los altos contenidos de mercurio (4986mg/Kg) encontrados en el sitio Totoralillo, al igual que en el caso del arsénico y el plomo (5917,46mg/Kg y 1240,55mg/Kg respectivamente).

Para el caso de los otros dos sitios, el sitio Amolanas solo presentó una concentración detectable para el plomo, la cual fue de casi 15mg/Kg. En el caso del Escorial Nantoco, se encontraron concentraciones preocupantes de arsénico y plomo, sin embargo, dadas las características de los residuos del tipo escoria, los cuales son altamente refractarios a la lixiviación y por su tamaño de partícula y dureza son difícilmente erosionados (ASIMET 2004), por lo que estos elementos presentan una dificultad mucho mayor para ingresar a las rutas de exposición que cuando se encuentran en residuos del tipo relave.

Por lo que la población Nantoco, ubicada a un costado del relave se vería afectada en menor medida, explicando un puntaje menor.

Finalmente para el caso de Amolana, en donde los receptores del tipo residentes son pocos, y los cuerpos de agua se encuentran más alejados, el puntaje fue bastante menor, llegando incluso a una categoría menor de prioridad.

Los resultados de muestras de agua mostraron concentraciones bajo el LD para mercurio arsénico y plomo, lo que no descarta de plano la contaminación de los pozos. Ya que las muestras de aguas colectadas son muestras puntuales, tal vez podría llegar a descartarse una contaminación continua, que significaría una continua ingesta de agua contaminada, pero no es posible descartar que bajo ciertos eventos, como lluvias, los cuerpos de agua muestreados presenten contaminación.

De todas formas, los tres sitios caen en categorías de priorización según las fichas del CCME, por lo que la no continuidad de los sitios hacia las etapas de investigación confirmatoria y caracterización del riesgo no significa que estos no deberían ser monitoreados y/o estudiados en profundidad.

3.2 Investigación confirmatoria

A partir del análisis de muestras puntuales fue posible obtener resultados puntuales de concentraciones de los distintos elementos, a partir de los cuales se estimó una concentración nominal para el residuo en cuestión. Como se explicó anteriormente, el estimador utilizado para obtener este valor fue el límite superior de confianza del promedio para un intervalo de confianza del 95%. En base a los resultados se puede observar lo potente de esta estimación, la cual posee características de las que carecen otros estimadores comúnmente utilizados en este paso, como por ejemplo el promedio,

el cual de haber sido utilizado, hubiéramos obtenido valores de la mitad o menos para el caso del mercurio y el arsénico, obteniéndose un enmascaramiento de los valores altos producto de varios puntos de concentración baja. Esto proveería de una visión bastante permisiva al modelo, ya que no es menor la probabilidad de que los receptores se vean sometidos continuamente a la exposición de material proveniente de los puntos con mayor contaminación.

Otro estimador que resulta ser lo contrario al promedio en cuanto a lo conservador que resulta sería utilizar el valor máximo, sin embargo, en estos casos se requiere encontrar un equilibrio, debido a que resultados basados en la utilización del valor máximo resultan débiles al intentar defenderlos frente a las toma de decisiones respecto a la gestión de los sitios, en donde grandes sumas de dinero son invertidas (IHOBE 2002).

El valor ocupado en este estudio (UCL 95%) resulta ser un estimador bastante equilibrado, obteniendo un resultado “promedio” que suma una arista conservadora, ya que un simple promedio podría estar ocultando valores puntuales muy altos. Siendo además este un estimador robusto, al basar el cálculo en la distribución estadística de los datos, y tomando un valor incluido en un límite de confianza, lo que resulta en un valor que podemos modificar en caso de requerir incertidumbres menores modificando el intervalo de confianza deseado.

Utilizando este estimador es que obtuvimos un valor “nominal” para mercurio, arsénico y plomo, el cual resulto en la confirmación de concentraciones muy por encima de las normas, encontrándose para el caso del mercurio valores 100 veces mayores que la norma más permisiva, 20 veces mayores en el caso del arsénico y 1,7 veces en el caso del plomo, aproximadamente.

