

UCh-FC
Q. Ambiental
S 719
C.1



FACULTAD DE CIENCIAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

**“EVALUACIÓN DE RIESGOS, INVESTIGACION PRELIMINAR Y
CONFIRMATORIA, EN ASENTAMIENTOS HUMANOS PRÓXIMOS A SITIOS DE
MINERÍA METÁLICA EN LA COMUNA DE ILLAPEL”**

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

Química Ambiental

Nicole Soubllette Stagno

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

Junio del 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 o (la) candidato (a):

NICOLE SOUBLETTE STAGNO

“EVALUACIÓN DE RIESGOS, INVESTIGACIÓN PRELIMINAR Y CONFIRMATORIA, EN ASENTAMIENTOS HUMANOS PRÓXIMOS A SITIOS DE MINERÍA METÁLICA EN LA COMUNA DE ILLAPEL”

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

COMISIÓN DE EVALUACIÓN

Dra. Isel Cortés.
Directora Seminario de Título

Firma manuscrita en azul de Dra. Isel Cortés.

Dra. Isel Cortés.
Profesora Patrocinante

Firma manuscrita en azul de Dra. Isel Cortés.

Prof. María Inés Toral.
Correctora

Firma manuscrita en azul de Prof. María Inés Toral.

Dr. Hernán Ríos.
Corrector

Firma manuscrita en azul de Dr. Hernán Ríos.

Santiago de Chile, Junio 2013

Agradecimientos

En primer lugar quisiera agradecer a la Profesora Isel Cortés por haberme dado la posibilidad de desarrollo en el ámbito profesional, apoyándome de forma continua en el avance de esta investigación y en el medio laboral.

También, agradecer al Ministerio de Medio Ambiente y al Centro Nacional del Medio Ambiente por haber proporcionado la instancia para este estudio, tanto con infraestructura como acogiendo nuestro trabajo con la mejor disposición y constante retroalimentación para concluir en conjunto las propuestas finales del estudio.

Muchas gracias Dr. Julio Salinas por guiarnos en las etapas claves que nos permitieron continuar con el trabajo, complementando con sus conocimientos nuestra incipiente exploración en estas temáticas.

Especialmente quiero agradecer a Johan quien ha sido apoyo y gran cómplice en este y otros caminos de crecimiento en mi vida, su compañía simplemente ha hecho que todo sea mejor.

Gracias a mi familia por apoyarme en mis andanzas, cubriéndome en los momentos difíciles para lograr mis objetivos y creyendo en mí a pesar de mis extrañas decisiones.

Por último gracias a muchos amigos que estuvieron presentes en esta etapa de vida, estudio y trabajo, quienes directa o indirectamente fueron un pilar mas para seguir adelante y no abandonar la liosa ruta elegida.

ÍNDICE DE CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN.	1
1.1 Antecedentes Generales.	1
1.2 Metodologías de evaluación de riesgo.	5
1.1.1 Identificación, Inspección y Priorización de Sitios.	11
1.1.2 Investigación Preliminar.	15
1.1.3 Investigación Confirmatoria.	17
1.1.4 Caracterización del Riesgo.	31
1.3 Actividad minera en Illapel y Sitios evaluados: Zona de estudio.	41
1.4 Hipótesis.	45
1.5 Objetivos.	45
1.5.1 Objetivo General.	45
1.5.2 Objetivos específicos.	45
II. MATERIALES Y MÉTODOS.	47
III. RESULTADOS Y DISCUSION.	52
3.1 Identificación, Inspección y Priorización de Sitios.	52
3.2 Investigación Preliminar.	61
3.2.1 Antecedentes Illapel.	62
3.2.2 Identificación de potenciales componentes del riesgo (fuente, vía y receptor).	68
3.2.3 Investigación Preliminar para SPPC en estudio.	70
3.3 Investigación Confirmatoria.	84
3.3.1 Muestreo de los SPPC en estudio.	84
3.3.2 Procesamiento de datos y Obtención de UCL 95%.	96
3.3.3 Calidad de aguas comuna de Illapel.	102
3.4 Caracterización Preliminar del Riesgo.	112
IV. CONCLUSIONES.	115
V. REFERENCIAS.	119
VI. ANEXOS.	126

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Factores que inciden en la representatividad de los datos obtenidos _____	17
Tabla 2. Criterios establecidos para calidad de suelos en Canadá. _____	25
Tabla 3. Criterios establecidos para calidad de suelos en Australia _____	26
Tabla 4. Criterios establecidos para remediar suelos en México _____	27
Tabla 5. Valores orientadores para suelos en el estado de Sao Paulo, Brasil _____	28
Tabla 6. Valores límites para considerar un suelo alterado según usos del suelo en la Comunidad Autónoma del País Vasco _____	29
Tabla 7. Escenario de uso de suelo y tipo de exposición. _____	36
Tabla 8. Variables para exposición a suelos por ingestión accidental en uso residencial de sitios. _____	37
Tabla 9. Variables para la exposición a suelos por contacto dérmico en uso residencial de sitios. _____	38
Tabla 10. Sitios evaluados en la primera visita de campo con el respectivo detalle de Georreferencia, relaves en uso/abandono y resultados de fichas. _____	57
Tabla 11. Concentración de elementos (mg/kg, BMS) muestras de suelo y relaves. ____	58
Tabla 12. Concentración de elementos (en µg/L) para muestras líquidas. _____	59
Tabla 13. Información correspondiente al sitio SPPC Leopoldo Hernández _____	71
Tabla 14. Información correspondiente al sitio SPPC Anta Colla. _____	77
Tabla 15. Información correspondiente al sitio SPPC Pluma de Oro _____	81
Tabla 16. Puntos de muestreo y georreferencias sitio Leopoldo Hernández. _____	90
Tabla 17. Puntos de muestreo y georreferencias de las muestra "Valor Base" _____	93
Tabla 18. Concentración de elementos (en mg/kg, BMS) para muestras de relave Leopoldo Hernández _____	94
Tabla 19. Concentración de elementos (en mg/Kg, BMS) para muestras Valor Base ____	95
Tabla 20. Valores referenciales seleccionados por normativas internacionales y valor base. _____	97
Tabla 21. Concentración de metales detectados por ICP en muestras de suelo aledaños a los SPPC y Hg por mercuriómetro. _____	101
Tabla 22. Muestras de agua Illapel y parámetros medidos en terreno _____	106
Tabla 23. Concentración (mg/L) de elementos para análisis de aguas superficiales ____	108
Tabla 24. Variables utilizadas para la caracterización del riesgo no cancerígeno ____	112
Tabla 25. Resultados obtenidos en la caracterización del riesgo no cancerígeno ____	113
Tabla 26. Variables utilizadas para la caracterización del riesgo cancerígeno _____	113
Tabla 27. Resultados obtenidos en la caracterización del riesgo cancerígeno. _____	114

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Componentes del riesgo.	6
Figura 2. Diagrama de flujo para la confirmación de SPPC	10
Figura 3. Ciclo Global del Mercurio.	21
Figura 4. Diagrama resumen del proceso de evaluación de riesgos.....	40
Figura 5. Principales sectores poblados en la comuna de Illapel que presentan mayor cantidad de residuos mineros activos o abandonados. Destaca la proximidad de los mismos a los cursos de aguas.	42
Figura 6. Vista general de relaves presentes en el sector de Illapel. Versión ampliada de la sección inferior izquierda de la Figura 5, correspondiente al sector urbano de Illapel.....	43
Figura 7. Vista general relaves presentes en sector Aucó. Versión ampliada de sección superior derecha de la Figura 5, correspondiente al sector rural estero Aucó, río arriba, donde se encuentran caseríos.	44
Figura 8. Equipo ICP-OES Perkin Elmer en el Laboratorio de Química Ambiental (CENMA).....	48
Figura 9. Espectrofotómetro de Absorción Atómica	49
Figura 10. Mercuriómetro en CENMA.	50
Figura 11. Analizador de terreno XRF.....	51
Figura 12. Análisis de muestras por XRF en el laboratorio y en terreno.	51
Figura 13. Vista norte del relave pluma de oro al momento de la visita.	54
Figura 14. Relave activo en sitio Leopoldo Hernández.....	54
Figura 15. Pila 1 relave Anta Colla. Se destaca la presencia de autoridades locales en el proceso de evaluación.	55
Figura 16. Relave centinela vista Sur oeste.....	55
Figura 17. Relave horizonte.....	56
Figura 18. Trapiche operativo en planta Leopoldo Hernández. Aquí se realiza la molienda del mineral al que se agrega el mercurio y agua. Una vez obtenida la “pella” (o amalgama) el residuo de mineral es drenado hacia el depósito de relave.	73
Figura 19. Planta Leopoldo Hernández. Destacada en rojo, se muestra la chimenea de evacuación de vapores de mercurio para purificación del oro obtenido desde la amalgama. En el fondo se observan poblaciones de Illapel.....	73
Figura 20. Relave Leopoldo Hernández.....	74
Figura 21. Vista, desde el relave Hernández, del APR Población Plan de Hornos. Se puede observar que la quebrada donde se encuentra el relave confluye hacia el APR. Más al fondo, se encuentra el río Illapel.	75

Figura 22. Modelo conceptual inicial donde se describen las principales rutas de distribución de posibles contaminantes presentes en relaves Leopoldo Hernández.....	76
Figura 23. Relaves Anta Colla. Al fondo en la fotografía se observa la segunda pila de relave (vista desde pila N °1).	78
Figura 24. Relaves Anta Colla.....	79
Figura 25. Modelo conceptual inicial donde se describen las principales rutas de distribución de posibles contaminantes presentes en relaves Anta Colla.....	80
Figura 26. Relave Pluma de Oro. Actualmente se procesan minerales para obtención de concentrados de cobre principalmente.	82
Figura 27. Modelo conceptual inicial donde se describen las principales rutas de distribución de posibles contaminantes presentes en relave Pluma de Oro.....	83
Figura 28. Distribución de los puntos de muestreo obtenidos en relave Leopoldo Hernández.	89
Figura 29. Referencia clasificación de suelos para puntos de muestreo Valor Base....	91
Figura 30. Distribución de los puntos de muestreo obtenidos para Valores Base.....	92
Figura 31. Resultados analíticos y UCL 95% calculado para mercurio en muestras de relave Leopoldo Hernández y su comparación con normativas internacionales y valores base.	98
Figura 32. Resultados analíticos y UCL 95%calculado para plomo en muestras de relave Leopoldo Hernández y su comparación con normativas internacionales y Valores Base.....	99
Figura 33. Resultados analíticos y UCL 95% para arsénico en muestras de relave Leopoldo Hernández y su comparación con normativas internacionales y Valores Base.	100
Figura 34. Ubicación estaciones de monitoreo de la Dirección General de Aguas (Imagen Google Earth).....	103
Figura 35. Valores históricos de concentración de plomo en estaciones Estero Aucó, Las Burras (aguas abajo) y El Peral (aguas arriba), comparación a NCh 1333.....	104
Figura 36. Valores históricos de concentración de arsénico en estaciones Estero Aucó, Las Burras (aguas abajo) y El Peral (aguas arriba), comparación a NCh 1333.....	105
Figura 37. Muestras de agua superficial Illapel y muestra de agua bocatoma Aguas del Valle.	107
Figura 38. Zona de muestreo en terreno río Illapel aguas arriba.....	110
Figura 39. Análisis en terreno de parámetros en aguas.	111

LISTA DE ABREVIATURAS

ARA	Administración de Riesgos Ambientales
ATSDR	Agency for Toxic Substances and Disease Registry
CCME	Canadian Council of Ministers of the Environment
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
ELCR	Excess Lifetime Cancer Risk
EMEG	Environmental Media Evaluation Guide
ERA	Evaluación de Riesgo Ambiental
ERE	Evaluación de Riesgo Ecológico
ERH	Evaluación de Riesgos en Humanos
ERS	Evaluación de Riesgos a la Salud
FDP	Factor de Pendiente
FE	Factor de Exposición
FOCIGAM	Fortalecimiento de la Capacidad Institucional de Gestión Ambiental Minera
FPC	Factor de Potencia Carcinogénica
FRU	Factor de Riesgo Unitario
FRX	Fluorescencia de Rayos X
ISO	International Organization for Standardization
JICA	Japan International Cooperation Agency
LOAEL	Lowest Observed Adverse Level Effect
MINVU	Ministerio de Vivienda y Urbanismo
MRL	Minimal Risk Level

NCSCS	National Classification System for Contaminated Sites
NOAEL	No Observable Adverse Effect Level
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
PAM	Pasivo Ambiental Minero
PC	Peso Corporal
PIB	Producto Interno Bruto
RECV	Riesgo Extra de Cáncer de por Vida
RfD	Reference Dose
SCW	Site Classification Worksheets
SEA	Servicio de Evaluación Ambiental
SFO	Slope Factor (Oral)
SPPC	Suelo con Potencial Presencia de Contaminantes
TI	Tasa de Ingesta
URF	Unit Risk Factor

RESUMEN

A través del convenio de transferencia CENMA-MMA 2011 se solicita una Evaluación de Riesgos a la Salud de poblaciones que conviven con pasivos ambientales mineros en la comuna de Illapel, la que presenta actividad minera ligada a sectores poblados y cursos de agua. Se seleccionan los elementos potencialmente tóxicos mercurio, arsénico y plomo como objetivos de estudio. Se estudian y adaptan metodologías internacionales que cuentan con un mayor nivel de desarrollo, para ser aplicadas en el presente estudio.

Por medio de la recopilación de antecedentes, aplicando fichas de priorización, análisis de muestras puntuales y preocupaciones sociales, se priorizaron 3 sitios del estudio: Leopoldo Hernández (minería de oro activa por amalgamación con mercurio), Anta Colla (relaves abandonados de minería de oro) y Pluma de Oro (relaves activos de minería de cobre por flotación). Para estos sitios, en la primera fase de Investigación Preliminar se elaboraron modelos conceptuales descriptivos de la hipótesis de distribución de contaminantes y fichas con información por sitio evaluado. Para la segunda fase de Investigación Confirmatoria, se seleccionó el sitio Leopoldo Hernández, dado que presenta importante evidencia de potencial contaminación. En este fue posible llevar a cabo un muestreo representativo de suelos y obtención de muestras puntuales de aguas, realizando posteriormente análisis químico a las muestras obtenidas.

Luego, para la concentración medida de elementos en las muestras sólidas, se calculó la media aritmética con nivel superior de confianza del 95% (UCL 95% por su sigla en inglés). Los valores UCL 95% obtenidos, fueron comparados con valores referenciales de normativas internacionales y concentraciones medidas (UCL 95%) en suelos de bajo nivel de intervención antrópica (valores base). Los sólidos evaluados en el sitio Leopoldo Hernández, respecto a UCL 95% de valores base analizados, evidencian:

- Mercurio alcanza UCL 95% de 939 mg/kg, superando ampliamente el valor medido en suelos sin intervención significativa (valor base presenta UCL 95% de 0,14 mg/kg).
- Arsénico presenta concentración UCL 95% de 1467 mg/kg, mientras que valor base se presenta bajo el límite de detección, de la técnica analítica utilizada.
- Plomo presenta UCL 95% de 107,8 mg/kg, superando el valor base de UCL95% de 7,9 mg/kg.

Respecto de las normas, plomo no supera ninguna, mientras que mercurio y arsénico superan todas las normas por un rango amplio.

Así, se considera que el sitio Leopoldo Hernández presenta indicios claros de presencia de contaminantes en los suelos, de mercurio, arsénico y en menor medida plomo. A su vez los suelos aledaños presentan altas concentraciones de mercurio. Se evalúa que la calidad del agua (subterránea y superficial) no es afectada significativamente por estos pasivos ambientales.

En la tercera etapa se lleva a cabo la caracterización del riesgo por arsénico, calculando exposición para ingesta accidental y exposición dérmica (no cancerígeno), como también riesgo extra de cáncer de por vida.

Considerando la caracterización preliminar del riesgo no cancerígeno, a través del Índice de Peligro HI, con $HI > 1$ indicador de existencia de riesgo y habiendo obtenido HI para niños de $1,12 \cdot 10^{+02}$ y adultos de $1,73 \cdot 10^{+01}$ en usos residenciales de suelo, se encuentra un alto nivel de riesgo superando ampliamente el valor establecido para la evaluación ($HI > 1$).

Además, considerando la caracterización preliminar del riesgo cancerígeno, donde se tolera un riesgo extra de cáncer de por vida total de 1 caso en una población de 10.000 habitantes ($ELCRT < 1 \cdot 10^{-4}$), habiendo calculado para niños un $ELCRT = 1,20 \cdot 10^{-02}$ y para adultos $ELCRT = 3,09 \cdot 10^{-03}$ en usos residenciales de suelo, se encuentra un alto nivel de riesgo de cáncer superando ampliamente el valor establecido para la evaluación ($ELCRT < 1 \cdot 10^{-4}$).

ABSTRACT

According to the transfer agreement CENMA-MMA 2011, it is requested a Health Risk Assessment of populations living with mining environmental liabilities of tailing type in Illapel commune, which has mining activity linked to villages and waterways. Potentially toxic elements mercury, arsenic and lead are selected as study objectives. International methodologies that have a higher level of development are studied and adapted, to be applied in the present study.

Through the compilation of data, applying prioritization sheets, analysis of samples and social concerns, three study sites were prioritized: Leopoldo Hernandez (active gold mining by amalgamation with mercury), Anta Colla (abandoned tailings of gold mining) and Pluma de Oro (with active tailings of copper mining by flotation). For these sites, in the first phase of Preliminary Investigation, conceptual models descriptive of the contaminants distribution hypothesis and information sheets for each assessed site, were developed. For the second phase of Confirmatory Investigation, Leopoldo Hernández site was selected, since it shows important evidence of potential contamination. It was possible to carry out a representative soil and water sampling in this site, subsequently carrying out chemical analysis of obtained samples.

Then, to the measured concentration of elements in solid samples, the arithmetic mean was calculated with an upper confidence level of 95% (UCL 95%) for the statistical distribution of each data set, through a specific computer program (ProUCL). UCL95% values obtained were compared with reference values of international standards and with measured concentrations (UCL95%) of soils with low level of human intervention (baseline values).

The solids assessed on Leopoldo Hernández site, respect to UCL 95% of analyzed baseline values, show:

- Mercury reaches UCL95% of 939 mg/kg, well above the value measured in soils without significant intervention (baseline values has UCL 95% of 0.14 mg/kg).
- Arsenic has UCL95% concentration of 1467 mg/kg, while baseline value results are under the detection limit of the analytical technique used.
- Lead presents UCL95% of 107.8 mg/kg, exceeding the UCL95% baseline value of 7.9 mg / kg.

As for international standards, lead did not exceed any of them, while mercury and arsenic exceed all standards for a wide range.

For these reasons, it is considered that the site Leopoldo Hernandez presents clear evidence of presence of contaminants in soils of mercury, arsenic and lead in a lesser extent. In turn, surrounding soils have high concentrations of mercury. Water quality (ground and surface) is evaluated as not significantly affected by these environmental liabilities.

In the third stage risk characterization by arsenic is carried out, calculating exposure to accidental ingestion and dermal exposure (non-cancerous), as well as extra risk of cancer for life.

Considering the preliminary characterization of non-cancer risk, through the Hazard Index HI, with $HI > 1$ as risk indicator and having obtained $HI 1,12 \cdot 10^{+02}$ for children and $1,73 \cdot 10^{+01}$ for adults in residential soils applications, there is a high risk level, well above the value set for the evaluation ($HI > 1$).

Furthermore, considering the preliminary characterization of cancer risk, where extra lifetime cancer risk is tolerated to less than 1 case in a population of 10,000 inhabitants ($ELCRT < 1 \cdot 10^{-4}$), having calculated for children $ELCRT = 1,20 \cdot 10^{-02}$ and adults $ELCRT = 3,09 \cdot 10^{-03}$ in residential soil applications, there is a high risk of cancer surpassing the value set for the evaluation ($ELCRT < 1 \cdot 10^{-4}$).

I. INTRODUCCIÓN.

1.1 Antecedentes Generales.

En diferentes ámbitos de participación Chile ha estado vinculado, desde hace más de una década, con la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) y fue formalmente invitado a participar en dicho organismo el año 2007. Es importante notar que entre los principales objetivos de la OCDE están el coordinar políticas económicas y sociales de los estados participantes (compartiendo e identificando buenas prácticas en países desarrollados), colaborar con el desarrollo económico de países en vías de desarrollo, elevar estándares de vida y mantener la estabilidad financiera, apoyando al mismo tiempo el crecimiento económico sustentable.

Como parte de los protocolos empleados en el proceso de integración de países invitados, la OCDE realiza estudios de observación en los que evalúa las condiciones del país que se incorpora, a partir de los cuales se publican informes que dan cuenta y analizan la situación o escenario en que se percibe el país, al momento de la evaluación. De este modo, se estima el cumplimiento de requisitos mínimos que facultan la participación de los estados que conforman la organización y dicho análisis permite además la formulación de recomendaciones para mejorías que contribuyan a lograr progresivamente los avances hacia las condiciones básicas que presentan los países adjuntos (Mazzo, 2009).

Vinculado a las temáticas de interés de la organización ya mencionadas, se encuentran las materias ambientales en sus diferentes ámbitos. En el caso de la evaluación de la OCDE para la incorporación de Chile, se emitió en el año 2005 el estudio "Evaluaciones de desempeño ambiental" (OCDE-CEPAL), en el cual uno de los aspectos a los que se hace referencia es el sector minero del país (el cual aportó en un 8,2% del PIB, con el 42% del valor de las exportaciones y un crecimiento del 256% desde 1990 hasta la fecha de emisión del informe).

En él se menciona que, a pesar de ser este sector económico uno de los primeros en usar las EIA (Evaluación de Impacto Ambiental), de haber reducido las emisiones de SOx de las fundiciones y haber mejorado tanto su eficiencia energética, como la certificación ISO 14001 y asumido acuerdos voluntarios de producción limpia, se considera que, en algunas regiones, aún las actividades mineras causarían el grueso de las emisiones en Chile de SOx y arsénico. Además, que se deben disminuir aún más las emisiones de material particulado, que existe un uso ineficiente de las aguas, que se observa un tercio de los tranques de relaves abandonados en un estado deficiente o inaceptable y que las empresas mineras pequeñas o medianas no cumplen las normativas establecidas.

Se señala a la vez, que existe poca información de la contaminación del suelo con metales pesados y contaminantes tóxicos generados por la minería y que Chile no tiene planes de descontaminación de las minas abandonadas. Además, recomienda consolidar esfuerzos para producir información ambiental, informes de la situación del medio ambiente e indicadores ambientales, con el fin de fortalecer la toma de decisiones y la información pública, tomando en cuenta metodologías internacionales (OCDE-CEPAL, 2005).

Es en este contexto que surge la necesidad de hacerse cargo de los sitios impactados por el sector minero, lo cual implica conocer donde están ubicados, sus características y la estimación de los niveles de riesgo que presentarían para las personas, ya sea por contaminación o seguridad física.

El desafío planteado es acogido por instituciones del país las cuales, en el marco de una cooperación internacional, dan paso al proyecto de Fortalecimiento de la Capacidad Institucional en la Gestión Ambiental Minera (FOCIGAM), que en una primera aproximación para abordar la temática, a través de la alianza entre el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) y la Agencia de Cooperación Ambiental del Japón (JICA), publica en el año 2007 el "Catastro de faenas mineras abandonadas o paralizadas; análisis preliminar de Riesgo". En dicha publicación se lleva a cabo un estudio sistematizado del estado de Pasivos Ambientales Mineros (PAM) del país, a través de tres etapas fundamentales:

Recolección de datos y análisis preliminar del riesgo (en terreno), análisis de laboratorio para confirmación de la evaluación previa e ingreso de datos a un sistema de información.

En este proceso se analizaron en una etapa preliminar alrededor de 200 faenas mineras abandonadas o paralizadas, realizando visitas en base a cuatro divisiones denominadas norte grande, norte chico, zona central y zona sur (cada una con sus respectivas regiones) incorporando una evaluación ambiental y de riesgo preliminar de las instalaciones a través del diseño estandarizado de formularios de levantamiento de información de faena minera, que permitiera unificar y dar un carácter objetivo a la adquisición de datos para una cuantificación aproximada del riesgo, por contaminación o seguridad física, según una asignación de valores indicados en la ficha mencionada.

Es destacable que en esta publicación fueron identificadas, particularmente, las comunas de Andacollo, Illapel, Canela y La Serena como las que presentan mayor cantidad de pasivos ambientales mineros (PAM) en la región de Coquimbo (JICA-SERNAGEOMIN, 2007).

A la vez que se da a conocer el catastro mencionado, la opinión pública del país reacciona con fuertes críticas a las autoridades al considerar algunos PAM incluidos en la publicación, como una amenaza para la salud de la población, instando a la institucionalidad ambiental a la toma de medidas y decisiones referentes a estos potenciales riesgos a los que estarían sometidos los habitantes expuestos (Ramos, 2011).

En una primera aproximación para abordar el estudio de estos PAM, CONAMA solicita a diferentes instituciones y empresas consultoras, investigar la situación en que se encontraría la zona de Andacollo, evaluando el estado de relaves abandonados de minería de oro (en los cuales se utilizó mercurio, un elemento tóxico para los organismos vivos, para la amalgamación de metales nobles), estudios que son efectuados sin estructuras metodológicas específicas (CONAMA, 2009; MMA, 2012; Fundación Chile, 2009).

Luego de esta secuencia de hechos y en la búsqueda por mejorar la gestión ambiental de estos sitios, se solicita por medio del convenio de transferencia del año 2011 entre el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) y el Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA), un estudio preliminar que siga la lógica de metodologías internacionales de evaluación de riesgos a la salud y que permitan posteriormente concluir en un adecuado tratamiento de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes (SPPC). Las metodologías de evaluación de riesgos a la salud humana constituyen una herramienta integrada de trabajo que permiten, a partir de la evaluación de la información ambiental, toxicológica y de salud, establecer prioridades y proponer medidas de gestión costo-efectivas fundamentadas en el potencial riesgo que pasivos ambientales, en este caso mineros, pudieran implicar (MMA-CENMA, 2011).

Dado que Chile no cuenta con este tipo de metodologías descritas, se hace necesario estudiar el uso y estructura de estas herramientas establecidas en otros países con un mayor nivel de experiencia y desarrollo alcanzado en la temática, para lograr una adaptación metodológica a la realidad nacional. También revisar metodologías y recomendaciones de temas afines (ej. Muestreo). Se considera la revisión de publicaciones elaboradas por instituciones y organismos internacionales y nacionales tales como:

- EPA Environmental Protection Agency.
- OPS Organización Panamericana de la Salud.
- Gobierno vasco IHOBE.
- ASTM American Society for Testing and Materials.
- SERNAGEOMIN-BGR y Golder Associates.
- CCME Canadian Council of Ministers of the Environment.
- Resolución exenta N° 169 del Ministerio de Medio Ambiente, 2011.

1.2 Metodologías de evaluación de riesgo.

Todas las actividades, procesos y productos tienen cierto grado de peligro. Incluso las sustancias químicas presentes en el ambiente pueden ser beneficiosas o peligrosas dependiendo de muchos factores, como por ejemplo las cantidades a las que estamos expuestos. La Evaluación de Riesgos es una herramienta que apoya a los científicos y autoridades a identificar peligros serios a la salud y determinar metas realistas para reducir la exposición a tóxicos, de modo que no exista una amenaza significativa a la salud de la población (o ecosistemas, según la evaluación). Se trata de una técnica multidisciplinaria que utiliza datos toxicológicos obtenidos de estudios en animales y epidemiología humana, combinada con información del grado de exposición, todo ello para predecir de forma cuantitativa la probabilidad de que una respuesta adversa particular sea observada en una población humana específica.

La Evaluación de Riesgos provee un acercamiento sistemático para caracterizar la naturaleza y magnitud de los riesgos del ambiente asociados a la salud, por medio de la aplicación de modelos útiles para la identificación cualitativa y cuantitativa, estimación de la exposición y peligro. Esta disciplina está basada en datos experimentales, concentraciones medidas y mecanismos biológicos, lo que justifica y hace necesario el desarrollo de estudios empíricos sitio-específicos, ya que en muchos casos los datos disponibles no son los suficientes para lograr una predicción precisa (Simenov & Hassanien, 2009).

Una manera de esquematizar la presencia del riesgo en alguna población dada y que dicho riesgo por contaminación “exista”, se representa en la conjunción de tres componentes básicos:

Fuente de contaminación (“contaminante” en concentración suficiente para ser potencialmente dañino).

Receptor (Organismo vulnerable a la exposición de un “contaminante”).

Vía o Ruta de Exposición (medio que posibilitaría que un organismo receptor y algún potencial “contaminante” entren en contacto directo).

La conjunción de estos componentes se integran en la siguiente Figura 1:



Figura 1. Componentes del riesgo.

Por ejemplo, en el caso de este estudio, un relave minero (fuente de contaminación) podrá generar material particulado respirable (vía de exposición) que podría ser inhalado por la población (receptores) que viva en las cercanías.

Es importante también destacar que si cualquiera de estos tres componentes es eliminado, entonces el riesgo también se anula (riesgo = 0). En el caso del ejemplo planteado, hipotéticamente se podría confinar el relave o humedecerlo, de manera tal que no se generara material particulado, de ese modo no existiría riesgo por inhalación (eliminación de la vía de exposición, riesgo = 0). También se podría reubicar la población en un sector alejado (eliminación del receptor, riesgo = 0).

Al constatar que los tres factores están presentes (fuente, vía, receptor), entonces se realiza la evaluación del riesgo, cuantificando de manera objetiva si el riesgo se presenta en una magnitud que justifique la ejecución de medidas para su eliminación o si por el contrario es tolerable (SERNAGEOMIN-BGR; Golder Associates, 2008).

Para ejemplificar esta situación: suponiendo que la probabilidad de que ocurra un accidente fatal de tránsito fuera de 0,02 (es decir, 2 casos fatales entre 100 accidentes de tránsito). A pesar de que existe el riesgo, aun así se continúa haciendo uso del transporte vehicular, asumiendo este riesgo como un riesgo tolerable en relación al beneficio que significa disponer de dichos medios de transporte. En esta misma línea, la tolerancia para el nivel de riesgo cancerígeno permitido en USA para suelos contaminados es de $1 \cdot 10^{-6}$ (1 posible caso de aparición de cáncer entre un millón de personas expuestas) y en España es de $1 \cdot 10^{-5}$ (URS España en Taller: Análisis de riesgos para la salud humana en sitios contaminados, 2011).

Así, la Evaluación de Riesgos permite asignar magnitudes a los efectos adversos potencialmente resultantes de la exposición a sustancias del medio ambiente. Riesgo se define como la probabilidad de sufrir un daño. Si bien los términos riesgo y peligro frecuentemente se confunden, este último se refiere a la capacidad intrínseca de causar daño. Es decir, el término riesgo describe la probabilidad de que en una situación dada, una sustancia peligrosa produzca un daño (Rhim & Anaconda, 2004).

La evaluación de riesgos podrá incluir diferentes componentes ambientales, según los objetivos del estudio. Se dividen dichos componentes en el estudio de los potenciales efectos en humanos y los ecosistemas. Es por lo general denominado Evaluación de Riesgo Ecológico (ERE) al proceso de estimación de la probabilidad de que ocurran efectos adversos como producto del desarrollo de actividades humanas únicamente en los ecosistemas. Este tipo de estudios son de alta complejidad ya que incluyen una numerosa diversidad taxonómica.

Evaluación de Riesgos a la Salud (ERS) o Evaluación de Riesgos en Humanos (ERH) comprende el estudio de efectos en humanos y posee diferencias importantes con las demás evaluaciones como lo son su nivel de complejidad, al considerar efectos en una sola especie, el objetivo a proteger (ERE estudia efectos en poblaciones, mientras que ERS considera efectos a nivel individual), las variables de respuesta bien definidos en humanos y variables en evaluación a nivel ecológico y también la escala temporal y espacial del estudio.

Estudios en que se consideran ambos componentes (humano y ecosistémico), son normalmente denominados Evaluación de Riesgo Ambiental ERA. Además, el término Administración de Riesgos Ambientales ARA hará referencia a los procesos a través de los cuales se administran los posibles impactos asociados a actividades humanas, considerando la comprensión de los peligros y del sistema expuesto, como también la posibilidad de su control mediante decisiones políticas. Algunas regulaciones (como el Instructivo IPP- MR-002, 2007 del Servicio Agrícola y Ganadero de Chile) asumen ERA como evaluación del efecto en especies no-humanas, esto debido a que ERA y ERE poseen similitudes conceptuales y metodológicas (Medina en TALLER: Evaluación del Riesgo Ecológico y Ambiental, 2011).

Es preciso conocer la toxicidad del compuesto para lograr una estimación del riesgo así como también las condiciones de contacto en estudio (concentración, ruta de exposición, tiempo de contacto, etc...). (Rhim&Anaconda, 2004).

Una vez caracterizado el riesgo, cuando sea pertinente, será posible reducirlo hasta un nivel aceptable, lo cual implica en la generalidad de los casos un costo asociado y el uso de medidas apropiadas de ingeniería.

Se debe tener en cuenta que a mayor calidad, cantidad y robustez de la información adquirida, aumenta el costo de la investigación y a su vez disminuye la relación costo/beneficio en la remediación (si es que la remediación se hace realmente necesaria) (Rhim, 2011).

En general, las metodologías de evaluación de riesgos se caracterizan por estar diseñadas en etapas. En el caso de la metodología a emplear en este estudio, son contemplados tres pasos fundamentales: una primera fase de **Investigación Preliminar**, donde lo que se espera lograr es una correcta identificación de la posible fuente de contaminación y obtención de un modelo conceptual; una segunda fase de **Investigación Confirmatoria** que contempla, según la hipótesis de distribución de contaminantes elaborada para cada sitio, la obtención de datos analíticos que permitan una comparación con valores de

referencia (que a su vez condicionan la definición de sitio contaminado); y una tercera etapa y final en la cual se contempla la **Evaluación del Riesgo** como tal, donde el producto obtenido son índices de riesgo que han sido calculados de modo adecuado (de acuerdo a la información obtenida en las fases anteriores y una segunda etapa de muestreo) que permite cuantificar el riesgo de manera objetiva y proponer las medidas para tomar decisiones (Ministerio del Medio Ambiente, Res. Ex. N° 169, 2011; Rhim 2011).

Estas medidas contemplan la gestión del sitio, considerando las características propias del SPPC en estudio y la presencia/ausencia del riesgo, así como su magnitud. Dado que en general la motivación por estudiar ciertos pasivos ambientales está ligada a preocupaciones sociales, se recomienda que la comunicación del riesgo sea efectuada tanto en aquellos SPPC que presentan riesgo como también en aquellos en que el riesgo está ausente o resulta ser aceptable.

En cualquier caso si el SPPC no presenta riesgos o riesgo aceptable, este puede ser delimitado y señalizado como sin riesgo o destinado a nuevos usos. Por otro lado, los sitios que presentan riesgo deberán ser gestionados con medidas más complejas, como por ejemplo, cierre del lugar, remediación, rehabilitación, remoción, entre otros.

El siguiente diagrama de flujo de la Figura 2, proporciona una representación más acabada de las etapas explicadas anteriormente, con los aspectos y actividades que se espera ejecutar en cada fase y como éstas se interrelacionan:

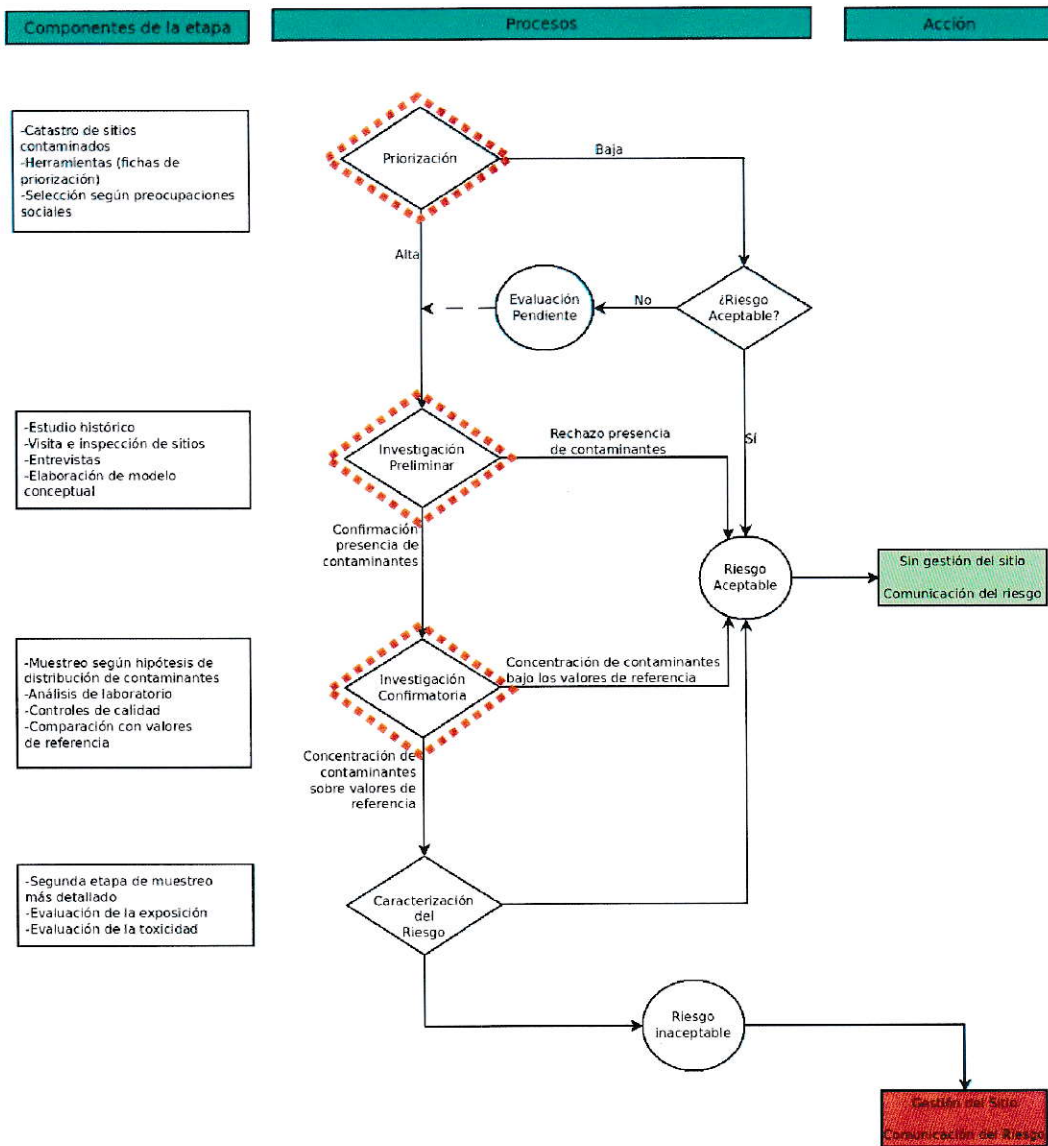


Figura 2. Diagrama de flujo para la confirmación de SPPC

Las marcas en rojo indican las etapas a ejecutar en este estudio

*En este estudio Valores Referenciales: Concentración de elementos en: muestras obtenidas de suelos sin intervención antropogénica y normas internacionales.

El proceso completo o parcial de la evaluación puede continuar con la necesidad de más información y elaboración de estudios más acabados, obligando a retomar el procedimiento desde una de las fases y reevaluar la información que se esté estimando.

1.1.1 Identificación, Inspección y Priorización de Sitios.

Los esfuerzos deben estar focalizados en áreas de estudio que presenten condiciones mínimas para considerar que han estado bajo la influencia de sustancias que puedan alterar las condiciones naturales de la zona y que a la vez sean potencialmente dañinas para la vida. En el caso de este estudio se focalizan las poblaciones humanas como objetivo de estudio, aunque siempre se podrá realizar estudios de más alta complejidad para otros componentes del ecosistema (Rhim, 2011). Factores que contribuyen a identificar sitios con sospechas de contaminación son:

- ◇ Identificación previa y evaluaciones de problemas ambientales y/o de salud producidos con anterioridad por la realización de actividades peligrosas y manejo de sustancias tóxicas.
- ◇ Localización de instalaciones reconocidas como potencialmente peligrosas.
- ◇ Catastros nacionales con información relevante.
- ◇ Accidentes, derrames o sucesos que afecten componentes ambientales.
- ◇ Denuncias previas existentes.
- ◇ Contaminación detectada de suelo, aire, agua.
- ◇ Presencia de sustancias peligrosas en la cadena alimentaria.
- ◇ Exposición ocupacional a sustancia.

Una vez identificadas las áreas de interés, deberá realizarse una visita de inspección del sitio en estudio. En esta visita se deberán corroborar aspectos considerados en el proceso de selección y así constatar o rechazar la idea de posible contaminación. Realizar un levantamiento de información lo más completo posible, registrando observaciones relevantes, entrevistando a personas involucradas, adquiriendo registros fotográficos, si es posible tomar muestras o datos analíticos en terreno (por ejemplo, equipos portátiles de análisis por Fluorescencia de Rayos-X FRX).

Uno de los pasos iniciales para enfrentar la evaluación de manera costo-efectiva, es realizar una priorización de los sitios a evaluar en base a criterios técnicos, de modo que se focalicen los esfuerzos en zonas que reúnen el mayor número de factores que lo condicionen como potencialmente peligroso, basándose en evidencias.

De este modo, una vez que se han seleccionado los sitios que presentan sospechas por contaminación, es fundamental realizar una clasificación por prioridades basándose en sistemas de apoyo que permitan un análisis comparativo, para establecer secuencias de ejecución de estudios, en vista de acciones correctivas viables. Entre las más utilizadas a nivel internacional están las Fichas de Inspección y priorización.

Las Fichas de Inspección y priorización son herramientas que permiten una cuantificación comparativa del potencial riesgo asociado al sitio por medio de la asignación de puntajes según las características de las fuentes de contaminación, las vías o rutas de exposición de los contaminantes y los receptores que podrían afectarse por la contaminación, según características únicas de cada sitio en particular evaluado. Esta valorización permite descartar o priorizar, en pos de trabajar en los sitios que presentan una mayor urgencia. Para este estudio se utilizan fichas elaboradas por el Concejo Canadiense de Ministros del Medio ambiente (CCME por sus siglas en inglés), las cuales se detallan a continuación.

Ficha de Inspección "Site Classification Worksheets" - CCME

Consiste en un procedimiento, asistido por una hoja de cálculo computacional desarrollada por el CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment) en su programa NCSCS (National Classification System for Contaminated Sites, 2008), que utiliza una metodología numérica aditiva que asigna puntaje a una serie de características del sitio en estudio. Están en formato digital y entregan un resumen final de los resultados para simplificar su registro.

Estas fichas requieren información de factores fundamentales del SPPC correspondiente; la fuente y los contaminantes, la potencial migración de los contaminantes y la exposición. Todas las características del sitio asignan puntaje, lo cual permite una cuantificación del riesgo que conlleva a una comparación y priorización en base a criterios detallados, como el nivel de precipitación anual, distancia del sitio a los cuerpos de agua, características de los contaminantes distinguiendo entre contaminantes inorgánicos, orgánicos (PAS, pesticidas, compuestos fenólicos, hidrocarburos clorados) y sus propiedades fisicoquímicas fundamentales (como solubilidad del contaminante en agua por intervalos de pH, constante de Henry, Koc para compuestos orgánicos) y otras propiedades.

En caso de no poseer la información requerida en algún punto de la ficha, de forma conservadora, se "castiga" la falta de información asignando un puntaje, lo que entrega un margen de seguridad según datos insuficientes. Cabe destacar que la priorización debe realizarse con un mínimo de información, ya que esta acepta solo un máximo de 15% de respuestas "No conocido" para poder obtener un resultado concluyente.