Por otra parte hay claras evidencias de las rutas de transporte o vías de exposición de los contaminantes, dado el antecedente del secado de pasas en la superficie del relave. Las cuales demostraron concentraciones de mercurio (0.55mg/kg). De la misma forma, si bien las muestras de agua del canal que se encontraba activo no mostraron concentración de alguno de los contaminantes, en la muestra de sedimento del canal que se encontraba casi seco se comprobó la presencia de los contaminantes, lo que indica que; o bien el agua se encuentra contaminada en niveles bajo los límites de detección, pero si se genera una contaminación del sedimento por acumulación de los contaminantes, o bien la contaminación se da en mayor medida en dirección hacia el canal que se encontraba casi seco.

Con este se confirma la presencia de contaminantes en concentraciones alarmantes en el sitio Totoralillo (2052mg/kg de arsénico, contaminante en mayor concentración), por lo que resulta imperante realizar la caracterización del riesgo de manera completa, a diferencia de lo que se realizó en este trabajo, en el que falta un muestreo más profundo en las diferentes matrices afectadas para poder caracterizar el riesgo. Sin embargo, cabe destacar que por las concentraciones encontradas no hacen falta mayores estudios para demostrar que el sitio requiere de medidas de mitigación, con el fin de disminuir el riesgo al que está sometida la población.

3.3 Caracterización del Riesgo

La importancia de caracterizar el riesgo a modo de ejemplo en este trabajo, no reside en demostrar la realización de los cálculos, los cuales pueden hacerse de muchas maneras dependiendo de la referencia que uno tome para esto, sino que radica en la presentación de los resultados, los cuales son siempre similares en su forma, independiente del método usado para llegar a estos, intentando generar de alguna manera la difusión de esta metodología de evaluación de sitios contaminados, la cual, a modo de opinión personal, a pesar de su eficiencia y completitud del modelo de estudio, ha carecido de una entrada fuerte en los sistemas de gestión de sitios contaminados en los países sudamericanos debido a la complejidad del método, la cual genera un aparente gasto de recursos excesivo, el cual sin embargo resulta ser menor por la eficiencia y exactitud que las medidas tomadas en base a los resultados de una evaluación de riesgos pueden llegar a tener.

Los resultados obtenidos en la caracterización del riesgo resultan claramente en un riesgo inaceptable para la presencia de arsénico en la fuente, encontrando en el caso de los resultados no cancerígenos resultados en hasta una magnitud mayor que 1 para cualquiera de las 2 rutas analizadas para receptores niños y adultos. Al evaluar los resultados de los efectos no cancerígenos en su totalidad, vemos que el cálculo resulta en un CP dos magnitudes mayores que 1 para niños y para adultos. Esto indica un claro riesgo, sobre todo pensando que en el sitio Totoralillo fue posible constatar la presencia de receptores niños y adultos habitando en el sitio. Por otra parte, no se debe dejar de tomar en cuenta el hecho de que solo se analizaron dos rutas o vías de exposición y un solo elemento (también se encontraron altas concentraciones de plomo y mercurio), por

lo que el riesgo total para todos los contaminantes y rutas debería ser mucho mayor, ya que cabe recordar que hay un riesgo asociado a cada contaminante, los cuales se suman para obtener un riesgo total. Evidentemente, además de la suma de riesgos indicada por el método, en el organismo pueden darse efectos sinérgicos al encontrarse afectado por distintos contaminantes a la vez.

Para el caso de los efectos cancerígenos el escenario es bastante similar, encontrando resultados uno o dos órdenes de magnitud mayores que la tolerancia de 10^{-4} (valor más permisivo). Esta situación se aprecia en el análisis por vías de exposición y para receptores niños y adultos, por lo tanto, resulta lógico que el total resulte también en una probabilidad totalmente inaceptable, encontrando resultados $1,7 \times 10^{-2}$ y $4,3 \times 10^{-3}$ para niños y adultos respectivamente. Esto indica que para niños la tasa de incidencia de cáncer en la población afectada por la contaminación del sitio sería del orden de 1,7 casos cada por cada 100 personas, y para los adultos 4,3 personas en mil. Si se comparas estos valores con el valor que se tomó como límite de tolerancia, el cual corresponde a 1 caso en 10000, se tiene que entre 10000 niños se encontraría un total de 170 niños afectados y en el caso de los adultos 43 afectados por cada 10000 adultos.