Finalmente, la ficha resulta en un puntaje para cada sitio entre 0 y 100, lo cual permite designar una de las categorías de priorización, que corresponden a:

- Clase 1 - Prioridad alta para acción (>70 puntos).
- Clase 2 - Prioridad media para acción (50 - 69,9 puntos).
- Clase 3 - Prioridad baja para acción (37 – 49,9 puntos).
- Clase N - Sin prioridad para acción.
- Clase INS - Si mas del 15% de respuestas son “No Conocido”.

Una vez aplicadas las fichas a los sitios en estudio, se podrá proceder con las siguientes etapas de evaluación, en aquellos que obtengan objetivamente una mayor importancia.

1.1.2 Investigación Preliminar.

La fase inicial, de Investigación Preliminar, constituye una investigación de alcance limitado la cual requiere de la revisión de antecedentes del sitio (catastros, información de organismos públicos, entrevistas, emergencias, denuncias, entre otros medios de información disponibles) con el mayor nivel de detalle que sea posible según cada caso y también una inspección en terreno. Se espera de dicha indagación evaluar la información obtenida acerca de actividades que pudieran haber generado contaminación en el sitio y en base a ello discernir sitios que presenten una baja o nula amenaza y aquellos en que es necesaria mayor información para realizar un estudio concluyente. Se presta especial atención a sustancias peligrosas utilizadas en el sitio y/o residuos; vías de migración y receptores sensibles (residentes, trabajadores, niños, visitantes, otros).

Será necesario estudiar información como: estudio histórico (usos pasados y presentes), emisión de sustancias o residuos, condiciones ambientales, población circundante, posibles rutas de migración de contaminantes, información física de la zona (geografía, clima, hidrogeología, vegetación, etc), entre otros. También una visita de campo donde se reconozca la situación en que se encuentra el sitio (usos de suelos vecinos, usos del emplazamiento, estado actual del residuo, entrevistas, evaluación general de la zona).

Con la información obtenida en los pasos mencionados, es además imprescindible elaborar modelos conceptuales, los cuales son de gran utilidad para el análisis, debido a que son modelos descriptivos de la identificación de focos primarios de contaminación (fuente); ilustra como la sustancia química de interés podría moverse (o retenerse) desde el foco hacia los componentes del ambiente y cómo se podrían incorporar en el organismo de poblaciones (rutas). También especifica tipos de poblaciones humanas que pueden entrar en contacto con el medio contaminado (receptores).

De este modo es posible contextualizar la situación en un esquema descriptivo (conocido como modelo conceptual) que constituirá la hipótesis de trabajo sobre la que se va a desarrollar el análisis de riesgos. Además, al ser construida con información “disponible” permite la identificación de una necesidad de información adicional, que aun no haya sido adquirida. El modelo conceptual debe ser revisado de forma periódica, a medida que se avanza en la investigación, ya que la obtención de datos podrá ratificar o invalidar parte de la hipótesis planteada originalmente y por consiguiente lleva a adecuar el modelo (Rhim, 2011; Sociedad Pública de Gestión Ambiental del Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente del Gobierno Vasco – IHOBE, 1998).

1.1.3 Investigación Confirmatoria.

Una vez que se han reunido datos suficientes en la Investigación Preliminar, que justifiquen un estudio más acabado del estado de la contaminación, se requiere una planificación adecuada para obtener la información que permita comprobar la hipótesis antes diseñada en el modelo conceptual (Sociedad Pública de Gestión Ambiental del Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente del Gobierno Vasco – IHOBE, 1998).

Con este objetivo, se debe elaborar un Plan de Muestreo y posterior análisis en laboratorio, utilizando metodologías de muestreo que aseguren resultados estadísticamente representativos, con un grado aceptable de imprecisión, costo, calidad y confiabilidad de los datos conseguidos y asegurando el sistema de calidad tanto en terreno como también en el análisis en el laboratorio, como se muestra en la Tabla 1 a continuación.

Tabla 1. Factores que inciden en la representatividad de los datos obtenidos

Para obtención de muestras en terreno	En el laboratorio
Diseño del muestreo	Exactitud
Tamaño de la muestra	Precisión
Tipo de muestras	Comparabilidad
Ubicación de las muestras	Sensibilidad
Procedimientos de obtención de muestras	Representatividad
Contenedores de las muestras	Aseguramiento y Control de la Calidad
Preservación y manipulación de las muestras	
Cadena de custodia	

(Fuente: Modificado de material de apoyo Alfredo Rhim)

Así, se reconocen como factores fundamentales en este punto el correcto planteamiento de la distribución de contaminantes y la planificación del muestreo.

Puesto que los datos adquiridos poseerán una cierta imprecisión, las conclusiones basadas en los datos que se obtengan no deberían extrapolarse más allá de la utilidad y calidad disponible para los mismos. Por eso es necesario determinar y documentar los criterios cualitativos y cuantitativos de los datos de muestreo y análisis.

Con los datos analíticos que se obtengan será posible corroborar o descartar la presencia y distribución de los potenciales contaminantes, por medio de la comparación de las concentraciones medidas con valores de referencia y/o valores naturales de la zona en estudio.

Además, si es posible demostrar que la concentración de los contaminantes en el sitio son inferiores o iguales a las concentraciones naturales de las mismas sustancias en un medio no contaminado, entonces no es necesario continuar con la evaluación del riesgo (es económicamente inviable una remediación en estas condiciones). Por el contrario, aquellos parámetros de interés ambiental que sobrepasen los valores detectados en muestras de suelos no intervenidos por actividad antropogénica, constituirán los elementos de mayor relevancia en el estudio (Rhim, 2011).

Suelo.

El suelo es un constituyente complejo de la naturaleza, por cuanto sufre procesos de desarrollo en una escala temporal relativamente amplia como lo es meteorización, desarrollo de microorganismos, acumulación de materia orgánica, intercambio iónico con el medio y gaseoso con la atmósfera, contenido de humedad, entre otros factores. Sus propiedades y la calidad de éste, le confieren funciones ecológicas importantes, convirtiéndolo en el sustento de los ecosistemas.

La calidad, como concepto general, se entiende como la capacidad para satisfacer requisitos específicos para cualquier objeto, proceso o sistema. De este modo, se entiende que un suelo es de calidad cuando satisface adecuadamente todos los requisitos para algún uso determinado. Por ejemplo, las condiciones de un suelo de calidad en uso agrícola no requieren ser las mismas que las condiciones de un suelo para soporte de la vida urbana.

El uso del suelo por el hombre, ha provocado grandes alteraciones de sus propiedades naturales, de modo que hoy se identifica entre los problemas ambientales globales. Entre los variados usos que deterioran la calidad del suelo se encuentra su uso como soporte de desechos mineros (Cortés y col., 2011).

En Chile, la definición de contaminación entregada en la Ley de Bases Generales del Medio Ambiente (Ley 20.417) establece que la contaminación es "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". Así, para que legalmente se considere contaminado cualquier componente ambiental, tiene que existir un estándar (o norma) que estipule cuáles son los niveles aceptados para los distintos componentes del medio (Ley N° 19.300, 1994; Ley N° 20.417, 2008).

Al presente, Chile no dispone de un estándar o norma primaria que establezca cuáles son los niveles aceptados de distintos elementos y compuestos químicos en un suelo, que permitan declararlo “de calidad” para un determinado uso, sin que represente un riesgo para la salud humana. Por lo que, en virtud de la normativa vigente, no sería posible hablar de contaminación del suelo en el territorio chileno (Cortés y col., 2011).

Sin embargo, en ausencia de normas de calidad ambiental, el Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) en su artículo N° 7 establece que “las normas de calidad ambiental y de emisión que se utilizarán como referencia para los efectos de evaluar si genera o presenta el riesgo indicado en la letra a) y los efectos adversos indicados en la letra b) ambas del artículo 11 de la Ley, serán aquellas vigentes en los siguientes Estados: República Federal de Alemania, República de Argentina, Australia, República Federativa de Brasil, Confederación de Canadá, Reino de España, Estados Unidos Mexicanos, Estados Unidos de Norteamérica, Nueva Zelandia, Reino de los Países Bajos (Holanda), República de Italia, Japón, Reino de Suecia y Confederación Suiza.

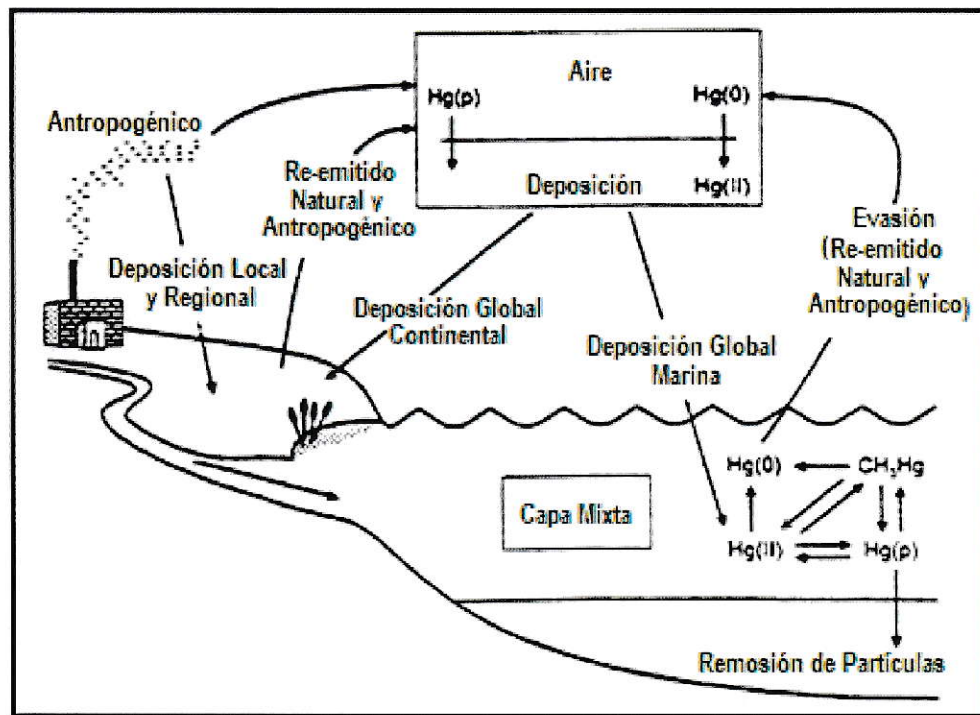
Para la utilización de las normas de referencia, se priorizará aquel Estado que posea similitud, en sus componentes ambientales, con la situación nacional y/o local (Ministerio Secretaría General de la Presidencia: Reglamento SEIA, 1997).

No obstante, no se debe perder de vista que el objetivo del reglamento del SEIA es utilizar la normativa de estos países como antecedentes para establecer si un determinado proyecto debe ser sometido a una Evaluación de Impacto Ambiental (artículo N° 11) y no como una norma de calidad ambiental.

En términos generales, se acepta como contaminación del suelo la introducción de elementos extraños al sistema suelo o la existencia de un nivel inusual de uno propio que, por sí mismo o por su efecto sobre los restantes componentes, genera un efecto nocivo para los organismos del suelo, sus consumidores, o es susceptible de transmitirse a otros sistemas (Seoanez Calvo y col. 1999).

En este estudio en particular, se seleccionan como de interés los elementos mercurio, arsénico y plomo. Ello, por estar consistentemente asociados a minerales de menas explotadas en la minería típica de Chile (cobre, oro y plata), por haber evidencias previas de su presencia en los pasivos ambientales en evaluación y principalmente por sus potenciales efectos tóxicos, tratándose de elementos cuyo sumidero son los suelos y sedimentos, acumulándose en sistemas ambientales.

Esta situación se advierte, por ejemplo, en el ciclo global del mercurio, esquematizado en la Figura 3 a continuación. Los cambios químicos que le ocurren al mercurio se deben a factores ambientales tales como efectos de la luz $h\nu$, ozono atmosférico (como oxidante), actividad bacteriana, agentes precipitantes (principalmente sulfuros), entre otros (EPA, 1997):



Fuente: Adaptado de Mason, R.P., Fitzgerald, W.F., and Morel, M.M. 1994. The Biogeochemical Cycling of Elemental Mercury: Anthropogenic Influences. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58(15):3191-3198 en EPA, 1997.

Figura 3. Ciclo Global del Mercurio.

Este grupo de elementos no son tóxicos en su forma elemental (excepto el vapor de mercurio), sino más bien como cationes y/o enlazados en cadenas cortas de carbono (por ejemplo, metil-mercurio conocido compuesto de alta toxicidad y movilidad a través de tejidos, con bajo nivel de eliminación). Su principal mecanismo de acción como tóxicos, es debido a una fuerte afinidad por los grupos -SH (sulfhidrilo), los cuales están presentes en enzimas de regulación metabólica en los organismos vivos (humanos). Al generarse el enlace metal-azufre se presenta una alteración en el normal funcionamiento de las enzimas, afectando de esta manera la salud de los organismos. El nivel de toxicidad dependerá de la forma química del elemento (especiación) y su biodisponibilidad en medios ambientales (acuoso, sedimento u otros) como pH, cantidades disueltas, materia orgánica complejante disponible, entre otros. Además, los elementos tóxicos pueden biomagnificarse, es decir, su concentración puede aumentar a través de la red trófica (Baird, 2004).

En cuanto a las patologías asociadas al mercurio, se han observado trastornos neurológicos y de comportamiento en los seres humanos debido a inhalación de vapor de mercurio elemental, como también ingestión o aplicación cutánea de mercurio inorgánico y la ingestión de alimentos contaminados. De entre los síntomas neurotóxicos reportados son: temblores, labilidad emocional, insomnio, pérdida de memoria, cambios neuromusculares, dolores de cabeza, polineuropatía, y déficit de rendimiento en las pruebas de la función cognitiva y motora (OMS, 2003).

Los síntomas inmediatos (efectos agudos) de intoxicación por arsénico incluyen vómitos, dolor abdominal y diarrea, le sigue un entumecimiento de extremidades, calambres musculares. Mientras que a largo plazo se han observado cambios en la pigmentación y lesiones en la piel, como también parches de engrosamiento cutáneo en palmas y plantas de los pies (hiperqueratosis). Además, puede ser causante de cáncer de piel, vejiga y/o pulmones, puede causar efectos sobre el desarrollo, neurotoxicidad, diabetes y enfermedades cardiovasculares (OMS, 2012).

Por último el plomo, como efectos de exposición agudos, puede causar trastornos gastrointestinales (anorexia, náuseas, vómitos, dolor abdominal), daño hepático y renal, hipertensión y efectos neurológicos (malestar general, somnolencia, encefalopatía) incluso puede dar lugar a convulsiones. La exposición crónica al plomo suele causar efectos hematológicos, como la anemia o trastornos neurológicos, incluyendo dolor de cabeza, irritabilidad, letargo, convulsiones, debilidad muscular, ataxia, temblores y parálisis. Existe cierta evidencia de que la exposición a largo plazo puede potenciar el desarrollo de cáncer (OMS, 2010).

Comparación con normas internacionales y valores de suelos no intervenidos

Dado que Chile no posee Normas de Calidad para suelos, no es posible definir suelos como contaminados o de calidad no aceptable. Dos alternativas para obtener conclusiones respecto de la calidad de los suelos son:

- ◇ Comparación con normativas internacionales
- ◇ Evaluación de la magnitud en que las sustancias químicas encontradas en los SPPC superan las concentraciones medidas en muestras obtenidas de sitios no intervenidos ("valores base"), en este caso, por actividad minera.

En este estudio se considerarán los valores de concentraciones que entregan las siguientes normativas internacionales:

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

Las comparaciones directas Valores de Referencia usados en distintos países se debe realizar si se tiene un entendimiento adecuado de los escenarios de exposición (y niveles de riesgo objetivo) asumido para su derivación y también el contexto en el que los criterios son utilizados. A continuación se entrega una breve reseña de las normas a utilizar y los valores de concentración que contienen estas últimas.

Criterio Canadiense establecido para calidad de suelos por la Guía "Normas Canadienses de la Calidad del Suelo para la Protección de la Salud del Medio Ambiente y los Humanos" (Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health)

Esta guía Canadiense proporciona valores de concentración de diversos parámetros para distintos escenarios de uso de suelos. Están divididos en dos secciones, la primera de ellas corresponde 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 2.

Tabla 2. 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

Criterio Australiano para la calidad de suelos establecidos por el Departamento Medioambiental y Conservación: "Niveles para Evaluación de Suelos, Sedimentos y Agua, 2010" (Assessment Levels for Soil, Sediment and Water, 2010).

El "Assessment levels for Soil, Sediment and Water" de Australia, contiene valores de concentración de diversos parámetros, entregando datos para investigación de nivel ecológico y otra división para investigación a nivel de la salud (en el contexto de evaluaciones de riesgo). En la Tabla 3 se entregan los valores para investigación en salud, en los diferentes escenarios de uso de suelo para población expuesta que entrega la norma.

Tabla 3. 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

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, en la Tabla 4, se presentan los valores de concentración para los diferentes parámetros que se evalúan en este estudio, según la norma de México:

Tabla 4. 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

Valores orientadores para suelos en el estado de Sao Paulo, 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 Paulo, 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 Paulo.

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 Paulo. 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 5 a continuación se presentan las concentraciones permitidas de los parámetros en estudio, para los diferentes valores orientadores antes explicados.

Tabla 5. Valores orientadores para suelos en el estado de Sao Paulo, Brasil

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

Criterios establecidos para calidad de suelos en la Comunidad Autónoma del País Vasco, España.

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

Tabla 6. Valores límites para considerar un suelo alterado según usos del suelo en la Comunidad Autónoma del País Vasco

Uso de Suelo					
Parámetro (mg/Kg)	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

Concentraciones naturales de elementos en Suelos de las zonas de referencia (Valor base)

Chile no dispone de un estudio nacional tipo "línea base" que establezca niveles de elementos presentes en los suelos sin intervención antropogénica. 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 que se encuentren con un nivel poco significativo de intervención antropogénica. Esto debe ser realizado por cada zona en estudio, no deben extrapolarse datos de un área, en otras de diferentes características.

En este caso se tomarán muestras en zonas cercanas a las de estudio, donde no existe actividad minera. La elección de los puntos de muestreo se basa en el hecho de que la zona norte del país presenta suelos poco desarrollados y es posible identificar la composición descrita en cartas geológicas de SERNAGEOMIN, que describen las características y clasificación de las zonas en que se emplazan los relaves en estudio, permitiendo seleccionar puntos de características similares a los lugares donde se han depositado los residuos.

1.1.4 Caracterización del Riesgo.

Para realizar la evaluación se deberán identificar los contaminantes críticos determinando la importancia de los niveles de concentraciones medidas comparadas con valores de referencia que sean procedentes, empleando indicadores nacionales o internacionales validados. Un ejemplo es la Guía de Evaluación para Medios Contaminados (EMEG por su sigla en inglés de ATSDR) que promueve la comparación de la concentración con valores de referencia utilizando la dosis a la cual el contaminante no causaría daño como MRL Minimal Risk Level de ATSDR o RfD Reference Dose de EPA, los cuales pueden ser adquiridos de publicaciones electrónicas en línea. Su adquisición en ciertos casos puede tener algún grado de dificultad, ya que algunos valores no están fácilmente disponibles ya sea por falta de estudios o por encontrarse en matrices o medios poco comunes. La relación que describe el modo de cálculo de EMEG y algunos valores referenciales se muestran en la Ecuación 1 a continuación:

$$EMEG = \frac{RfD \text{ (mg/kg/día)} \times PC}{TI \text{ (kg ó L/día)}} \quad 1$$

Donde:

RfD de cada sustancia se puede obtener del banco de datos IRIS del sistema TOXNET; MRL puede obtenerse de la bibliografía publicada por ATSDR ambas en sistemas públicos en línea de internet.

PC = Peso corporal (ej. PC infante = 10 kg; niño(3-6 años)= 14 kg; adulto = 70 kg)

TI = Tasa de ingestión diaria (ej. TI agua = 1 litro/niño y 2 litros/adulto; suelo = 350 mg/niño y 50 mg/adulto; polvo = 35 mg/niño y 5 mg/adulto).

EMEG no debe ser utilizada como norma ambiental ya que no incluye factores de exposición (ej. índice de biodisponibilidad, absorción, temporalidad y otros), por ello es un factor conservador, que busca prevenir el máximo riesgo (Díaz, 1999).

Los valores de tasa y peso entregados aquí corresponden a los sugeridos por la normativa de OPS, pero cabe destacar que estos pueden ser modificados utilizando algún otro referente válido y con la debida justificación.

También pueden ser utilizados valores referenciales de normas. Luego, serán definidos como contaminantes críticos aquellos que presenten concentración en alguno de los medios del ambiente que supere a la EMEG o valor de referencia empleado.

También lo serán aquellos que sean de preocupación social, los que presenten efecto aditivo con otro de los tóxicos presentes en el sitio, compuestos tóxicos persistentes o para los que exista evidencia de exposición.

Una vez identificados los contaminantes críticos, es posible continuar con la estimación del riesgo a través del análisis dosis-respuesta, la estimación de la exposición y la caracterización del riesgo.

Los valores de referencia (RfD/MRL) permiten realizar el análisis dosis-respuesta ya que están definidos a niveles no nocivos de concentración de elementos. Ello implica que si una sustancia se presenta a un nivel de concentración similar al de referencia, ésta no deberá representar riesgos y no se presentarán respuestas adversas por parte de la población expuesta en estudio (Díaz, 1999).

En este contexto es importante destacar que los Valores de Referencia publicados por instituciones reconocidas en la materia han sido en general derivados de valores de nivel adverso no observable NOAEL (por su sigla en inglés) desde literatura técnica o científica. De no estar disponible puede ser derivado de otras concentraciones asociadas a efectos, como el nivel mínimo de efecto adverso observable LOAEL crónicos, subcrónicos o agudos incorporando usualmente factores modificadores o de incertidumbre. EPA los denomina actualmente factores de ajuste y recomienda dividir por un valor igual a 10 para derivar valores NOAEL a partir de valores LOAEL (Rhim & Anacona, 2004)

Luego, en la fase de estimación de la exposición, se busca evaluar la dosis de contaminante que está siendo absorbida por la población expuesta (a nivel de individuo, utilizando características generales). En dicha fase se consideran matrices del medio para los cuales se tengan datos analíticos (normalmente datos atmosféricos son los más complejos de obtener), evaluando a través de concentraciones mínima/máxima o promedio, análisis por vía de exposición e identificación de grupo poblacional más vulnerable del estudio (en general niños y adultos mayores) y los datos a utilizar pueden provenir de referencia científica y/o estudio sitio específico.

La ecuación general utilizada en estos casos es la Ecuación 2:

$$\text{Dosis (mg/kg/día)} = \frac{\text{Conc} \times \text{TI}}{\text{PC}} \times \text{FE} \quad 2$$

Donde: Dosis = Dosis de exposición a estimar/ Conc.= Concentración del contaminante en el medio / TI = Tasa de ingestión diaria / PC= Peso corporal / FE =Factor de exposición.

La Ecuación 2 citada, puede ser desarrollada y modificada incorporando multiplicadores que sustituyan el factor de exposición, confiriéndole mayor especificidad a la ecuación 2. Ello, integra información de las sustancias, según las rutas de contacto significativas, obteniendo resultados de un nivel más detallado según lo que se esté estudiando. Pueden incluso presentarse rotuladas en base a otras nomenclaturas, como se presenta a en la Ecuación 3:

$$I = \frac{C \times CR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad 3$$

Donde:

I (intake) = Ingestión de contaminante (dosis suministrada) (mg/kg/día)
 C= Concentración de contaminante en punto de exposición (mg/L o mg/m³ o mg/kg)
 CR (contact rate) = Tasa de contacto (L/día o m³/día o kg/día)
 EF (exposure frequency) = Frecuencia de exposición (días/año)
 ED (exposure duration) = Duración de la exposición (años)
 BW (body weight) = Peso corporal (kg)
 AT (averaging time) = Tiempo de Promediación (días)

La concentración (C) corresponde al límite superior de confianza del 95% de la media aritmética de las concentraciones en el punto de contacto durante el período de exposición (UCL 95% por su sigla en inglés, detallado más adelante), de valores analíticos obtenidos en forma representativa en el sitio de estudio, a través de un muestreo ambiental planificado. En caso de no contar con mediciones de concentración en el punto de contacto, se pueden hacer estimaciones usando modelos de transporte y distribución ambiental "fate models" (Ej. aguas subterráneas: utilizar modelos hidrogeológicos; compuestos orgánicos volátiles emitidos a la atmósfera: modelo gaussiano de difusión). En general, el nivel de esfuerzo empleado en la obtención de datos dependerá de la severidad estimada del riesgo y del tipo de evaluación desarrollada (preliminar o detallada).

Si se dispone de datos estadísticos de Tasa de Contacto (CR), la cual representa la cantidad de medio contaminado contactado por unidad de tiempo o por evento, se utilizará el límite superior de confianza 95% del promedio (UCL 95%). De lo contrario se utilizan datos tabulados (que provendrán de análisis estadísticos de poblaciones generales).

La frecuencia y la duración de la exposición (EF y ED respectivamente) son las variables que se utilizan para calcular el tiempo total de exposición de la población en estudio y dado que, en general, no existen datos estadísticos de sitios específicos se pueden obtener valores estadísticos nacionales, utilizando valores conservadores para el tiempo de exposición. (Ej. Periodos de 30 años para el caso de residentes ó 70 años como expectativa de vida). Deben ser consistentes con las tasas de contacto seleccionadas (tiempos de duración y unidades).

Actualmente la opinión científica establece que hay diferencias entre los mecanismos de acción para sustancias cancerígenas y no-cancerígenas, suponiendo que la exposición a cancerígenos es esencialmente el mismo si hay una alta exposición en poco tiempo como si la exposición es baja por un tiempo prolongado. Para ajustar esta diferencia se utiliza el Tiempo de Promediación (AT), cuya selección dependerá del efecto tóxico a evaluar, calculando dosis de cancerígenos a través del promedio de dosis total acumulada en período vital y los no-cancerígenos promediando sobre el período de exposición.

La integración de estos factores permitirá ajustar la ecuación en otras más complejas por vía de exposición y caso particular de estudio al estimar dosis de exposición. Empleando las concentraciones medidas en el momento de la investigación de sitio, es deber proyectarse al considerar escenarios de uso futuro como lo son industrial, recreacional, agrícola y otros. Como ejemplo, para usos industriales se considera la exposición habitual de los trabajadores a suelos superficiales, sedimentos y aguas superficiales potencialmente contaminados, considerando acción mecánica sobre dichos suelos y sedimentos por el tráfico de maquinaria pesada o vehículos emitiendo material particulado, ello sin considerar uso de elementos de protección personal o medidas de seguridad. Usos recreacionales son de corta duración y esporádicos.

En este estudio interesa principalmente uso residencial, el cual es el uso que se proyecta a futuro para los sitios en estudio, en que se considera un contacto frecuente de la población con los medios contaminados (suelos, sedimentos, aguas) por lo que se calcula la exposición para período vital, incluyendo receptores adultos y niños. Para usos agrícolas se considera el escenario residencial sumado al consumo de alimentos posiblemente contaminados.

Para la realización de los cálculos en este informe se utilizan factores de exposición publicados principalmente por EPA aceptados como valores a emplear por defecto cuando no hay información específica disponible para el sitio y población a evaluar. Se incluye en las tablas a continuación, solo el factor de exposición residencial debido a que corresponde al identificado como escenario para la población en el presente estudio.

En la exposición a potenciales contaminantes de suelos se consideran en general las vías: ingestión accidental, inhalación, contacto dérmico e ingestión de productos agrícolas, las que se resumen en la siguiente Tabla 7:

Tabla 7. Escenario de uso de suelo y tipo de exposición.

VÍA DE EXPOSICIÓN	VÍA DE EXPOSICIÓN			
	RESIDENCIAL	INDUSTRIAL	RECREACIONAL	AGRÍCOLA
Ingestión Accidental	Si	Si	Si	Si
Inhalación	Si	Si	Si	Si
Contacto Dérmico	Si	Si	Si	Si
Ingestión de Vegetales	No	No	No	Si
Ingestión de Carne	No	No	No	Si
Ingestión de Leche	No	No	No	Si

A continuación se presentan las variables a utilizar para el cálculo de exposición a suelos potencialmente contaminados por **ingestión accidental** en uso residencial de sitio en evaluación en la Ecuación 4 y en la Tabla 8:

$$\text{Dosis} = \frac{C_{\text{suelo}} \times \text{EF} \times \text{FI} \times \text{ED} \times \text{IR}_{\text{adulto,niño}} \times \text{CF}_1}{\text{BW}_{\text{adulto,niño}} \times \text{AT} \times \text{CF}_2} \quad 4$$

Tabla 8. Variables para exposición a suelos por ingestión accidental en uso residencial de sitios.

PARÁMETRO	UNIDAD	RESIDENCIAL	PARÁMETRO	UNIDAD	RESIDENCIAL
Concentración en suelo, C_{suelo}	mg/kg	Específico para cada contaminante	Tasa de ingesta suelo, IR	mg/día	100 (adulto) 200 (niño) (U.S. EPA, 1991b)
Factor conversión CF_1	kg/mg	10^6	Peso corporal, BW	kg	70 (adulto) 15 (niño) (U.S. EPA, 1991b)
Frecuencia exposición, EF	días/año	350 (U.S. EPA, 1989a)	Factor de conversión CF_2	días/año	365
Fración de ingestión de la fuente contaminada, FI	adimensional	Sitio específico; en ausencia de info emplear FI=1	Período vital, LT	años	70 (U.S. EPA, 1989a)
Duración de exposición, ED	años	24 (adulto) 6 (niño) (U.S. EPA, 1989a)	Tiempo Promediación, AT	años	LT (cancerígeno) ED (no cancerígeno)

A continuación se presentan las variables a utilizar para el cálculo de exposición a suelos potencialmente contaminados por **contacto dérmico** en uso residencial de sitio en evaluación, en la Ecuación 5 y la Tabla 9:

$$\text{Dosis} = \frac{C_{\text{suelo}} \times \text{CF}_4 \times \text{SA} \times \text{ABS} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{CF}_2 \times \text{BW} \times \text{AT}} \quad 5$$

Tabla 9. Variables para la exposición a suelos por contacto dérmico en uso residencial de sitios.

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

La vía de exposición inhalatoria no está considerada en este estudio, debido a la falta de mediciones de concentración atmosférica de los contaminantes evaluados.

Por último las conclusiones finales estarán determinadas por la **caracterización del riesgo**. Ésta debe ser calculada para efectos cancerígenos y efectos no cancerígenos (en ambos casos se estima riesgo individual y luego poblacional) para luego definir si el riesgo es tolerable o no.

En el caso de **riesgo no cancerígeno** (o no umbral) se calcula el Cociente de Peligro HQ (Hazard Quotient por su sigla en inglés) de la siguiente forma (RfD o MRL en Ecuación 6):

$$HQ = \text{Dosis} / \text{RfD} \quad 6$$

A partir de HQ calculado para diferentes rutas (un mismo contaminante) se estima posteriormente el Índice de Peligro HI (Hazard Index por su sigla en inglés), como la sumatoria de los cociente de peligro individuales y por período de exposición (crónicos o agudos), como se muestra en la Ecuación 7:

$$HI = HQ_1 + HQ_2 + HQ_3$$

7

Si $HI > 1$ se considera que el sitio podrá presentar efectos adversos umbrales (no cancerígenos, tóxicos), entre mas alto el valor, mayor es el efecto adverso. Se debe considerar las contribuciones de cada sustancia por separado y/o segregar los compuestos por efecto y mecanismo de acción (y derivar HI para cada grupo).

Existen respuestas del tipo aditivas (suma de respuestas individuales), sinérgica (respuesta mayor que la esperada por aditividad) y antagónicas (dos sustancias interfieren en sus acciones, la cual es poco frecuente si no ha sido aplicado en forma de antidotos).

En el caso de **riesgo cancerígeno** (efectos no umbrales, genotóxicos) se utilizan los factores:

SFO (Slope Factor Oral por su sigla en inglés) también llamada Factor de Potencia Carcinogénica (FPC) o Factor de Pendiente (FDP) - Corresponde a dosis $(\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{dia})^{-1}$.

URF (Unit Risk Factor por su sigla en inglés) también llamado Factor de Riesgo Unitario (FRU) – Corresponde a concentración $(\mu\text{g}/\text{L}$ o $\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$.

En el cálculo para vía oral y dérmica se multiplica la dosis de exposición por FPC/FDP (o SFO por sus siglas en inglés), obteniendo como resultado el riesgo individual denominado ELCR (por sus siglas en inglés Excess Lifetime Cancer Risk) o RECV Riesgo Extra de Cáncer de por Vida (se puede considerar factores de exposición; ej. un trabajador expuesto por dos años a cancerígeno, el producto de la multiplicación dosis x FPC se multiplica luego por 2/70). Luego se obtiene la Ecuación 8:

$$\text{ELCR} = \text{SFO} \times \text{DOSIS}$$

8

De este modo se estima el riesgo como el incremento en la probabilidad de que un individuo desarrolle el efecto durante su período vital como resultado de la dosis suministrada por la exposición a un agente cancerígeno.

Dependerá de la legislación en cada país determinar cuál es el incremento en el riesgo de cáncer permisible, en general se acepta $1 \cdot 10^{-6}$, $1 \cdot 10^{-5}$, $1 \cdot 10^{-4}$. Para este estudio se seleccionará $1 \cdot 10^{-4}$ debido a la falta de legislación en Chile en este ámbito. Esto significa que el riesgo adicional de que un individuo desarrolle cáncer es de **1 en diez mil personas, lo cual constituye la alternativa más permisiva.**

A continuación, en la Figura 4, se incorpora un diagrama que resume los pasos anteriormente explicados para abordar una evaluación de riesgos:

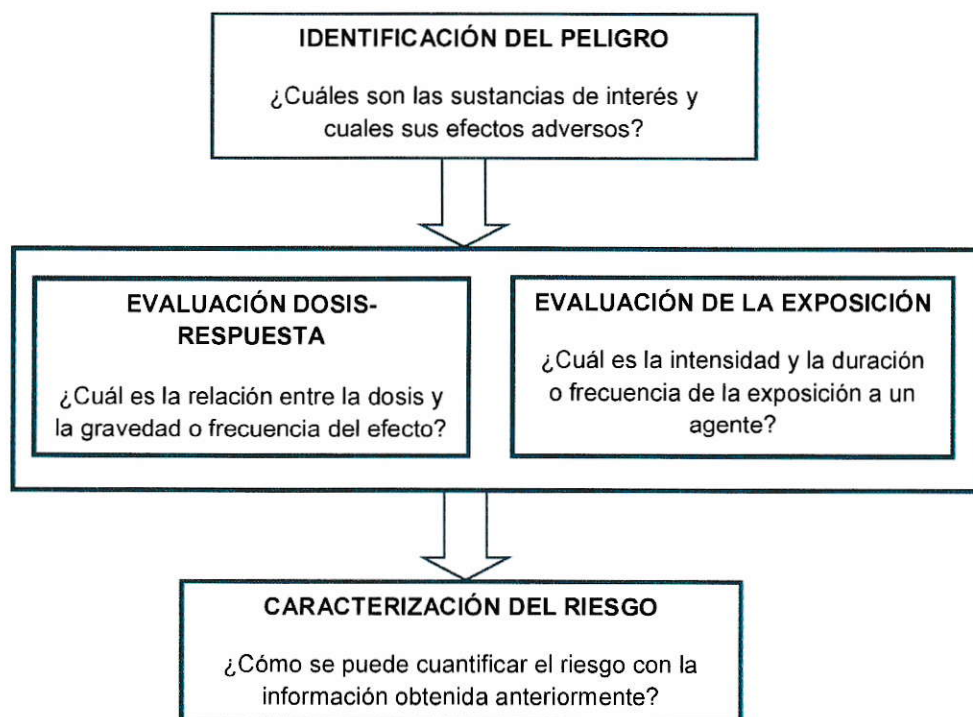


Figura 4. Diagrama resumen del proceso de evaluación de riesgos.

1.3 Actividad minera en Illapel y Sitios evaluados: Zona de estudio.

La comuna de Illapel, ubicada en la Provincia de Choapa, Región de Coquimbo se ha caracterizado desde tiempos coloniales por presentar una importante actividad minera. Antiguamente los sectores de Lavaderos, Aucó y Farellón Sánchez albergaron las principales producciones mineras de la zona, en las que se procesó oro y plata. En la actualidad, una parte importante de la actividad minera se ha desarrollado en las cercanías de la ciudad de Illapel, encontrándose numerosas faenas en las orillas del río Illapel y del estero Aucó, incluyendo explotación de cobre. Muchas de estas faenas mineras corresponden o correspondieron a explotaciones artesanales realizadas por agrupaciones de pirquineros, quienes buscan comercializar posteriormente el mineral o concentrado obtenido en plantas de procesamiento (Chávez, 2010). Esto ha generado la existencia de relaves a orillas de los cursos de agua y cercanos a los habitantes de la comuna, por lo cual resulta necesario comenzar el proceso de evaluación de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes (SPPC) con vistas a determinar el eventual riesgo de estos pasivos ambientales. En las imágenes a continuación (Figura 5, 6 y 7) se presentan algunos SPPC presentes en la zona. (Nota: En la comuna hay otros SPPC de sitios de minería activa y abandonada, los cuales no están incluidos en la figura).

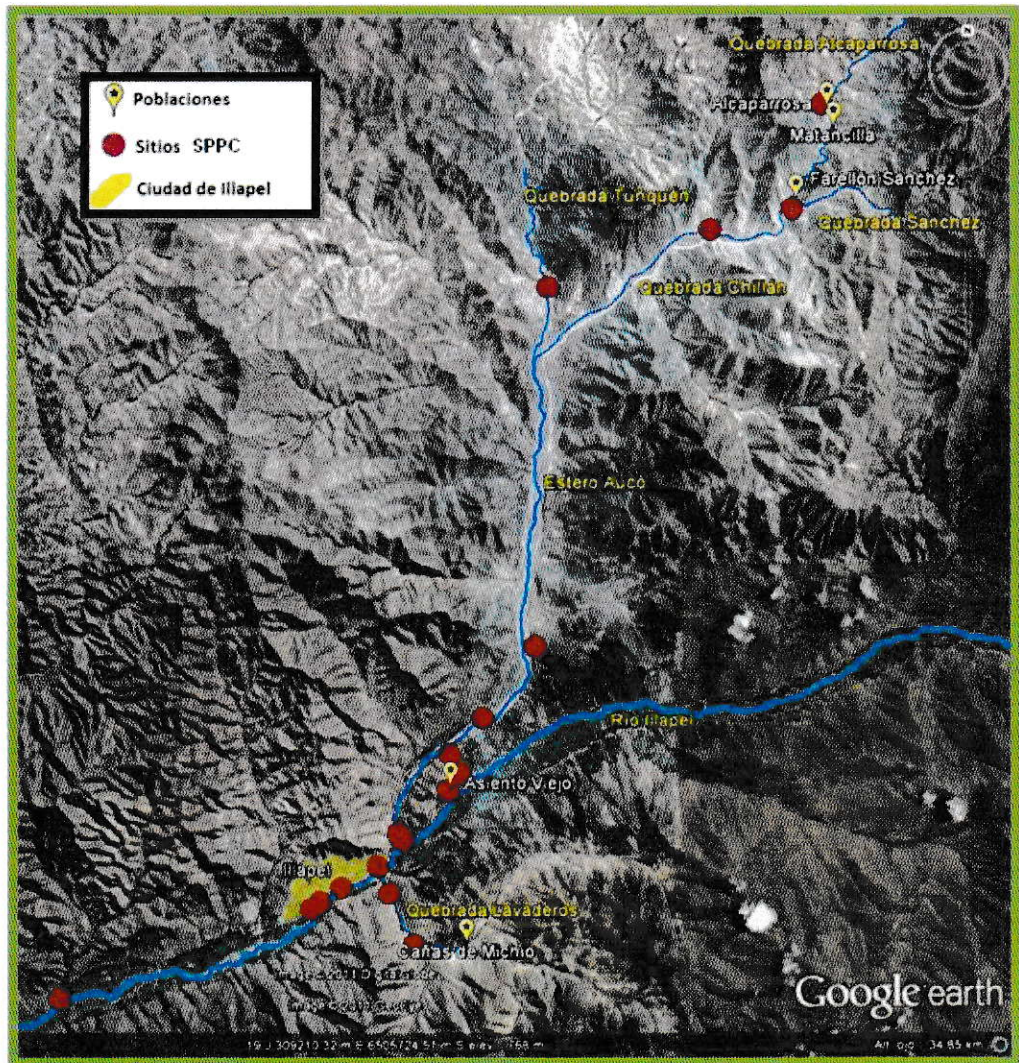


Figura 5. Principales sectores poblados en la comuna de Illapel que presentan mayor cantidad de residuos mineros activos o abandonados. Destaca la proximidad de los mismos a los cursos de aguas.

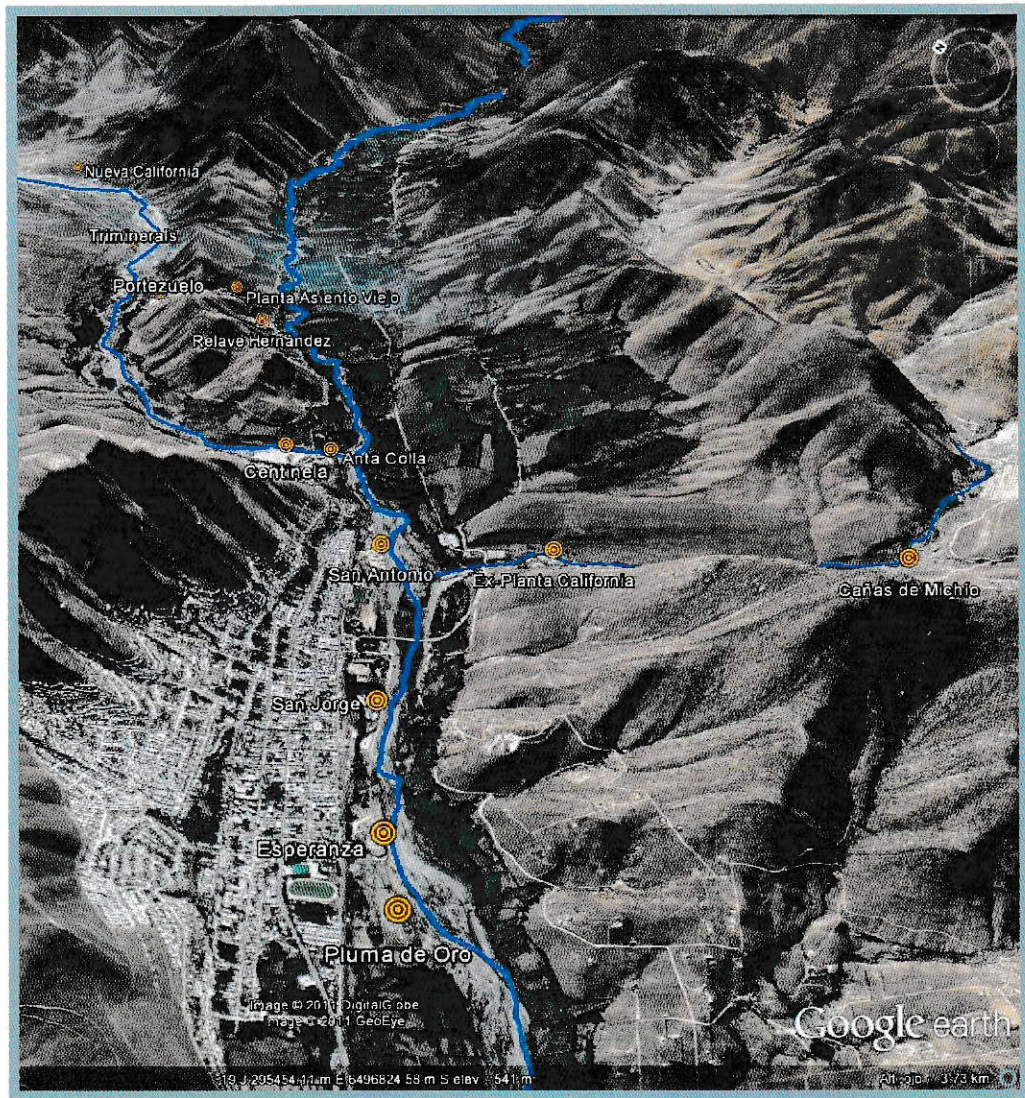


Figura 6. Vista general de relaves presentes en el sector de Illapel. Versión ampliada de la sección inferior izquierda de la Figura 5, correspondiente al sector urbano de Illapel.