Si bien faltan rutas y contaminantes por analizar, los cuales probablemente indiquen un CP de magnitudes mucho mayores indicando que el riesgo es aun mayor de lo expuesto en este trabajo, en base a estos resultados ya se podrían tomar medidas para evitar la exposición de la población, como por ejemplo, el cierre del sitio para evitar el contacto dérmico directo y la estabilización de la superficie del sitio contaminado por medio de la adición de componentes humectantes que ayuden a la consolidación del material y a

evitar la resuspensión de material particulado, disminuyendo la ingesta de material proveniente del relave.

Sin embargo, en ningún caso llega a hacerse innecesario la realización de estudios que lleguen a un mayor nivel de profundidad en la modelación de la exposición de los receptores en el sistema estudiado, los que permitirían llevar a cabo acciones más certeras y que ataquen específicamente los contaminantes y vías de exposición de mayor riesgo. Estos estudios deberían ir enfocados a evaluar también los efectos adversos sinérgicos que pueden probablemente estar presentes en un sitio contaminado por tantas y tan peligrosas sustancias.

IV CONCLUSIONES

- Se estudió metodologías internacionales como la metodología de la USEPA e IHOBE (país Vasco) y el Canadian Council of Ministers of Environment así como también algunas aplicadas en trabajos nacionales como Rhim 2004, trabajo basado principalmente en la metodología USEPA, o SERNAGEOMIN 2007. A partir de estos trabajos, más que seleccionar una metodología, a partir de lo visto en estos trabajos y guías internacionales se compiló una metodología que fuera aplicable a nuestro caso de estudio y el nivel de información con el que era posible llegar a contar. Esto debido principalmente a que las metodologías internacionales en algunos aspectos requieren referirse a guías y datos anexos a la guía de evaluación de riesgos y muchas veces particulares de ciertas regiones y/o legislaciones locales lo que las hacía difíciles de aplicar directamente a nuestro caso de estudio.
- Se llevó a cabo 2 muestreos en los sitios estudiados, así como también un muestreo en zonas de baja intervención antrópica con suelos y contenido de elementos de interés similares a los de los sitios estudiados, con el fin de determinar un valor base. A partir de las muestras obtenidas, luego de ser analizadas para arsénico, mercurio y plomo, fue posible en primer lugar aumentar la información disponible al momento de la priorización, al tener datos duros de concentraciones. Por otra parte fue posible definir las concentraciones de contaminantes para el sitio Totoralillo, logrando llevar a cabo así las etapas de investigación confirmatoria y caracterización del riesgo.

A partir de las muestras obtenidas en el primer muestreo, y la recopilación de información correspondiente a la investigación preliminar, se llevo a cabo una priorización de los sitios en estudio a partir de la utilización de las fichas del Canadian Council of Ministers of Environment, las cuales permitieron asignar puntuaciones al potencial riesgo que presentaba cada sitio, resultando en la priorización del sitio Totoralillo, el cual obtuvo un mayor puntaje.

- Se llevo a cabo un estudio confirmatorio en el sitio priorizado, el cual contemplo un segundo muestreo más intensivo, el cual permitió determinar la magnitud de la contaminación de mercurio, arsénico y plomo. Para determinar la magnitud de la contaminación se calculó el límite superior del promedio para un intervalo de confianza del 95%, valor que se utilizó como concentración “nominal” de la fuente.
- En base a los resultados de concentraciones obtenidos en la investigación confirmatoria se llevo a cabo la caracterización del riesgo para el arsénico, evaluando las dosis del contaminante recibidas por las vías de exposición ingestión y absorción dérmica, esto se hizo para efectos cancerígenos y no cancerígenos. Luego al comparar estas dosis, con valores toxicológicos de referencia obtenidos en línea desde el sitio IRIS (Integrated Risk Information System) de la USEPA. Los resultados de esta comparación indicaron un riesgo inaceptable para el contaminante tanto para efectos cancerígenos como no cancerígenos para ambas vías de exposición.

- La evaluación del riesgo llevada a cabo en los sitios Escorial Nantoco, relave Amolanas y relave Totoralillo demostraron un riesgo potencial alto, si bien el del sitio Escorial Nantoco y Relave Amolanas fue menor, existe un riesgo y este debiese ser evaluado en mayor profundidad.
- En el caso del sitio Totoralillo, además del alto riesgo potencial encontrado en la etapa preliminar, se demostró la presencia de arsénico, mercurio y plomo en concentraciones preocupantes, superiores a cualquiera de las normas internacionales utilizadas como referencia y al valor base obtenido a lo largo de este estudio. En adición, se demostró el alto riesgo asociado a este sitio producto de las altas concentraciones de arsénico encontradas, lo que permite concluir que se hace imperante la realización de medidas de mitigación y remediación de la contaminación en el sitio Totoralillo.