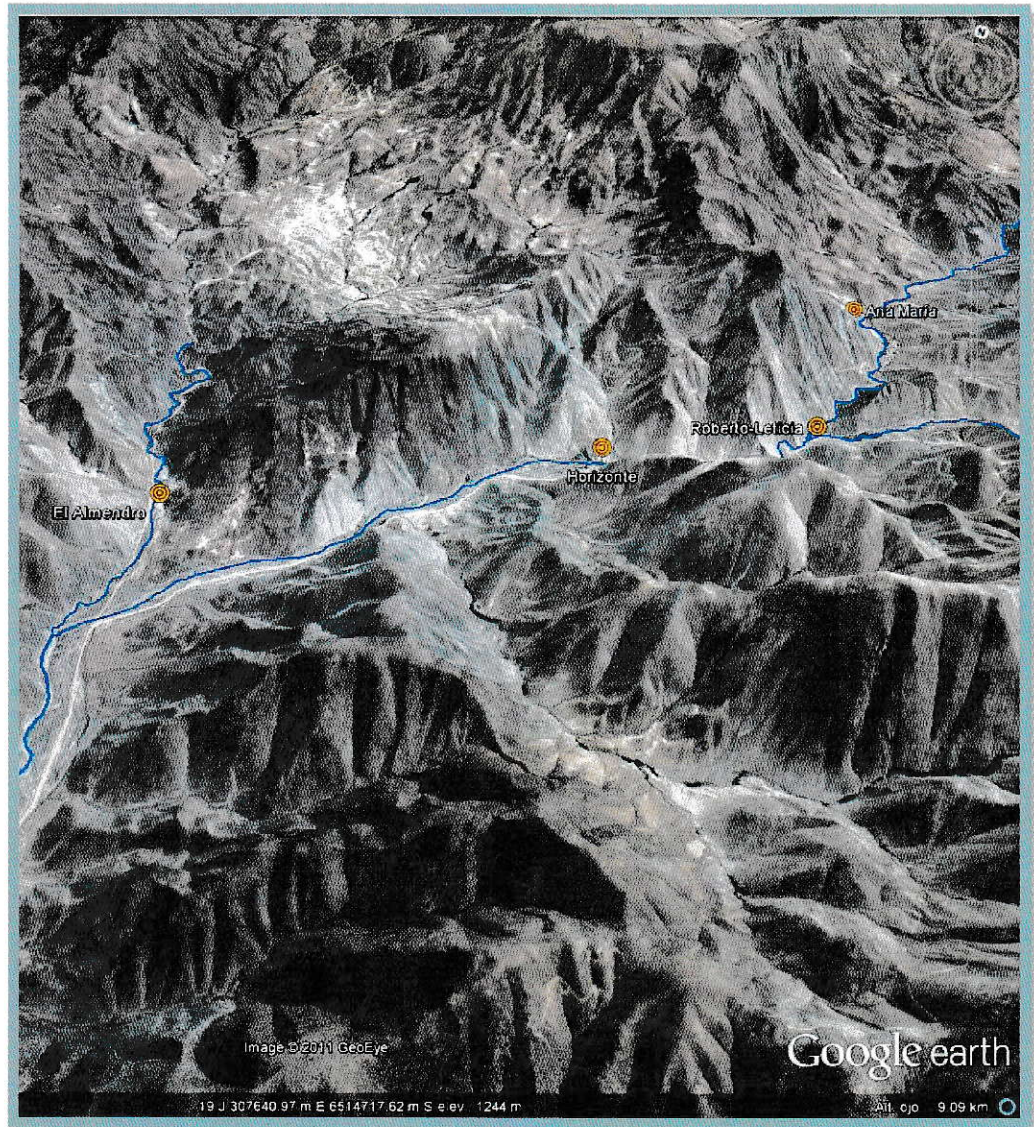


Figura 7. Vista general relaves presentes en sector Aucó. Versión ampliada de sección superior derecha de la Figura 5, correspondiente al sector rural estero Aucó, río arriba, donde se encuentran caseríos.

1.4 Hipótesis.

Existe un enriquecimiento en mercurio (Hg), arsénico (As) y plomo (Pb), respecto de las concentraciones de los suelos no intervenidos por la actividad minera, en componentes ambientales de la comuna de Illapel, lo que podría constituir un riesgo para la salud de la población.

1.5 Objetivos.

1.5.1 Objetivo General.

Desarrollar las etapas de Identificación, Priorización, Investigación Preliminar y Confirmatoria en sitios potencialmente contaminados atribuibles a la minería metálica histórica y actual circundante, asociados a los asentamientos humanos de Illapel, para una evaluación preliminar de riesgos a la salud de grupos poblados.

1.5.2 Objetivos específicos.

- ◇ Identificar SPPC para planificar y ejecutar una visita de inspección a los SPPC seleccionados de minería metálica inactivos y activos que no han ingresado al SEIA, ubicados en la comuna de Illapel.

- ◇ Recopilar información de los SPPC seleccionados, respecto de ubicación, condiciones naturales, rutas de contaminación, potenciales receptores, posibles sustancias contaminantes presentes, entre otros aspectos.

- ◇ Realizar visitas a terreno, aplicar fichas de inspección en los SPPC, recolección de muestras representativas y obtención de información relevante, para una posterior sistematización de información atingente que permita la priorizar sitios (puntaje de fichas, contenidos de elementos y otros).

- ◇ Priorizar y delimitar los sitios de cada SPPC en evaluación, diseñar modelos conceptuales y planteamiento de hipótesis de distribución de contaminantes.

- ◇ Desarrollar una Investigación Confirmatoria para los SPPC priorizados en estudio.

- ◇ Planificar estadísticamente campañas de muestreo de componentes ambientales y contaminantes potencialmente presentes de acuerdo a fuentes, incluyendo análisis en terreno.

- ◇ Evaluar cuantitativa/semicuantitativamente la presencia de contaminantes en sitios de minería metálica circundantes y rutas de contaminación priorizadas.

- ◇ Analizar en el laboratorio los contenidos de elementos y otros parámetros relevantes.

- ◇ Comparar resultados con muestras de suelos representativos, sin intervención por actividad minera y comparación con normativa ambiental aplicable vigente y valores de referencia internacionales.

II. MATERIALES Y MÉTODOS.

Los análisis de laboratorio son efectuados en el Laboratorio de Química Ambiental del Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA). Dicho laboratorio cuenta con acreditación por parte de INN (Instituto Nacional de Normalización, entidad legalmente facultada para acreditaciones) de la Norma NCh-ISO17025 la cual establece los requisitos generales relativos a la competencia técnica de los laboratorios de ensayo y calibración. A su vez cuenta con certificaciones por parte de ABS Quality de la norma ISO 9001-2008 que establece los requisitos para el sistema de gestión de la calidad. Ello, implica que los análisis realizados en el presente estudio han sido sometidos a procedimientos previos de validación y cuentan con protocolos descritos de análisis.

A su vez se medirán parámetros *in-situ* como: temperatura, pH y conductividad eléctrica (en el caso de muestras de agua).

Los análisis realizados por el equipo de investigación son:

Contenido de elementos arsénico y plomo por ICP-OES

La determinación de elementos, se realiza según procedimiento ILMAL-019 del Laboratorio de Química Ambiental de CENMA. El mismo consiste en la digestión ácida asistida por microondas de una porción adecuada de las muestras sólidas homogenizadas y sin humedad (0,30 g aprox.), la solución resultante es filtrada y aforada a un volumen de 25mL con ácido nítrico diluido, el cual provee un pH ácido con el objetivo de mantener los elementos en fase disuelta. La solución es aspirada en un espectrómetro de plasma inductivamente acoplado Perkin Elmer modelo Optima 3300 XL (Figura 8), 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.



Figura 8. Equipo ICP-OES Perkin Elmer en el Laboratorio de Química Ambiental (CENMA).

Contenido de Mercurio total por EAA-VF:

La determinación de Hg en muestras líquidas se realiza 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, el cual es arrastrado con un gas portador neutro (nitrógeno) hacia el paso óptico de una celda espectrofotométrica. La absorbancia es medida 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 (Figura 9). Este procedimiento está basado en la metodología EPA 7470.

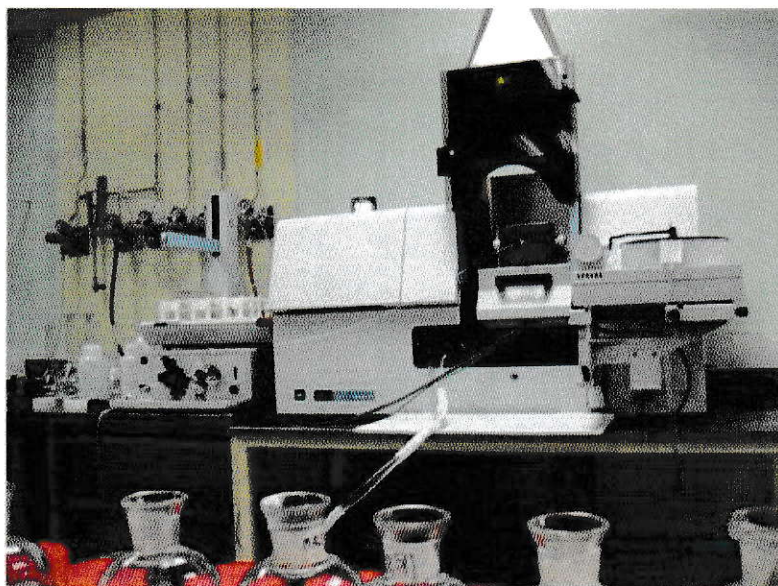


Figura 9. Espectrofotómetro de Absorción Atómica.

Contenido de Mercurio total en Mercuriómetro.

Este procedimiento se aplica para determinar contenido total de mercurio en muestras sólidas. Se basa en la liberación del mercurio desde la muestra a través del secado y descomposición térmica de la misma en un horno catalítico que asegura la eliminación de interferentes presentes en la muestra. Posterior a la vaporización del mercurio elemental, el mismo es disuelto en un amalgamador que contiene oro y es 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 253,7 nm. Se utiliza un equipo Milestone, modelo DMA-80 (Figura 10), según el principio descrito en la metodología EPA 7473.



Figura 10. Mercuriómetro en CENMA.

pH, Temperatura y Conductividad Eléctrica (CE).

Se mide mediante técnicas potenciométricas usando instrumentos portátiles para medición en terreno marca Hach modelo SensION + MM150 Para su calibración se utilizan estándares marca Hach de pH 4,01; 7,00 y 9,21. Para CE soluciones estándar 147 μ S/cm (a 25 ° C, 77 ° F) y 1413 μ S/cm.



Elementos por Fluorescencia de Rayos-X.

Esta técnica de análisis no destructiva, permite cuantificar elementos detectando emisiones de elementos en 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 ilustrado en Figura 11.

Figura 11. Analizador de terreno XRF.

Se utiliza un equipo Bruker S1 Turbo SD LE (software en modo GeoChem Trace Analysis). Las mediciones se realizaran de acuerdo a la metodología de medición US-EPA 6200, con lecturas en quintuplicado de cada una de las muestras secas y homogeneizadas. Se informa el promedio de las cinco mediciones. Los análisis pueden ser efectuados tanto en terreno como en el laboratorio como se ilustra a continuación en la Figura 12.



Figura 12. Análisis de muestras por XRF en el laboratorio y en terreno.

III. RESULTADOS Y DISCUSION.

3.1 Identificación, Inspección y Priorización de Sitios.

La selección de los sitios de interés es a través de la interacción entre las contrapartes del Ministerio del Medio Ambiente (MMA), la correspondiente Secretaría Regional Ministerial (SEREMI) del Medio Ambiente, Región de Coquimbo y los profesionales del Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA), examinando la existencia de fuente, rutas y receptores más vulnerables, evaluando información disponible en catastros nacionales y necesidades locales según antecedentes, evaluando:

- ◇ Recopilación de antecedentes por parte de CENMA mediante la revisión de la actualización 2010 del “Catastro de Faenas Mineras Abandonadas o Paralizadas y Análisis Preliminar de Riesgo (SERNAGEOMIN-JICA), identificando los SPPC de mayor interés según:
 - Cercanía de los residuos a sectores poblados y/o agrícolas.
 - Uso de sustancias peligrosas.
 - Cursos de agua a corta distancia.
 - Evidencia en la pérdida de la estructura de los residuos mineros masivos.

- ◇ Propuesta de sitios por parte de la SEREMI del MMA, Región de Coquimbo, según las necesidades regionales, preocupaciones de actores territoriales y evidencias de riesgos declarados debido a fallas, accidentes o derrames que han ocurrido históricamente (como sismos o eventos de alta pluviometría) que pudiesen repetirse.

Una vez realizada la selección inicial de los sitios de interés, se lleva a cabo una visita de inspección adaptada en terreno en función de la accesibilidad de los lugares y del tiempo planificado para la visita.

La inspección fue realizada durante los días 7 al 10 de Junio del 2011, contando con la presencia de personal de la SEREMI MMA Región de Coquimbo, y del Ministerio del Medio Ambiente (Nivel Central), personal de la Gobernación de la Provincia de Choapa, Fundación Chile y personal de CENMA. Personal de SERNAGEOMIN invitado a la visita, no le fue posible asistir por motivos de fuerza mayor.

Fueron visitados 5 sitios que contaron con cantidades y estado de actividad variables de relave al momento de la visita. Se realizó un trabajo de reconocimiento y observación de las condiciones de cada sitio inspeccionado, recopilando también información, para el posterior proceso de priorización, sistematizada en fichas SCW-CCME, compilando antecedentes con entrevistas a personas involucradas como pobladores y autoridades. Para cada SPCC se tomó una muestra puntual de material sólido no consolidado (suelo/relave) y/o de aguas superficiales o de pozo (donde ésta pudo adquirirse), según protocolos de muestreo de CENMA. Cabe destacar que en las etapas anteriores a la Investigación Confirmatoria, no es en general requerimiento de las metodologías de evaluación de riesgo tomar muestras. Esto fue realizado de modo complementario.

Los sitios seleccionados se encuentran indicados en la imagen GoogleEarth de las Figuras 5, 6 y 7. Se presentan con fotografía a continuación (Figuras 13 a la 17), junto con una breve reseña:

Pluma de Oro: Sitio que presenta relave activo de minería de flotación en procesamiento de cobre. Se observa el relave en la Figura 13:



Figura 13. Vista norte del relave pluma de oro al momento de la visita.

Leopoldo Hernández: Sitio que presenta relaves activos (Figura 14) e inactivos generados por minería de amalgamación con mercurio en procesamiento de oro.

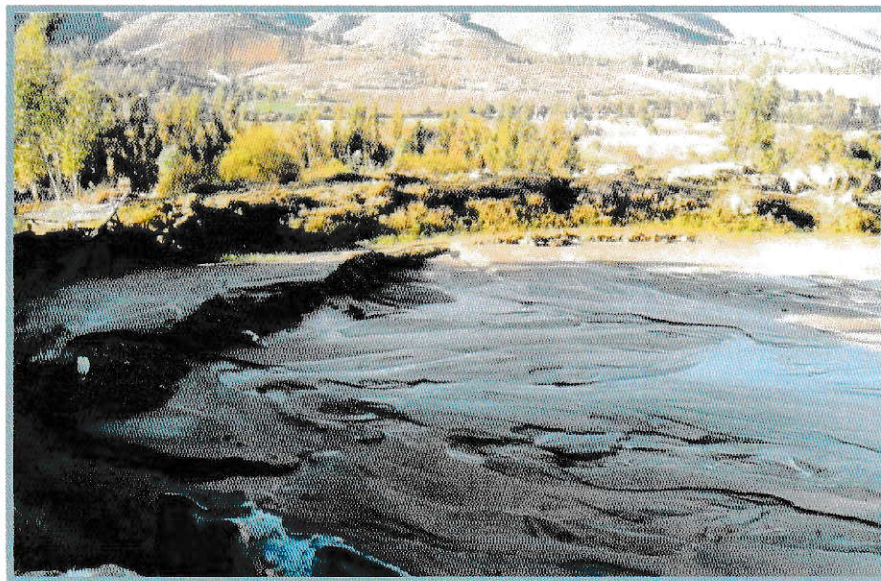


Figura 14. Relave activo en sitio Leopoldo Hernández.

Anta Colla: Sitio que presenta 2 importantes pilas de relave abandonados que fueron generados en minería de oro. Cabe destacar un importante desarrollo de vegetación como se observa en la Figura 15 a continuación:

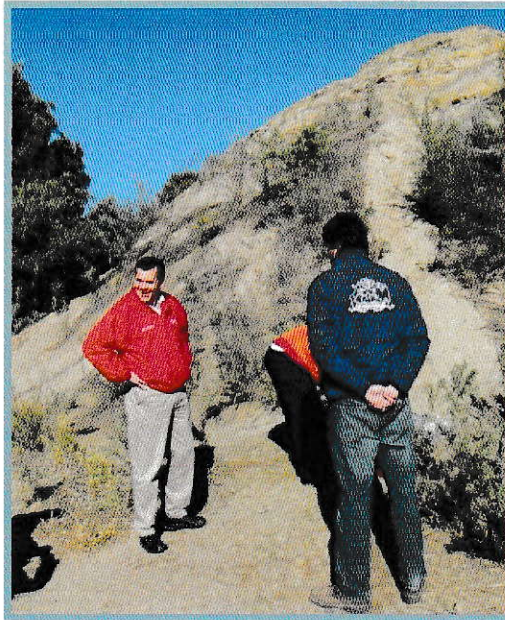


Figura 15. Pila 1 relave Anta Colla. Se destaca la presencia de autoridades locales en el proceso de evaluación.

Centinela: Sitio que presenta solo un apilamiento de relave de dimensiones mayores a los demás sitios en evaluación, el cual fue generado en la extracción de cobre por concentración (Figura 16).

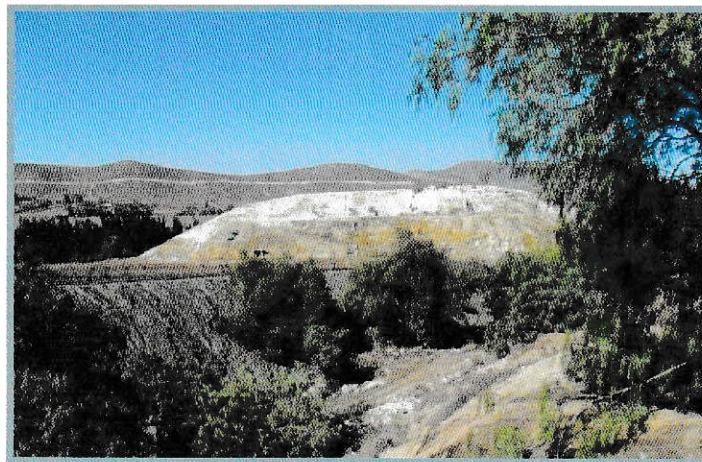


Figura 16. Relave centinela vista Sur oeste.

Horizonte: Sitio que presenta una pila de relave generado en procesamiento de oro el cual se encuentra alejado de poblaciones numerosas. Sólo algunos habitantes rodean el sitio (Figura 17).



Figura 17. Relave horizonte.

De este modo, con la información levantada en visitas de campo, más información bibliográfica, se procedió a ejecutar la priorización, en base a los siguientes criterios:

- Ficha de Inspección y Priorización "Site Classification Worksheets" de National Classification System for Contaminated Sites o Sistema Nacional de Clasificación de Sitios Contaminados, (elaborados por el Canadian Council of Ministers of the Environment-CCME).

Los resultados obtenidos de la aplicación de las fichas fueron lo que se exponen en la Tabla 10:

Tabla 10. Sitios evaluados en la primera visita de campo con el respectivo detalle de Georreferencia, relaves en uso/abandono y resultados de fichas.

Nº	Sitio	Relaves Inactivos	Relaves Activos	Georreferencia UTM/WGS84 (Zona 19J)	Sector	SCW-CCME	
						Puntaje	Clasificación
1	Leopoldo Hernández (ex Cayuca Hernández)	2	1	298103 E 6501167 S	Illapel (Asiento Viejo)	65,2	2
2	Anta Colla	2		296769 E 6499648 S	Illapel (Población Plan de Hornos)	62,9	2
3	Centinela	1		296621 E 6499863 S	Illapel (Población Plan de Hornos)	62,7	2
4	Horizonte	1		305445 E 6517699 S	Quebrada de Chillán	54,9	2
5	Pluma de Oro	1	1	294050 E 6497504 S	Illapel (Pobl. Tarsicio Valderrama)	54,6	2

El resumen de las SCW-CCME que presentan la información contenida para cada uno de estos SPPC, se encuentra en el ANEXO A.

- Resultados de análisis de muestras puntuales, obtenidas en cada uno de los sitios para una evaluación preliminar, realizados por CENMA.

Las muestras sólidas puntuales recolectadas en los sitios fueron analizadas en ICP-OES para los elementos As y Pb y en mercuriómetro para elemento Hg. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Concentración de elementos (mg/kg, BMS) muestras de suelo y relaves.