V REFERENCIAS

- Asimet Ambiente, Concejo Nacional de Producción Limpia, Guía técnica para el manejo de escorias de fundiciones segundo; acuerdo producción limpia fundiciones, 2006. pp 5-13
- BGR y SERNAGEOMIN, El Desarrollo Histórico y los pasivos de la Explotación Minera en el Curso Medio y Alto del Valle de Copiapó, III Región, Chile, 1998 pp 5-31
- Canadian council of Ministers of the Environment, National Classification system for Contaminated Sites, 2008.
- Canadian Council of Ministers of the Environment. 2007. *Canadian soil quality guidelines for the protection of environmental and human health: Summary tables. Updated September, 2007*. In: Canadian environmental quality guidelines, 1999, Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg
- CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Decisão de Diretoria nº 195-2005- E, de 23 de novembro de 2005. Dispõe sobre a aprovação dos Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo – 2005, em substituição aos Valores Orientadores de 2001, e dá outras providências
- DGA, Diagnostico y Clasificación de los Cursos de Agua Según Objetivos de Calidad, Cuenca del río Copiapó, 2004 pp 1-17
- Department of Environment and Conservation (2010). *Contaminated Sites Management Series, Assessment levels for Soil, Sediment and Water (Version 4, revision 1)*, Australia.
- Enciclopedia de la Flora Chilena, Regiones vegetales de Chile. 2010. http://www.florachilena.cl/Regiones_Vegetales/regiones_vegetales.htm Visitado en noviembre de 2012.
- IHOBE, Investigación de la Contaminación del Suelo, Análisis de Riesgos Para la Salud Humana y los Ecosistemas, 2002.

- IHOBE, Investigación de la Contaminación del Suelo, Estudio Histórico y Diseño de Muestreo, 2002
- ILMAL-018: Determinación de mercurio en aguas. Laboratorio de Química Ambiental, CENMA.
- ILMAL-019. Determinación de metales por ICP. Laboratorio de Química Ambiental, CENMA.
- ILTMS-001. Instructivo de laboratorio de toma de muestras sólidas – 001, “Muestreo de residuos sólidos”, Centro Nacional del Medio Ambiente, 2004.
- Integrated Risk Information System, IRIS, <http://www.epa.gov/IRIS/>. Visitado en Enero de 2012.
- Jara Ramírez, Claudia Andrea. Elementos base para la gestión ambiental del mercurio en Chile, (Memoria para optar al título de Ing. Civil Químico – Universidad de Chile) (Versión Digital), 2007
- L. I. Simenov; M.A. Hassanien (Eds). , Exposure and Risk Assessment of Chemical Pollution - Contemporary Methodology Ed. Springer, Bulgaria. 2009
- Ley 1/2005, de 4 de febrero, para la prevención y corrección de la contaminación del suelo. (País Vasco, España).
- LEY 19.300 Sobre Bases Generales del Medio Ambiente, Modificada por la ley 20.137 2007. MMA, Chile. Art. 2.
- Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.
- Observatorio Urbano, MINVU, Chile, Datos de La Comuna de Tierra Amarilla, Indicadores para la Comuna de Tierra Amarilla. <http://www.observatoriourbano.cl/indurb/ciudades.asp> Visitado en Diciembre 2012.

- Organización Mundial de la Salud OMS, “Metodología de Identificación y Evaluación de Riesgos para la Salud en Sitios Contaminados”, 1999.
- Page, C 1988. Farmacología Integrada, 1º Edición.
- Rhim, A y Anacona, C 2004. Riesgos Ambientales Asociados a Sitios Contaminados. Pp 1 – 83
- SERNAGEOMIN, Mapa Geológico de la Hoja de Copiapó (1:100.000): Región de Atacama. 1995, Documentos de Trabajo N°8.
- SERNAGEOMIN; Catastro de Faenas Mineras Abandonadas o Paralizadas y Análisis Preliminar de Riesgo, 2007.
- Spiro, T.G y Stigliani W.M. 2009. Química Medioambiental, 2º Edición. pp 438-450
- U.S. Environment Protection Agency, Calculating Upper Confidence Limits For Exposure Point Concentrations at Hazardous Waste Sites, 2002.
- U.S. Environmental Protection Agency. 1997. Ecological Risk Assessment Guidance for Superfund: Process for Designing and Conducting Ecological Risk Assessments. Interim Final. EPA/540/R-97/006. Office of Emergency and Remedial Response. Washington, DC.

VI ANEXOS

Anexo I - Fichas de Priorización CCME

CCME National Classification System (2008, 2010 v 1.2)
Score Summary

Scores from individual worksheets are tallied in this worksheet.
 Refer to this sheet after filling out the revised NCS completely.

I. Contaminant Characteristics

	Known	Potential
1. Residency Media	6	---
2. Chemical Hazard	8	---
3. Contaminant Exceedance Factor	---	4
4. Contaminant Quantity	9	---
5. Modifying Factors	2	---
Raw Total Score	25	4
Raw Total Score (Known + Potential)	29	
Adjusted Total Score (Raw Total / 40 * 33)	23.9 (max 33)	

II. Migration Potential

	Known	Potential
1. Groundwater Movement	0	---
2. Surface Water Movement	---	6.7
3. Soil	---	12
4. Vapour	---	0
5. Sediment Movement	---	2
6. Modifying Factors	0	0
Raw Total Score	0	20.7
Raw Total Score (Known + Potential)	20.7	
Adjusted Total Score (Raw Total / 64 * 33)	10.7 (max 33)	

III. Exposure

	Known	Potential
1. Human Receptors		
A. Known Impact	---	---
B. Potential		
a. Land Use		3
b. Accessibility		2
c. Exposure Route		
i. Direct Contact		3
ii. Inhalation		2
iii. Ingestion		6
2. Human Receptors Modifying Factors	---	1
Raw Total Human Score	0	17
Raw Total Human Score (Known + Potential)	17	
Adjusted Total Human Score	17.0 (maximum 22)	
3. Ecological Receptors		
A. Known Impact	0	---
B. Potential		
a. Terrestrial		---
b. Aquatic		---
4. Ecological Receptors Modifying Factors	0	---
Raw Total Ecological Score	0	0
Raw Total Ecological Score (Known + Potential)	0	
Adjusted Total Ecological Score	0.0 (maximum 18)	
5. Other Receptors	0	0
Total Other Receptors Score (Known + Potential)	0	
Total Exposure Score (Human + Ecological + Other)	17.0	
Adjusted Total Exposure Score (Total Exposure / 46 * 34)	12.6 (max 34)	

Site Score	
Amolanas	
Site Letter Grade	A
Certainty Percentage	56%
% Responses that are "Do Not Know"	10%
Total NCS Score for site	47.2
Site Classification Category	3

Site Classification Categories*:

- Class 1 - High Priority for Action (Total NCS Score >70)
- Class 2 - Medium Priority for Action (Total NCS Score 50 - 69.9)
- Class 3 - Low Priority for Action (Total NCS Score 37 - 49.9)
- Class N - Not a Priority for Action (Total NCS Score <37)
- Class INS - Insufficient Information (>15% of responses are "Do Not Know")

* NOTE: The term "action" in the above categories does not necessarily refer to remediation, but could also include risk assessment, risk management or further site characterization and data collection.

CCME National Classification System (2008, 2010 v 1.2)
Score Summary

Scores from individual worksheets are tallied in this worksheet.
 Refer to this sheet after filling out the revised NCS completely.

I. Contaminant Characteristics

	Known	Potential
1. Residency Media	8	---
2. Chemical Hazard	8	---
3. Contaminant Exceedance Factor	---	4
4. Contaminant Quantity	9	---
5. Modifying Factors	2	---
Raw Total Score	27	4
Raw Total Score (Known + Potential)	31	
Adjusted Total Score (Raw Total / 40 * 33)	25.6 (max 33)	

II. Migration Potential

	Known	Potential
1. Groundwater Movement	---	9.7
2. Surface Water Movement	---	7.2
3. Soil	---	12
4. Vapour	---	6.5
5. Sediment Movement	---	6
6. Modifying Factors	0	0
Raw Total Score	0	41.4
Raw Total Score (Known + Potential)	41.4	
Adjusted Total Score (Raw Total / 64 * 33)	21.3 (max 33)	