Muestra	Georreferencia UTM WGS 84 Zona 19J	Matriz	Hg	Pb	As
			(mg/kg)		
Relave activo Pluma de Oro	293994 6497479	Relave	0,35	0,47	34,37
Relave Centinela 1	296526 6499983	Relave	1,50	79,14	1368,33
Relave Centinela 2	296766 6499758	Relave	1,01	24,68	1228,80
Relave Hernández 1 Activo	298114 6501177	Relave	15,76	1008,66	3164,11
Relave Hernández 2	298041 6501149	Relave	3,92	15,03	1020,00
Relave Anta Colla 1	296790 6499711	Relave	10,68	3,12	396,44
Relave Anta Colla 2	296785 6499634	Relave	1,52	2,06	4,71
Relave Horizonte	305500 6517688	Relave	31,93	2,70	94,38
Valor Base	283255 6493179	Suelo	0,13	<LD	16,90
Suelo APR	298185 6501007	Suelo	22,62	46,82	153,21
LD			0,0015	0,27	2,3

En el caso de muestras líquidas, éstas fueron medidas por ICP-OES para elementos As y Pb. En el caso de Hg la técnica de análisis utilizada fue de EAA-Vapor Frío. A continuación en la Tabla 12 se presenta la concentración medida de elementos (en µg/L) para muestras líquidas.

Tabla 12. Concentración de elementos (en µg/L) para muestras líquidas.

Muestra	Georreferencia UTM WGS 84 Zona 19J	Matriz	Hg	Pb	As
			(µg/L)		
Agua de infiltración Pluma de Oro	294028 6497404	Agua	< LD	3,95	<LD
Pozo Aucó 1	296610 6500790	Agua	< LD	6,97	<LD
Estero Aucó 1	296785 6499816	Agua	< LD	6,10	<LD
Pozo Aucó 2	298191 6502380	Agua	< LD	9,14	<LD
Agua superf Estero Guindos-Población	296796 6499742	Agua	0,204	7,19	<LD
Rio Illapel Aguas Arriba	299320 6501794	Agua	< LD	<LD	<LD
APR población Plan de Hornos	298204 6500968	Agua	0,383	9,07	<LD
Rio Illapel Aguas Abajo	289459 6495390	Agua	0,217	<LD	<LD
LD			0,16	3,93	6,36

Nota: APR = Agua Potable Rural, explicado más adelante.

Cabe destacar que estas muestras no superan las normativas NCh 409 para agua potable y NCh 1333 para agua de riego. (NCh409 agua potable: Hg = 0,001 mg/L; Pb = 0,05 mg/L; As =0,01 mg/L NCh 1333 agua riego: Hg = 0,001 mg/L; Pb= 5 mg/L; As =0,1 mg/L;)

- Preocupaciones sociales complementadas con los intereses de autoridades locales.

Si bien los sitios priorizados tomando en consideración la puntuación de las fichas SCW-CCME, corresponderían a Leopoldo Hernández, Anta Colla y Centinela, la preocupación que generan estos residuos en la población motiva a las autoridades a solicitar la inclusión de Pluma de Oro debido a su actividad vigente y la cercanía a poblaciones de alta densidad.

De este modo, considerando todos los factores antes expuestos, los sitios priorizados fueron:

- ✓ **Leopoldo Hernández.**
- ✓ **Anta Colla.**
- ✓ **Pluma de Oro.**

Dicha priorización responde principalmente a que estos SPPC presentan:

- ◇ Puntaje elevado en Ficha de Priorización.
- ◇ Poseen relaves abandonados y/o activos.
- ◇ Resultados de análisis con alto contenido mercurio, arsénico y/o plomo.
- ◇ Proximidad a sectores poblados.
- ◇ Potencial incidencia a cursos de agua (Río Illapel y/o Estero Aucó).
- ◇ Expuesto a la resuspensión de material sólido no consolidado.
- ◇ Preocupación de actores locales.

Cabe destacar la recomendación de que los SPPC no priorizados en este estudio, sean considerados en etapas futuras, porque la información disponible hasta la fecha, igualmente ratifica la presencia en ellos de elementos con potencialidad para provocar daño a la salud humana y a los ecosistemas.

3.2 Investigación Preliminar.

En el caso de este estudio, la investigación preliminar y visita en terreno de los sitios es realizada con información obtenida de:

- ◇ Antecedentes registrados en la actualización 2010 del Catastro de faenas mineras abandonadas o paralizadas de SERNAGEOMIN.
- ◇ Información proporcionada por instituciones del Estado como: MMA (Ministerio del Medio Ambiente), Gobernación Provincia de Choapa, DGA (Dirección General de Aguas), SISS (Superintendencia de Servicios Sanitarios), MINVU (Ministerio de Vivienda y Urbanismo) y SEA (Servicio de Evaluación Ambiental). También del INE (Instituto Nacional de Estadísticas).
- ◇ Entrevistas a autoridades y pobladores de la comuna.
- ◇ Revisión bibliográfica.
- ◇ Muestreo.

Asimismo se elaboraron modelos conceptuales para cada uno de los diferentes sitios por separado, los cuales se incluyen más adelante en los resultados. Son considerados factores como:

- ◇ Tipos de receptores expuestos según características del sitio.
- ◇ Estructura del relave.
- ◇ Medios de transporte de contaminantes según características fisicoquímicas del relave.
- ◇ Cercanía a cuerpos de agua.
- ◇ Evidencia de actividad agrícola.

- ◇ Posibles compartimentos ambientales impactados.
- ◇ Vías de exposición asociadas a los posibles compartimentos ambientales impactados.

3.2.1 Antecedentes Illapel.

La Comuna de Illapel se ubica en las coordenadas 31°37'50"S; 71°9'55"O en la zona sur de la Región de Coquimbo, Provincia del Choapa, en la cuenca del mismo nombre. Limita por el norte con la comuna de Combarbalá, al sur con las comunas de Salamanca y Los Vilos, al este con el límite con Argentina y al oeste con la comuna de Canela. La comuna de Illapel cuenta con una población de 30.355Hab, de la cual un 72% corresponde a población urbana (censo 2002). Un 21% de habitantes son menores de 12 años y un 12% de habitantes son mayores de 60 años, lo que suma un total de cerca de un 33% de habitantes con mayor vulnerabilidad a efectos de posibles contaminantes.

Por otra parte la comuna presenta un 1,7% de indigencia, un 7,4% de hogares en condición de pobreza y cerca de un 3% de viviendas del tipo precaria, lo que representa población que posee una mayor probabilidad de contacto con los contaminantes. En complementación a estos datos, la Comuna cuenta con cerca de un 99% de cobertura del servicio de agua potable en la zona urbana, y de entre un 65% y 70% en la zona rural (Observatorio urbano, consulta web 2011).

La Comuna de Illapel es la capital provincial del Choapa y a su vez la Ciudad de Illapel es el principal centro urbano, motivo por el cual una de sus principales actividades es la prestación de servicios a nivel provincial, siendo los mayoritarios la construcción, la venta al por menor, la educación y la administración pública (entre otros), sumando el total del rubro de prestación de servicios un 39% de las actividades de la comuna (Consultorías Profesionales Agraria Ltda, 2008).

La actividad agrícola es la que le sigue a la prestación de servicios, alcanzando cerca de un 12%. En tercer lugar se encuentra la extracción de minerales metalíferos y explotación de otras minas y canteras abarcando casi un 11% de la actividad comunal (PADEM, 2011).

Clima.

Debido a la extensión de la comuna, ésta cuenta con diferentes climas dependiendo de la altura, sin embargo, el clima de la zona de estudio corresponde a un clima Estepárico costero o Nuboso, el que se caracteriza por la abundante nubosidad; humedad, temperaturas moderadas y presenta un promedio de precipitaciones de 130 mm anuales con un período seco de 8 a 9 meses.

Relieve.

Los cauces de agua en la cuenca del Choapa, específicamente en la sub-cuenca del río Illapel y el estero Aucó, presentan un cauce encajonado por cerros del ambiente netamente andino con alturas entre los 300 y 1500msnm, los que se presentan con laderas escarpadas y afloramientos de roca que aportan material derrubial al cauce a través de conos y quebradas.

Vegetación.

Dentro del territorio abarcado por la comuna de Illapel, se pueden identificar 3 regiones vegetales:

A. Sub-Región del Matorral y del Bosque Espinoso.

Se distribuye, principalmente por el valle central entre el sur de la IV región y el norte de la VIII.

Corresponde a una zona vegetacional profundamente alterada por actividades agrícolas, situación que ha determinado que la vegetación esté muy destruida en cuanto a composición y estructura, siendo muy difícil encontrar remanentes originales. La forma de vida predominante son los arbustos espinosos, del tipo suculento o caducifolios de verano. La delimitación de esta sub-región sigue patrones muy similares a los de las especies; Espino (*Acacia caven*), Algarrobo (*Prosopis chilensis*).

Dentro de esta sub-región se pueden reconocer 5 formaciones vegetales:

- Matorral espinoso de las serranías.
- Bosque espinoso abierto.
- Matorral espinoso de la cordillera de la costa.
- Matorral espinoso del secano costero.
- Matorral espinoso del secano interior.

B. Sub-Región del Matorral Estepario.

Esta sub-región es la que presenta las mayores limitantes hídricas dentro de la región del Matorral y el Bosque Esclerófilo. Se desarrolla desde la IV región hasta el norte de la V región.

Presenta una intensa presión por pastoreo y explotación de leña, lo cual ha determinado que la fisonomía de la vegetación original esté casi completamente destruida o limitada a pequeños parches.

Dentro de esta sub-región se pueden reconocer 4 formaciones vegetales:

- Matorral estepario costero.
- Matorral estepario interior.
- Matorral estepario boscoso.
- Matorral estepario arborescente.

C. Sub-Región de Los Andes Mediterráneos.

Se desarrolla en los Andes Mediterráneos desde la III a la VII región. En esta sub-región, a diferencia de la sub-región del Altiplano y la Puna, las precipitaciones se concentran en invierno aumentando de norte a sur.

La forma de vida predominante en las partes altas son las plantas arbustivas, herbáceas o en forma de cojín, mientras que en las partes más bajas penetran elementos esclerófilos en el norte y caducifolios en el sur.

Dentro de esta sub-región existen 5 formaciones vegetales de las cuales las siguientes 2 poseen influencia sobre la comuna de Illapel:

- Matorrales pre-andinos de la cordillera de Coquimbo.
- Matorral esclerófilo andino.

En todos los tipos de vegetación identificados y las condiciones en que se encuentran en la zona, se distingue que se trata de vegetación de baja cobertura vegetal y lento crecimiento, lo que dificulta la fitoestabilización de los posibles relaves depositados en la zona. Además, la vegetación está fuertemente afectada por una importante actividad agrícola. (Enciclopedia de la Flora Chilena, consulta web Dic 2011).

Hidrografía.

La zona de estudio corresponde a la sub-cuenca del río Illapel y sus afluentes, entre los que se cuentan variadas quebradas, más el estero Aucó, que drena las aguas de la zona norte en el río Illapel a la altura de la ciudad de Illapel. El río Illapel posee régimen nivo-pluvial, alcanzando caudales máximos anuales cerca de su desembocadura en el río Choapa de entre 20 y 50 m³/s en condiciones normales de precipitaciones, llegando a cerca de 1 m³/s en años secos, y alcanzando valores de entre 150 y 300m³/s en años lluviosos. Los caudales mínimos anuales no alcanzan 1m³/s, llegando incluso a secarse por completo en algunos años.

En cuanto a las aguas subterráneas existen dos acuíferos principales, uno que escurre de norte a sur hasta la ciudad de Illapel con una profundidad freática de 5 m en las cercanías de Illapel, y otro que escurre por un lecho de rocas de depósitos no consolidados o rellenos paralelo al río Illapel hasta la confluencia con el río Choapa.

Cabe destacar que en la generalidad de los casos, las áreas circundantes a las cuencas presentan una alta capacidad de drenaje hacia el acuífero de las aguas superficiales, lo que podría favorecer lixiviación de elementos contenidos en los materiales de depósitos cercanos a los ríos (caso común a los relaves en evaluación) (DGA/ CADE-IDEPE, 2004).

Suelos.

Las series de suelo más importantes que se presentan en la comuna de Illapel de acuerdo a la superficie que estas abarcan en la cuenca, corresponden a las series Guatulame y Mollaca y la serie Misceláneo (Quebrada, Duna, Coluvial, Cerro, Caja de río y Aluvial). Los suelos de la zona baja de la cuenca del Choapa poseen principalmente suelos de alta permeabilidad y capacidad limitada para uso agrícola, mientras que en la zona alta, posee suelos de características opuestas, con capacidades adecuadas para cultivo de frutales (DGA/ CADE-IDEPE, 2004).

Geología.

La geología de la comuna de Illapel corresponde principalmente a rocas de tipo Volcánicas del Jurásico Superior-Cretácico Inferior. Secuencias volcánica, lavas, basálticas a riolíticos, domos brechas y aglomerados andesíticos a dacíticos con intercalaciones clásticas continentales y marinas; ubicadas en la parte media del río Choapa (DGA/ CADE-IDEPE, 2004).

Calidad de las aguas.

El estudio "Caracterización Química, Física y Biológica del Agua de la Cuenca del Choapa" (2007-2008) elaborado por el INIA basándose en datos de la DGA (y otras mediciones), y por comparación con la NCh 1333 (a modo referencial, debido a la actividad agrícola de la zona), estima que la calidad del agua del río Illapel presenta buenas características de calidad hasta su confluencia con el estero Aucó, presentando este último una mala calidad (5,8% de los análisis supera la norma), la cual afectaría la calidad de las aguas del río Illapel. Según el estudio del INIA, los principales parámetros que perjudican la calidad del agua de la zona estarían asociados a un alto contenido de elementos disueltos medido como conductividad eléctrica y a algunos elementos, potencialmente debido a la presencia de relaves en la ribera del estero Aucó.

Además, en eventos aislados, el río Illapel presenta crecidas importantes, aumentando el riesgo de arrastre fluvial de los relaves presentes en la ribera.

En cuanto al agua potable, según estudio encargado en febrero de 2011 por el SEREMI de Salud de la región a las aguas que abastecen la ciudad de Illapel, éstas se encuentran dentro de los parámetros establecidos.

3.2.2 Identificación de potenciales componentes del riesgo (fuente, vía y receptor).

Para todos los casos evaluados en el presente estudio, la **fuentes primaria de contaminación está constituida por depósitos de minería del tipo relaves**, en algunos casos activos, es decir, aun en operación y en otros casos en abandono (inactivos). En general presentan elevación, lo que constituye un riesgo estructural. Hay incluso evidencias de fallas en los taludes, habiéndose escurrido material del relave (que se comporta como un fluido) fuera del sector establecido para su disposición.

Estos relaves están sometidos a mecanismos físicos que podrán eventualmente causar descargas de contaminantes hacia otros compartimentos ambientales, como también procesos químicos. Dichos fenómenos 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 fuentes secundarias de contaminación son:

- ◇ Resuspensión de material particulado por la erosión del viento en las zonas secas de los relaves.
- ◇ Posible volatilización de mercurio, en los casos en que este es utilizado para el procesamiento de oro.
- ◇ Pérdida de la estructura con el consiguiente derrame de material contaminado hacia otros sectores del SPPC en estudio. Este fenómeno puede darse por inestabilidad de relave en sí mismo, por arrastres aluviales y/o por sismos.
- ◇ Lixiviación y disolución de contaminantes hacia napas subterráneas (contaminando aguas de pozo que se utilizan para abastecimiento de agua potable).

- ◇ 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, deposición de material particulado, otros) en los sitios que presente actividad agrícola en las cercanías.

Estos mecanismos de transporte serán los que en su conjunto propiciarían 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 períodos de tiempo ya pasados, en el presente o proyectarse hacia un período 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 SPPC 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.

Los riesgos asociados a peligros de seguridad, no son competencia de este estudio, por lo que no se incluyen.

3.2.3 Investigación Preliminar para SPPC en estudio.

Los resultados que se presentan a continuación en las Tablas 13, 14 y 15 como también en las Figuras de la 18 a la 26, son producto de la recopilación de antecedentes bibliográficos disponibles para los sitios en evaluación y consulta local. En ellos se presentan datos generales, una descripción del tipo de procesamiento de minerales realizado en los sitios (también registros fotográficos) y finalmente modelos conceptuales para los sitios.

Leopoldo Hernández.

Tabla 13. Información correspondiente al sitio SPPC Leopoldo Hernández

Sitio		Leopoldo Hernández
Georreferencia (UTM/WGS84)		298092.34 m E / 6501169.55 m S (Zona 19J)
Dueño actual		Leopoldo Hernández
Dirección		Parcela 7 Asiento Viejo
Límites	Este	Población Asiento Viejo
	Oeste	Población Asiento Viejo
	Norte	Cerro Asiento Viejo
	Sur	Camino público
Acceso		Parcialmente restringido
Usos terrenos vecinos		Sectores residenciales y sectores agrícolas
Procesamiento		Procesamiento variable principalmente de mineral de oro (Planta opera en base al "maquilado")
Origen de materias primas procesadas		Minerales provenientes de diferentes zonas regionales
N° de trabajadores		2 a 3
Fecha actividad		Desde 1980
Población aledaña		Villorrios Plan de Hornos, Las Rozas y Las Espigas
N° de habitantes		800
Suelo		Permeable-aluvial (gravas areno-arcillosas) medio altamente permeable
Relaves	Relave 1	Relave 2
Estado	Inactivo	Activo
	Seco, poco estable	Húmedo, poco estable
Área aprox.	0,3 Ha	0,4 Ha
Cursos de agua		Río Illapel 180 m

Este sitio es conocido también como “Cayuca Hernández”. En el sitio se procesan minerales extraídos por pirquineros quienes pagan un porcentaje de las ganancias obtenidas en el procesamiento y comercialización del producto al propietario de los trapiches instalados en el predio, que se encuentran junto a los relaves (este modo de “arriendo” de la planta de procesamiento es lo que se le conoce como maquilado).

El propietario cuenta con los permisos correspondientes de la Autoridad Sanitaria. Es de especial importancia destacar que en esta minería de procesamiento artesanal aún se utiliza mercurio para la amalgamación del oro. Una vez obtenida la amalgama de oro, ésta es sometida a altas temperaturas dentro de una “retorta”, donde se evapora el mercurio de la mezcla Hg-Au (aproximadamente de proporciones 1:1 en contenido Hg:Au). La retorta cumple la función de atrapar el mercurio evaporado y recuperar parte de éste, a medida que se purifica el oro.

Así, tanto en el proceso de amalgamación en la molienda y mezclado en el trapiche, como en la recuperación de la porción de oro de la amalgama es posible que haya pérdidas de mercurio hacia el ambiente.

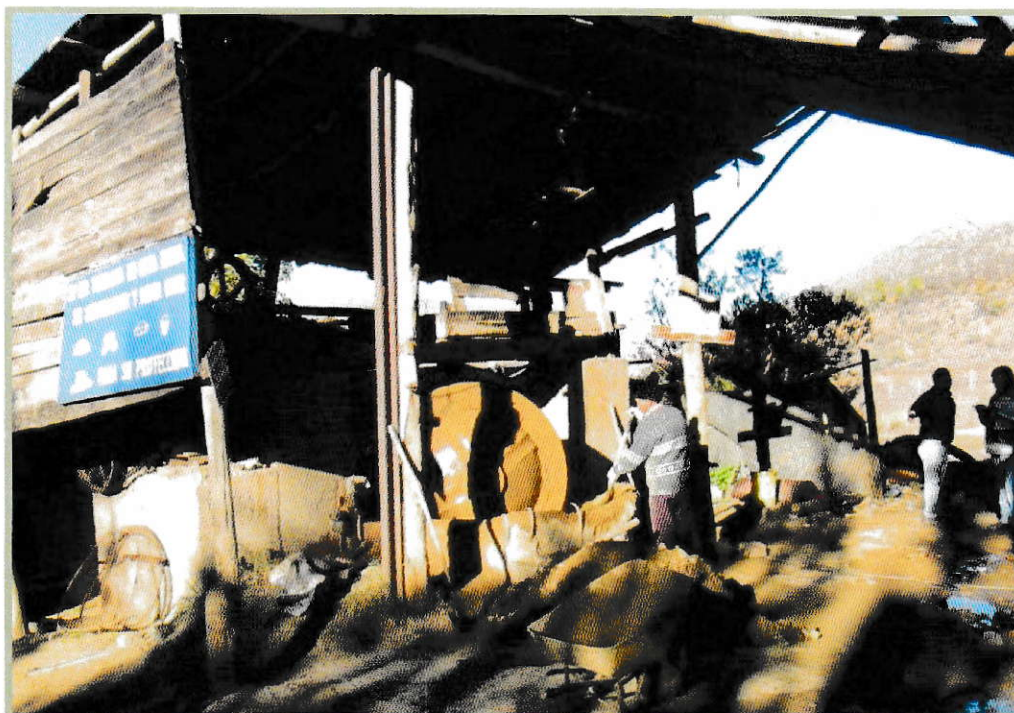


Figura 18. Trapiche operativo en planta Leopoldo Hernández. Aquí se realiza la molienda del mineral al que se agrega el mercurio y agua. Una vez obtenida la “pella” (o amalgama) el residuo de mineral es drenado hacia el depósito de relave.

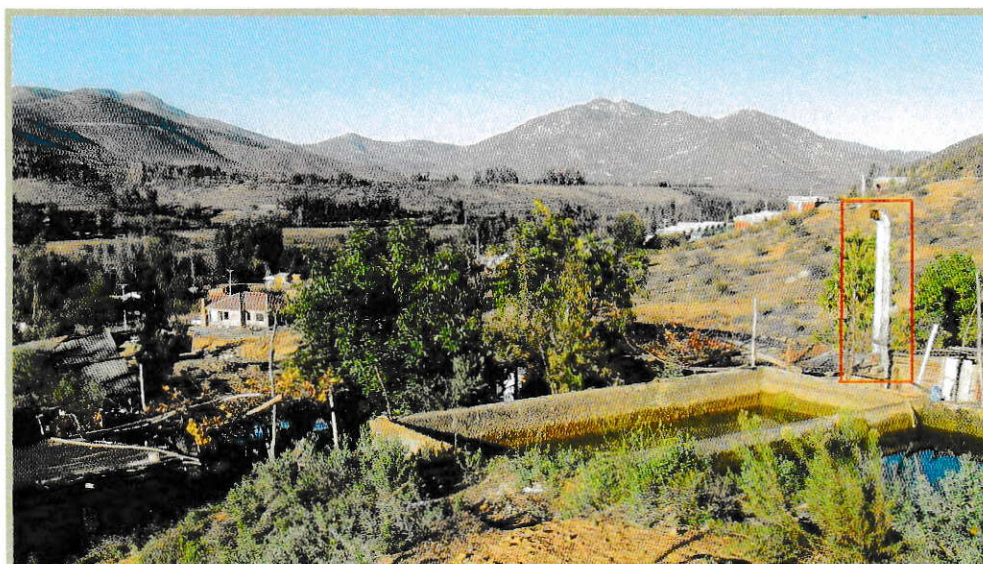


Figura 19. Planta Leopoldo Hernández. Destacada en rojo, se muestra la chimenea de evacuación de vapores de mercurio para purificación del oro obtenido desde la amalgama. En el fondo se observan poblaciones de Illapel.