III. Exposure

	Known	Potential
1. Human Receptors	---	---
A. Known Impact	---	---
B. Potential	---	---
a. Land Use	---	3
b. Accessibility	---	2
c. Exposure Route	---	---
i. Direct Contact	---	3
ii. Inhalation	---	6
iii. Ingestion	---	6
2. Human Receptors Modifying Factors	6	---
Raw Total Human Score	6	20
Raw Total Human Score (Known + Potential)	26	
Adjusted Total Human Score	22.0 (maximum 22)	
3. Ecological Receptors	---	---
A. Known Impact	0	---
B. Potential	---	---
a. Terrestrial	---	---
b. Aquatic	---	---
4. Ecological Receptors Modifying Factors	0	---
Raw Total Ecological Score	0	0
Raw Total Ecological Score (Known + Potential)	0	
Adjusted Total Ecological Score	0.0 (maximum 18)	
5. Other Receptors	0	0
Total Other Receptors Score (Known + Potential)	0	
Total Exposure Score (Human + Ecological + Other)	22.0	
Adjusted Total Exposure Score (Total Exposure / 46 * 34)	16.3 (max 34)	

Site Score	
Totoralillo	
Site Letter Grade	A
Certainty Percentage	56%
% Responses that are "Do Not Know"	10%
Total NCS Score for site	63.2
Site Classification Category	2

Site Classification Categories:

- Class 1 - High Priority for Action (Total NCS Score >70)
- Class 2 - Medium Priority for Action (Total NCS Score 50 - 69.9)
- Class 3 - Low Priority for Action (Total NCS Score 37 - 49.9)
- Class N - Not a Priority for Action (Total NCS Score <37)
- Class INS - Insufficient Information (>15% of responses are "Do Not Know")

* NOTE: The term "action" in the above categories does not necessarily refer to remediation, but could also include risk assessment, risk management or further site characterization and data collection.

**CCME National Classification System (2008, 2010 v 1.2)
Score Summary**

Scores from individual worksheets are tallied in this worksheet.
Refer to this sheet after filling out the revised NCS completely.

I. Contaminant Characteristics

	Known	Potential
1. Residency Media	8	---
2. Chemical Hazard	2	---
3. Contaminant Exceedance Factor	---	4
4. Contaminant Quantity	9	---
5. Modifying Factors	0	---
Raw Total Score	19	4
Raw Total Score (Known + Potential)	23	
Adjusted Total Score (Raw Total / 40 * 33)	15.0 (max 33)	

II. Migration Potential

	Known	Potential
1. Groundwater Movement	---	9.7
2. Surface Water Movement	---	8.2
3. Soil	---	12
4. Vapour	---	0
5. Sediment Movement	---	6
6. Modifying Factors	4	0
Raw Total Score	4	35.9
Raw Total Score (Known + Potential)	39.9	
Adjusted Total Score (Raw Total / 64 * 33)	20.6 (max 33)	

III. Exposure

	Known	Potential
1. Human Receptors	---	---
A. Known Impact	---	---
B. Potential	---	---
a. Land Use	---	3
b. Accessibility	---	2
c. Exposure Route	---	---
i. Direct Contact	---	3
ii. Inhalation	---	1
iii. Ingestion	---	6.5
2. Human Receptors Modifying Factors	---	1
Raw Total Human Score	0	16.5
Raw Total Human Score (Known + Potential)	16.5	
Adjusted Total Human Score	16.5 (maximum 22)	
3. Ecological Receptors	---	---
A. Known Impact	---	---
B. Potential	---	---
a. Terrestrial	---	---
b. Aquatic	---	---
4. Ecological Receptors Modifying Factors	---	---
Raw Total Ecological Score	0	0
Raw Total Ecological Score (Known + Potential)	0	
Adjusted Total Ecological Score	0.0 (maximum 18)	
5. Other Receptors	---	---
Total Other Receptors Score (Known + Potential)	0	
Total Exposure Score (Human + Ecological + Other)	16.5	
Adjusted Total Exposure Score (Total Exposure / 46 * 34)	12.2 (max 34)	

Site Score	
Escorial Nantoco	
Site Letter Grade	A
Certainty Percentage	50%
% Responses that are "Do Not Know"	12%
Total NCS Score for site	51.7
Site Classification Category	2

Site Classification Categories*:

- Class 1 - High Priority for Action (Total NCS Score >70)
- Class 2 - Medium Priority for Action (Total NCS Score 50 - 69.9)
- Class 3 - Low Priority for Action (Total NCS Score 37 - 49.9)
- Class N - Not a Priority for Action (Total NCS Score <37)
- Class INS - Insufficient Information (>15% of responses are "Do Not Know")

* NOTE: The term "action" in the above categories does not necessarily refer to remediation, but could also include risk assessment, risk management or further site characterization and data collection.