En cuanto a los relaves, éstos presentan indicios de inestabilidad sísmica y posibilidades de rebasarse debido a su insuficiente revancha. Esto indica baja estabilidad estructural, sumado a un manejo parcial de los contaminantes por la baja fiscalización que presenta este tipo de emplazamientos.

Es sabido por los habitantes de poblaciones cercanas, que el relave ha presentado derrumbes (información obtenida por consulta local), afectando la quebrada en que se emplazan los residuos (quebrada abajo) hasta alrededor de 200 metros hacia el río Illapel donde se encuentra un sistema de extracción de agua de pozo con una profundidad de 20-30 metros que abastece las poblaciones vecinas conocido como APR- Agua Potable Rural- Población Plan de Hornos (JICA-SERNAGEOMIN, 2007; Chávez 2010; Ingenieros Geotécnicos Ltda, 1999).



Figura 20. Relave Leopoldo Hernández.

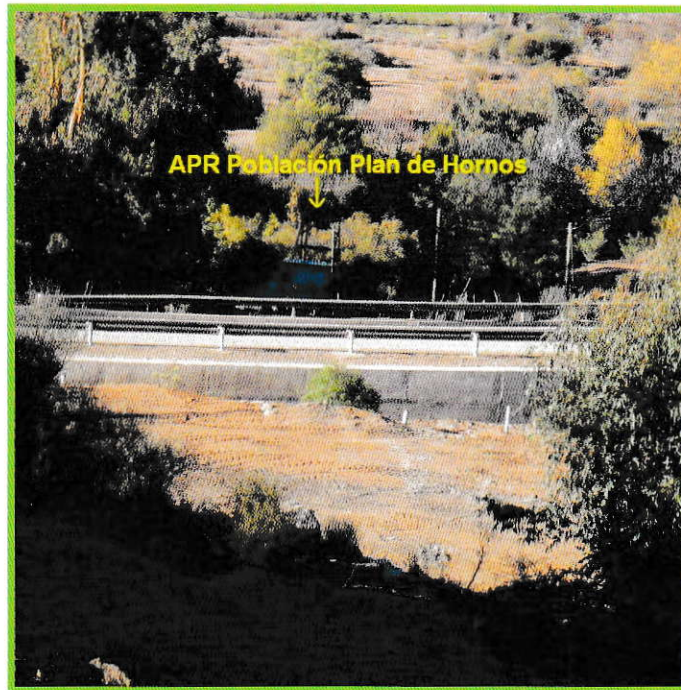


Figura 21. Vista, desde el relave Hernández, del APR Población Plan de Hornos. Se puede observar que la quebrada donde se encuentra el relave confluye hacia el APR. Más al fondo, se encuentra el río Illapel.

Dados los antecedentes expuestos, se considera un modelo conceptual inicial que describe la situación de los relaves del sitio, esquematizado en la Figura 22. Todos los relaves del sitio se ven afectados o sometidos a los mismos factores incluidos en el modelo conceptual. 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: Trabajadores en el sitio y residentes tanto adultos como niños en las poblaciones cercanas. Las emisiones atmosféricas de Hg provenientes del proceso de purificación del oro por medio del calentamiento de la amalgama se excluyen del modelo conceptual ya que este proceso queda fuera producto de la no inclusión de mediciones de la calidad del aire según tecnologías disponibles.

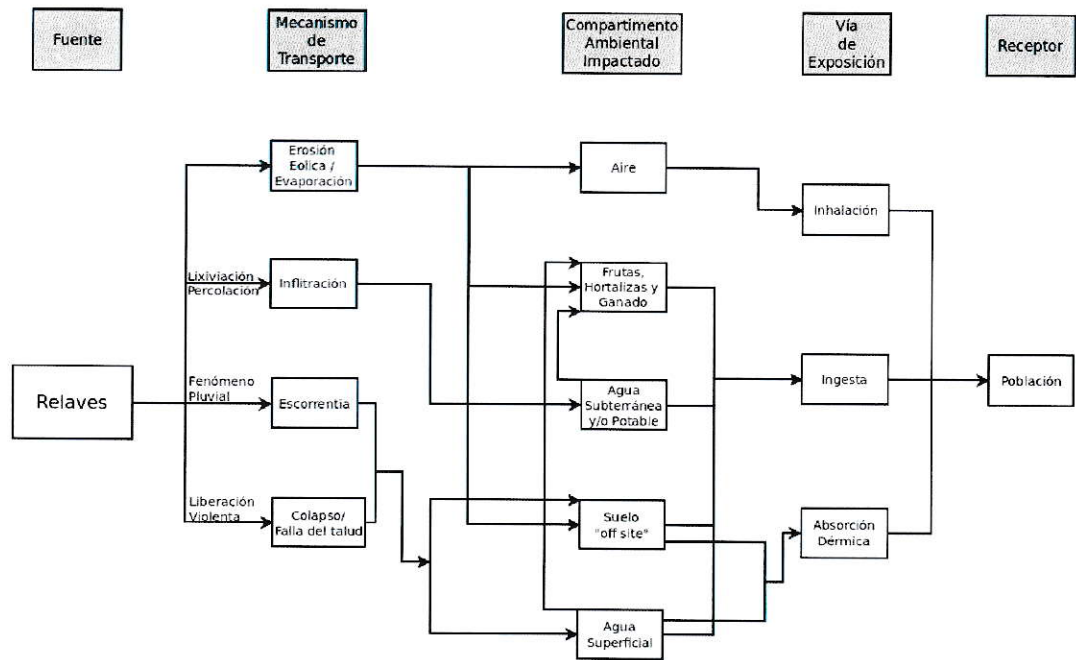


Figura 22. Modelo conceptual inicial donde se describen las principales rutas de distribución de posibles contaminantes presentes en relaves Leopoldo Hernández.

Población expuesta: Trabajadores en el sitio; Residentes adultos y niños.

Anta Colla.

Tabla 14. Información correspondiente al sitio SPPC Anta Colla.

Sitio		Anta Colla	
Georreferencia (UTM/WGS84)		296759.19 m E / 6499682.22 m S (Zona 19J)	
Dueño actual		Sociedad Contractual Minera Antacolla	
Dirección		Puntilla Norte s/n	
Límites	Este	Estero Aucó	
	Oeste	Camino Público	
	Norte	Camino Público	
	Sur	Río Illapel	
Acceso		Libre	
Usos terrenos vecinos		Hacia el oeste existe un sector residencial de Illapel, el resto de los sectores aledaños son principalmente agrícolas	
Procesamiento		15t/d Cu y Oro	
Origen de materias primas procesadas		Minerales provenientes de diferentes zonas regionales	
N° de trabajadores		Actualmente se encuentra en abandono	
Fecha actividad		Desde 1983 hasta 1996 aproximadamente	
Población aledaña		30m, poblaciones El Arenal y Puntilla, complejo turístico.	
N° de habitantes		500	
Suelo		Permeable-aluvial	
Relaves		Relave 1	Relave 2
Estado		inactivo	inactivo
		Parcialmente estabilizados	Parcialmente estabilizados
Área aprox.		0,5 Ha	0,5 Ha
Cursos de Agua		Estero Aucó 30 m Río Illapel 150 m Estero Guindos-Población 15 m	

Durante el periodo de operación de la planta que generó los relaves de este sitio, fue utilizada la técnica de amalgamación para el procesamiento de los minerales de oro. Por esto se debe prestar atención a las concentraciones probables que se encuentren de mercurio, metal de alta toxicidad. Además, este relave a pesar de presentar cierto grado de consolidación, potencialmente afectaría a tres cursos de agua: Estero Aucó, Estero Guindos-Población y el río Illapel, a distancias de 30, 15 y 150 m aproximados, respectivamente. La posible influencia del relave en el estero Aucó se suma a una serie de otros relaves en la ribera del estero aguas arriba, incluso del relave Centinela de alto volumen, que se encuentra aproximadamente 30 m de distancia del sitio evaluado.

Un dato a considerar es la presencia de cubierta vegetal natural (hierba y arbustos) de la zona en los taludes de ambos tranques y en menor proporción en las cubetas, lo cual protege parcialmente de la erosión eólica (JICA-SERNAGEOMIN, 2007; Chávez 2010; Ingenieros Geotécnicos Ltda., 1999).



Figura 23. Relaves Anta Colla. Al fondo en la fotografía se observa la segunda pila de relave (vista desde pila N °1).



Figura 24. Relaves Anta Colla.

Dados los antecedentes expuestos, se considera un modelo conceptual inicial el cual se grafica a continuación, para ambos relaves. Se debe tener presente que este modelo conceptual está sujeto a actualizaciones y modificaciones. A su vez, el receptor **Población** incluiría: Residentes adultos y niños.

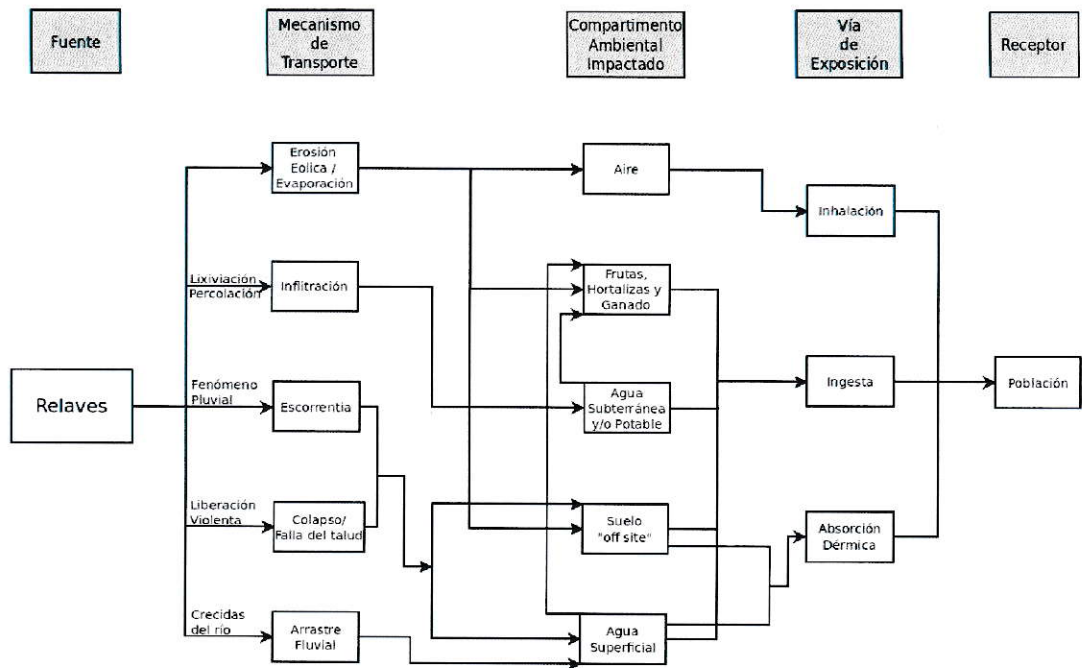


Figura 25. Modelo conceptual inicial donde se describen las principales rutas de distribución de posibles contaminantes presentes en relaves Anta Colla.

Población expuesta: Residentes adultos y niños.

Pluma de Oro.

Tabla 15. Información correspondiente al sitio SPPC Pluma de Oro

Sitio		Pluma de Oro
Georreferencia (UTM/WGS84)		293993.99 m E / 6497479.02 m S (Zona 19J)
Dueño actual		Miguel Aguirre Bustamante
Dirección		Argentina s/n, Ribera Norte del Río Illapel
Límites	Este	San Jorge
	Oeste	sector agrícola
	Norte	Línea de Ferrocarril
	Sur	Río Illapel
Acceso		Restringido
Usos terrenos vecinos		Hacia el norte se encuentra un sector residencial de la ciudad de Illapel. Hacia el oeste y en la ribera opuesta del río Illapel se encuentran sectores agrícolas
Procesamiento		8-10 ton/día de sulfuros de Cu
Origen de materias primas procesadas		Sector El Romero, comuna de Illapel
N° de trabajadores		10
Fecha actividad		24 de abril del año 1991, resolución Sernageomin No 452, sin embargo, la planta funciona desde el año 1982, según consta en informe técnico de la CONAMA de mes de febrero del año 1996.
Población aledaña		14m, poblaciones Tarcisio Valderrama y Población Choapa
N° de habitantes		2500
suelo		Permeable-aluvial (gravas arenosas) altamente permeable
Relaves		1
Estado		Activo Forma de torta. Posee berma de coronamiento (400 m largo; 4 m ancho). Talud externo de ángulo 41°
Área aprox.		1,5 Ha
Cursos de Agua		Río Illapel 15 m

El proceso de minería realizado en este sector consiste en el procesamiento de minerales tipo sulfuro de cobre por flotación para obtención de concentrados. En general los reactivos y reguladores en la flotación utilizados corresponden a compuestos orgánicos tanto de alta como de baja degradación y también ciertas sales inorgánicas.

El relave generado contendrá entonces residuos del mineral del cual se ha extraído el metal de interés (en general Cu y Mo) de composición variable, agua y un porcentaje de los reactivos que se agreguen en exceso, que no sean acarreados en el concentrado. Dicho relave es transportado a través de ductos en superficie de HDPE (Polietileno de Alta densidad) de 4" y el material de relleno de los muros del tranque están formados por material de empréstimo y bolones obtenidos del cauce del río Illapel. El sitio de depósito no posee zanja cortafugas ni material geotécnico. La extracción de aguas claras se lleva a cabo por gravedad hacia costado suroeste (recurso hídrico utilizado corresponde a 1 acción del canal Cuz-Cuz). Por otra parte, el sector agrícola de la zona oeste produce hortalizas comercializadas en feria libre de Illapel(JICA-SERNAGEOMIN, 2007; Chávez 2010; Ingenieros Geotécnicos Ltda., 1999).



Figura 26. Relave Pluma de Oro. Actualmente se procesan minerales para obtención de concentrados de cobre principalmente.

Dados los antecedentes expuestos, se considera el modelo conceptual inicial, que se muestra en la Figura 27. Se debe tener presente que este modelo conceptual está sujeto a actualizaciones y modificaciones. A su vez, el receptor **Población** incluiría: Trabajadores en el sitio y residentes tanto adultos como niños en las poblaciones cercanas.

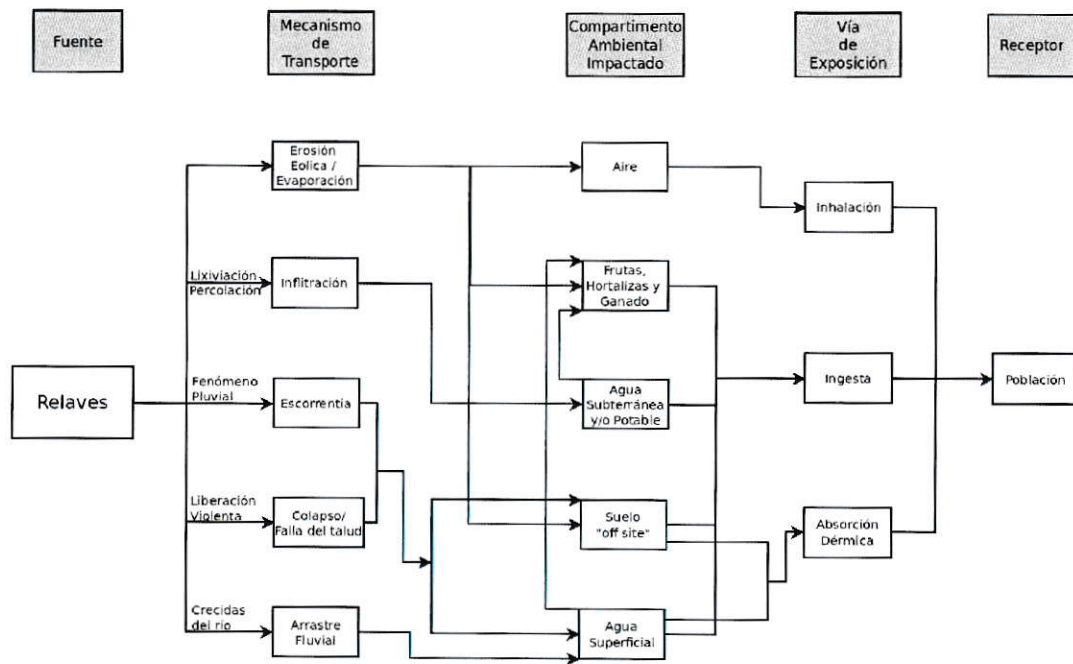


Figura 27. Modelo conceptual inicial donde se describen las principales rutas de distribución de posibles contaminantes presentes en relave Pluma de Oro.

Población expuesta: Trabajadores en el sitio; Residentes adultos y niños.

3.3 Investigación Confirmatoria.

Dado que el sitio Leopoldo Hernández presenta la mayor cantidad de evidencias de contaminación (alto puntaje en Ficha de Priorización, contenidos de elementos tóxicos superiores respecto a otros sitios evaluados, Agua Potable Rural y sectores altamente poblados en las cercanías, uso actual de Hg, entre otros; se selecciona este sitio para realizar la siguiente etapa de la metodología de Investigación Confirmatoria.

Para llevar a cabo la Investigación Confirmatoria, se elaboraron programas de muestreo y análisis. El muestreo y análisis fue realizado por los ejecutores del presente documento, como personal de CENMA, y por sus colaboradores. Además, estuvo presente personal de la SEREMI MA de la Región de Coquimbo, personal de la Gobernación de la Provincia del Choapa y el Jefe Provincial de Salud Ambiental. La identificación de los puntos de muestreo del sitio y sus respectivas georreferencias se presentan en la sección a continuación. Posteriormente se presenta el análisis de los datos de concentración de elementos obtenidos en las muestras.

3.3.1 Muestreo de los SPPC en estudio.

El muestreo fue realizado durante la semana del 24 de Octubre del 2011 y fue ejecutado según el *Protocolo de Muestreo de Contaminantes Metálicos en relaves Mineros* elaborado por CENMA.

La distribución y cantidad de muestras tomadas fue basada en las guías **ASTM 6009-96 “Standard Guide for Sampling Waste Piles”** (Guía Para Muestreo de Pilas de Residuos) y Guía metodológica para la investigación de la contaminación del suelo **“Estudio Histórico y Diseño de Muestreo” del Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente del Gobierno Vasco - IHOBE.**

Cantidad y ubicación espacial de muestras.

Suelos.

Las muestras fueron tomadas según un muestreo sistemático con red alternada, para pilas heterogéneas, no estratificadas. Se tomaron muestras según descripción del plan de muestreo elaborado, adaptado a factibilidades físicas en el sitio para acceder a los puntos georreferenciados de modo preliminar. El muestreo consideró muestras superficiales tanto de la cubeta como del talud de los relaves.

Puesto que técnicamente no se dispone de una cantidad suficiente de datos de concentración de contaminantes en los sitios a evaluar en la fase de investigación preliminar, se consideró recomendable, según guías metodológicas para evaluación de sitios potencialmente contaminados, planificar un número de muestras proporcional al área en estudio.

Dado que se trata de una fase de investigación confirmatoria en emplazamientos sospechosos de presentar contaminación, con una distribución espacial heterogénea de la contaminación en una fuente conocida y de fronteras esencialmente definidas, se recomienda como mínimo número de muestras¹:

$$n = 5 + A$$

Donde, n=número de puntos de muestreo y A= superficie (en Ha) de la zona estudiada.

¹Según "Estudio Histórico y Diseño de Muestreo" del Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente del Gobierno Vasco - IHOBE.

Aguas.

Se recolectaron muestras puntuales de agua, tomadas según accesibilidad. Fueron obtenidas de aguas superficiales del Estero Aucó y del río Illapel, obteniéndose un total de 3 muestras. También se obtuvo una muestra de agua subterránea extraída del dren de agua potable de Aguas del Valle, antes del tratamiento de potabilización (agua cruda).

Dado que se trata de un sistema dinámico que requiere de monitoreo sistemático, que cuente con datos suficientes para reflejar la variabilidad que presentan las concentraciones de los parámetros medidos en función del tiempo (altamente influenciado por la estacionalidad climatológica), las muestras adquiridas fueron sólo de forma complementaria y referencial, para contrastar con datos aportados por DGA de un período temporal de alrededor de 20 años.

Adicionalmente se incluyen datos provistos por:

- ◇ Empresa abastecedora de aguas potable de la ciudad de Illapel, Aguas del Valle: Informe Físico- Químico de la Fuente de Álvarez Pérez y Asiento Viejo y de la red de Agua Potable de Illapel. Dicha información es correspondiente al año 2011 y contiene datos de calidad de las aguas antes y después del tratamiento de potabilización.
- ◇ Fiscalizaciones de la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS)
- ◇ La Dirección General de Aguas (DGA) desde el año 1980 hasta el presente de fluviometría, calidad de aguas superficiales y de pozo.

Toma de muestras y preservación.

Las muestras de suelo fueron tomadas del nivel superficial a 10 - 30 cm de profundidad con palas plásticas, envasadas en bolsas plásticas tipo Ziploc y transportadas en recipiente adiabático ("cooler"). Muestras de agua fueron colectadas directamente en frascos HDPE de 1L (previamente ambientados), se les midió *in situ* pH, conductividad eléctrica y temperatura, luego preservadas con ácido nítrico concentrado (HNO_3), hasta obtener un pH = 2. Una vez envasadas, fueron debidamente etiquetadas, rotuladas y transportadas en recipiente adiabático manteniendo la cadena de frío.