I Identificación del Sitio

Nombre	Relave Amolanas		
Ubicación	Dirección		
	Coordenadas (DATUM WGS 84)	Huso 19J	m E 400216

II Información de los entrevistados

	Entrevistado 1	Entrevistado 2	Entrevistado 3
Nombre	Solange Aguilera		
Relación con el sitio	Personal MMA		
Correo Electrónico			
Teléfono	52-236198		

III Características Generales del Sitio

Propietario	Minera collancura	
Tamaño (ha)	2,5	
Estatus proceso	Activo	Inactivo X

Descripción del Sitio
 El relave presenta no más de 1m de altura sobre el nivel del suelo, se encuentra en una quebrada. Ante eventos de lluvia podría escurrir material quebrada abajo.

Descripción de Actividades
 Cuando el relave se encontraba activo era utilizado principalmente para residuos de minería de Cu.

IV Características del Sector

Usos de los sitios colindantes	Norte: Sitios agrícolas. Sur: cerros. Este: cerro. Oeste: cerro.
Cuerpos de agua cercanos	Tranque Lautaro se encuentra a 2Km aproximadamente.

I Identificación del Sitio

Nombre	Relave Totoralillo			
Ubicación	Dirección	Camino los loros km 35		
	Coordenadas (DATUM WGS 84)	Huso 19J	m E 376973	m S 6946442

II Información de los entrevistados

	Entrevistado 1	Entrevistado 2	Entrevistado 3
Nombre	Solange Aguilera		
Relación con el sitio	Personal MMA		
Correo Electrónico			
Teléfono	52-236198		

III Características Generales del Sitio

Propietario	Desconocido	
Tamaño (ha)	6	
Estatus proceso	Activo	Inactivo X
Descripción del Sitio	El relave presenta no más de 1m de altura sobre el nivel del suelo, canales de regadio escurren por sus costados. Vegetación presente a los costados del canal de regadio. Hay una vivienda en el sitio. Acopio de materiales de desecho (palets de madera, desechos plásticos, escombros). En el sitio se aprecia secado de pasas en bolsas plásticas sobre el	
Descripción de Actividades	Cuando el relave se encontraba activo era utilizado principalmente para residuos de minería de Au y Ag.	

IV Características del Sector

Usos de los sitios colindantes	Norte: Sitios agrícolas. Sur: Sitios Agrícolas. Este: colinda con el cerro. Oeste: colinda con la carretera.
Cuerpos de agua cercanos	Canales de regadio que corren a los costados del sitio.

I

Identificación del Sitio

Nombre	Escorial Nantoco			
Ubicación	Dirección	ruta C-35 s/n		
	Coordenadas (DATUM WGS 84)	Huso 19J	m E 374601	m S 6952989

II

Información de los entrevistados

	Entrevistado 1	Entrevistado 2	Entrevistado 3
Nombre	Natalia Neira		
Relación con el sitio	Habitante		
Correo Electrónico			
Teléfono			

III

Características Generales del Sitio

Propietario	Desconocido		
Tamaño (ha)	2,5		
Estatus proceso	Activo	Inactivo X	
Descripción del Sitio	<p>Deposito de escorias, el cual presenta alturas de 1 a 2m sobre el nivel del suelo. A un costado hay una población, hay algunas casas que le han "ganado terreno al escorial". La materia se encuentra en trozos gruesos vitreos de alta dureza. No se aprecia metarrial fino a simple vista.</p>		
Descripción de Actividades	<p>Deposito de escorias provenientes de fundición de Cu</p>		

IV

Características del Sector

Usos de los sitios colindantes	<p>Norte: Poblado de Nantoco. Sur: Sitios Agrícolas. Este: Sitios Agrícolas. Oeste: Ruta C-35</p>		
Cuerpos de agua cercanos	<p>Canal de regadío pasa cerca del limite este del escorial. Hay un pozo de agua en el poblado.</p>		