Sitio de Control (nivel basal).

Se seleccionaron muestras (rotuladas como "Valores Base") de áreas que presentan características similares a las de los suelos con sospecha de presencia de contaminantes, donde se estima que no ha sido intervenido o afectado por actividades antropogénicas de diversa índole incluyendo aquellas características de la actividad minera y que permita estimar la composición natural del suelo, con el objeto de comparar los niveles de contaminación con las muestras recolectadas del sitio.

Para esto se definieron los mencionados puntos de muestreo de valor base por medio de la revisión y comparación con cartas geológicas de SERNAGEOMIN correspondientes al sector, de lo cual se obtuvo que los relaves se ubican sobre 4 clases de rocas diferentes, por lo que se tomaron 3 muestras por cada clase.

Las clases de rocas identificadas corresponden a suelos poco desarrollados característicos de la zona norte del país. Las cuatro clases de rocas correspondientes a las zonas de donde se toman las muestras de valor base corresponden a:

- **Ki2:** Súper Unidad Illapel, Unidad Limahuida, granodioritas leucocráticas con ferromagnesianos cloritizados y epidotizados.
- **Tc:** Formación confluencia (continental), conglomerados, areniscas, brechas y limolitas, poco consolidadas.
- **Qac(a):** Sedimentos aluviales y coluviales, depósito de rellenos de valles, conos de deyección torrencial y escombros de falda.
- **Ki1:** Super Unidad Illapel , Unidad Chalinga, granodioritas a dioritas cuarcíferas (monzogranitos) gris-claro a oscuro de grano medio grueso (pórfidos dacíticos).

No se monitoreó material particulado atmosférico, ni concentraciones de elementos en el aire.

Muestreo sitio Leopoldo Hernández.

En la Figura 28, se muestra la distribución espacial de las muestras adquiridas en los relaves del sitio en estudio denominado Leopoldo Hernández.



Figura 28. Distribución de los puntos de muestreo obtenidos en relave Leopoldo Hernández.

Las georreferencias correspondientes a cada punto del muestreo y su rótulo respectivo se presentan en la Tabla 16 a continuación.

Tabla 16. Puntos de muestreo y georreferencias sitio Leopoldo Hernández.

Leopoldo Hernández					
Superficie del sitio = 0,4Ha + 0,3Ha					
n = 10 muestras*					
ID	Coord UTM Datum WGS84 Zona 19J		ID	Coord UTM Datum WGS84 Zona 19J	
	Este	Norte		Este	Norte
LH-01	298107,349	6501180,56	LH-09 (i)	298131,284	6501144,9
LH-02	298098,146	6501171,856	LH-10	298123,622	6501152,244
LH-03	298087,157	6501162,104	LH-11	298118,367	6501147,54
LH-04	298080,934	6501171,149	LH-S01	298119,047	6501083,63
LH-05	298080,702	6501158,966	LH-S02	298157,461	6501066,761
LH-06	298074,574	6501157,024			
LH-07	298107,669	6501121,245			
LH-08	298131,305	6501133,196			

* Leopoldo Hernández cuenta con dos relaves, sin embargo se toman como uno solo debido a que no posee fronteras definidas entre un relave y el otro, a su vez el número de muestras se aproxima a 10.

Códigos de identificación:

LH-x: Leopoldo Hernández punto de muestreo número x.

LH-Sx: Leopoldo Hernández-quebrada punto de muestreo número x.

Suelos sin intervención por actividad minera.

En la siguiente Figura 29, se muestra la superposición de mapa y carta geológica, para la selección de zonas de muestreo como valores base para este estudio en particular.

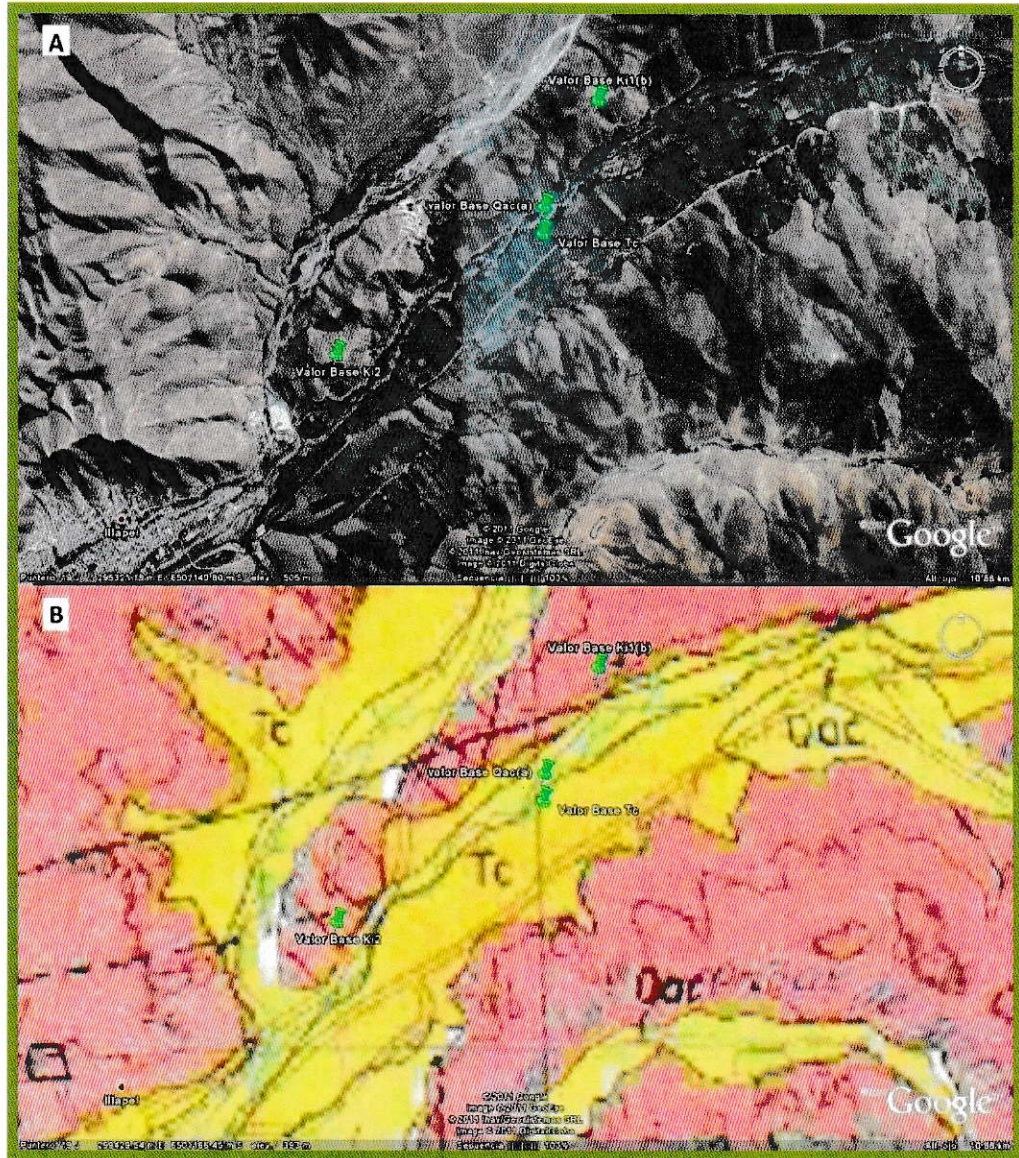


Figura 29. Referencia clasificación de suelos para puntos de muestreo Valor Base.

(A) Imagen satelital (GoogleEarth, 2004). (B) Carta geológica SERNAGEOMIN (Rivano, 1986).

Los puntos de muestreo para cada tipo de zona identificada de Valores Base se muestran en la Figura 30.

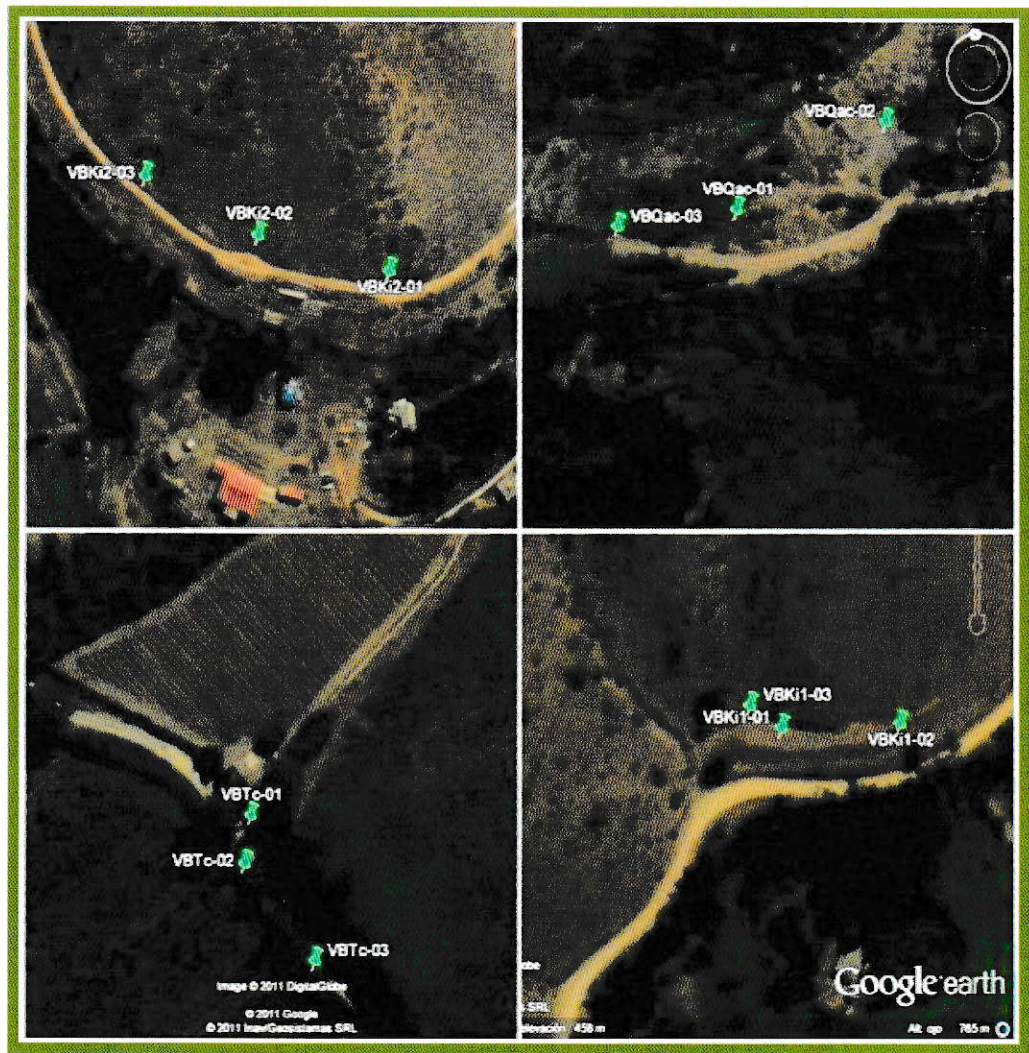


Figura 30. Distribución de los puntos de muestreo obtenidos para Valores Base.

Además, las georreferencias y rótulos de estas muestras tomadas para valores base, se presentan en la Tabla 17.

Tabla 17. Puntos de muestreo y georreferencias de las muestra “Valor Base”

Valor Base					
n = 12 muestras					
ID	Coord UTM Datum WGS84 Zona 19J		ID	Coord UTM Datum WGS84 Zona 19J	
	Este	Norte		Este	Norte
VBKi2-01	297154,554	6500003,94	VBTC-01	299868,844	6501856,09
VBKi2-02	297069,566	6500099,42	VBTC-02	299865,28	6501839,61
VBKi2-03	297024,42	6500124,98	VBTC-03	299889,812	6501804,9
VBQac-01	299600,353	6501975,17	VBKi1-01	300362,011	6502856,09
VBQac-02	299626,422	6501981,2	VBKi1-02	300400,879	6502854,22
VBQac-03	299553,588	6501972,43	VBKi1-03	300351,871	6502863,23

Código de identificación:

VBKi2-x: Muestreo valor base correspondiente a zona de rocas Ki2 punto de muestreo nº x.

VBTC-x: Muestreo valor base correspondiente a zona de rocas Tc punto de muestreo nº x.

VBQac-x: Muestreo valor base correspondiente a zona de rocas Qac(a) punto de muestreo nº x.

VBKi1-x: Muestreo valor base correspondiente a zona de rocas Ki1(b) punto de muestreo nº x.

Los resultados obtenidos en los análisis realizados a las muestras sólidas del relave Leopoldo Hernández y suelos para Valores Base, se presentan en las Tablas 18 y 19 respectivamente, a continuación. Se utiliza la técnica ICP-OES para analitos As y Pb. En el caso de Hg se miden las muestras por mercuriómetro para concentraciones bajas y debido a que este último equipo se satura con concentraciones altas, se utiliza de forma alternativa FRX para cuantificar las muestras de mayor concentración (en este caso desde LH-06 hasta LH-11).Cálculos de UCL95% y su explicación se presentan posteriormente.

Tabla 18. Concentración de elementos (en mg/kg, BMS) para muestras de relave
Leopoldo Hernández

ID	Hg	Pb	As
	mg/kg		
LH-01	27,05	186,28	538,05
LH-02	7,94	38,37	1056,37
LH-03	5,65	42,70	2676,30
LH-04	5,22	0,75	< LD
LH-05	15,19	43,43	1327,56
LH-06	118,40	38,56	206,92
LH-07	379,43	34,34	155,65
LH-08	225,86	23,82	235,68
LH-09	1505,71	18,48	309,91
LH-10	667,43	23,57	250,82
LH-11	115,00	27,51	84,41
UCL 95%	939,1	107,8	1467
LD	0,0015 Mercuriómetro 13 FRX	0,27	2,3

En el caso de Valores Base, se miden As y Pb con técnica ICP-OES y Hg todas por mercuriómetro. Los resultados se presentan en Tabla 19 a continuación.

Tabla 19. Concentración de elementos (en mg/Kg, BMS) para muestras Valor Base

ID Cliente	Hg	Pb	As
	mg/kg		
VBKi2-01	0,12	0,70	< LD
VBKi2-02	0,05	1,11	< LD
VBKi2-03	0,07	1,71	< LD
VBQac-01	0,14	8,64	< LD
VBQac-02	0,25	7,19	< LD
VBQac-03	0,09	8,93	< LD
VBTC-01	0,06	7,66	< LD
VBTC-02	0,19	9,43	< LD
VBTC-03	0,05	8,28	< LD
VBKi1-01	0,03	7,14	< LD
VBKi1-02	0,15	6,15	< LD
VBKi1-03	0,06	7,85	< LD
UCL 95%	0,14	7,881	< LD
LD	0,0015 Mercuriómetro	0,27	2,3

3.3.2 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 se trata de una baja cantidad de valores. 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. (EPA, 2002)

En el caso de este estudio, se obtuvo el UCL de cada conjunto de datos utilizando el programa ProUCL, el cual es distribuido de forma gratuita en el sitio web de EPA. El programa realiza una serie de cálculos e iteraciones que determinan la distribución estadística a la que mejor se ajusta el conjunto de datos que se computan para la evaluación. Además, entrega datos y estadígrafos como máximo y mínimo, promedio, desviación estándar, coeficientes de variación, entre otros.

Para calcular el valor de concentración de los parámetros para cada SPPC se calculó el UCL correspondiente utilizando el conjunto de datos obtenidos por SPPC. 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.

Para realizar la comparación con los valores de referencia, se considera el criterio para usos residenciales en todas las normas, dado que este es el más restrictivo y es el tipo de población expuesta común para todos los casos. Los valores normados se presentan en la Tabla 20 a continuación.

Tabla 20. Valores referenciales seleccionados por normativas internacionales y valor base.

Uso de Suelo						
	Canadá	Australia	México	Brasil	País Vasco	Valor Base
Parámetro (mg/Kg)	Uso residencial/parques	Uso Residencial con jardín accesible	Uso agrícola/residencial/comercial	Uso industrial	Uso urbano	-
Hg	6,6	15	23	50	4	0,14
Pb	140	300	400	600	150	7,9
As	12	100	22	12	30	< LD

A continuación se muestra, en las Figuras 31, 32 y 33, la comparación de los UCL 95% de los elementos en evaluación, calculados para los sitios en estudio, con el contenido del valor base y los valores de normas internacionales (uso residencial). El uso de gráficos de barras tiene como objetivo facilitar la comparación.

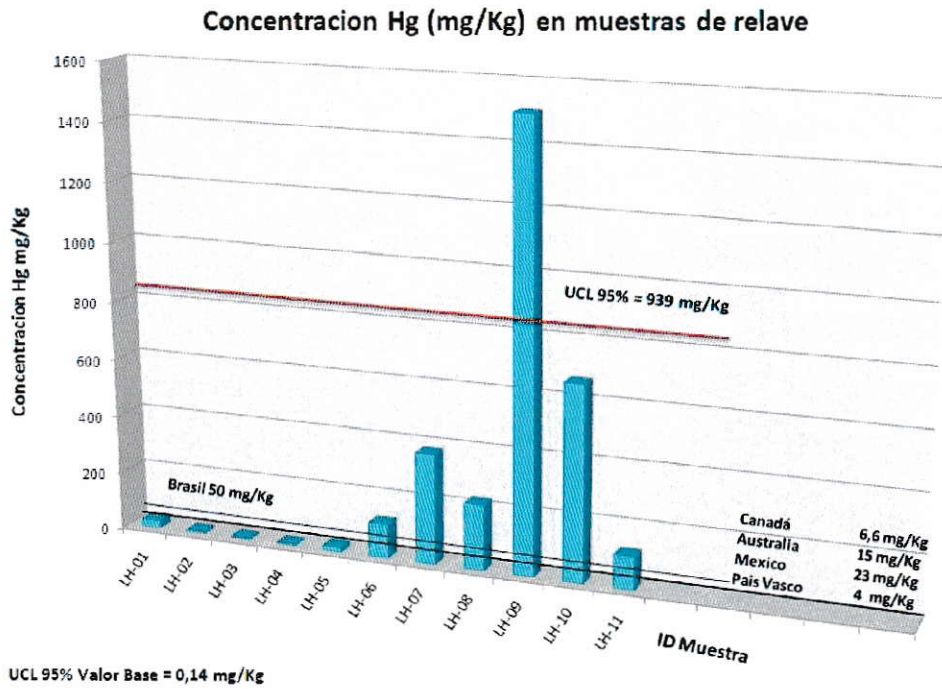


Figura 31. Resultados analíticos y UCL 95% calculado para mercurio en muestras de relave Leopoldo Hernández y su comparación con normativas internacionales y valores base.

Es posible apreciar que todas las normativas utilizadas y los contenidos basales detectados de Hg en la zona son superados ampliamente por el valor de UCL 95% calculado para las muestras de relave.

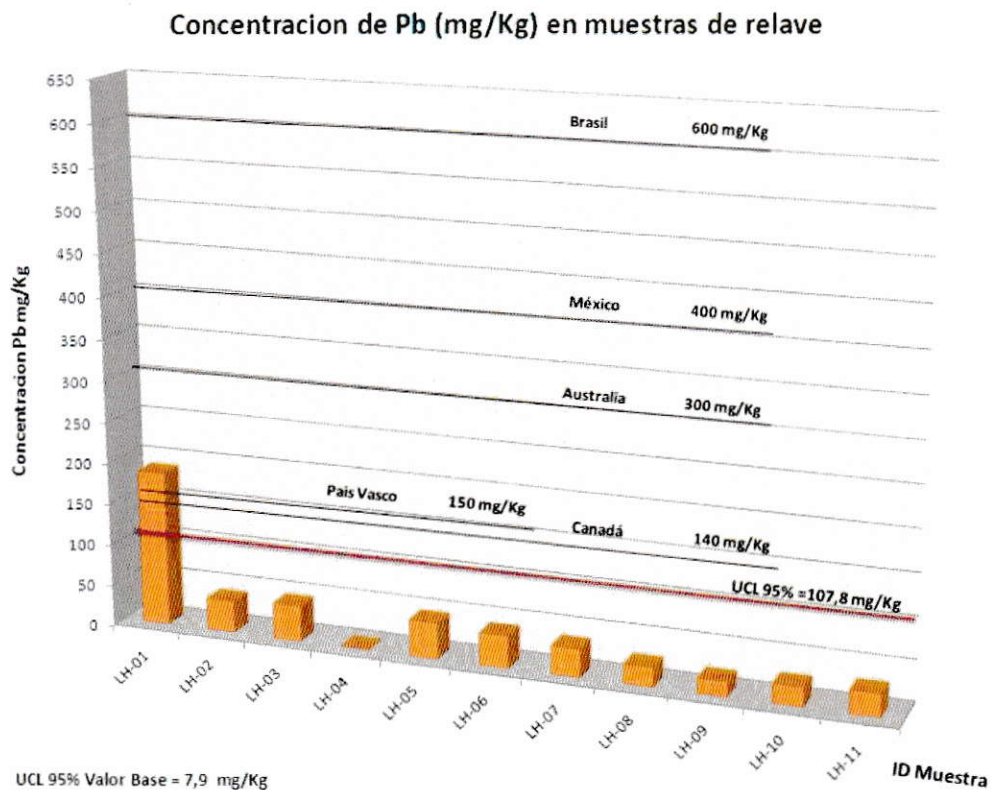


Figura 32. Resultados analíticos y UCL 95% calculado para plomo en muestras de relave Leopoldo Hernández y su comparación con normativas internacionales y Valores Base.

Ninguna de las normativas utilizadas para comparación es superada por el valor de UCL 95% obtenido para plomo. Si se supera ampliamente el valor basal de plomo de 7,9 mg/Kg. Es posible que el procesamiento de oro por amalgamación aporte en la pérdida de elementos como este debido a la formación de la amalgama (presencia de oro).

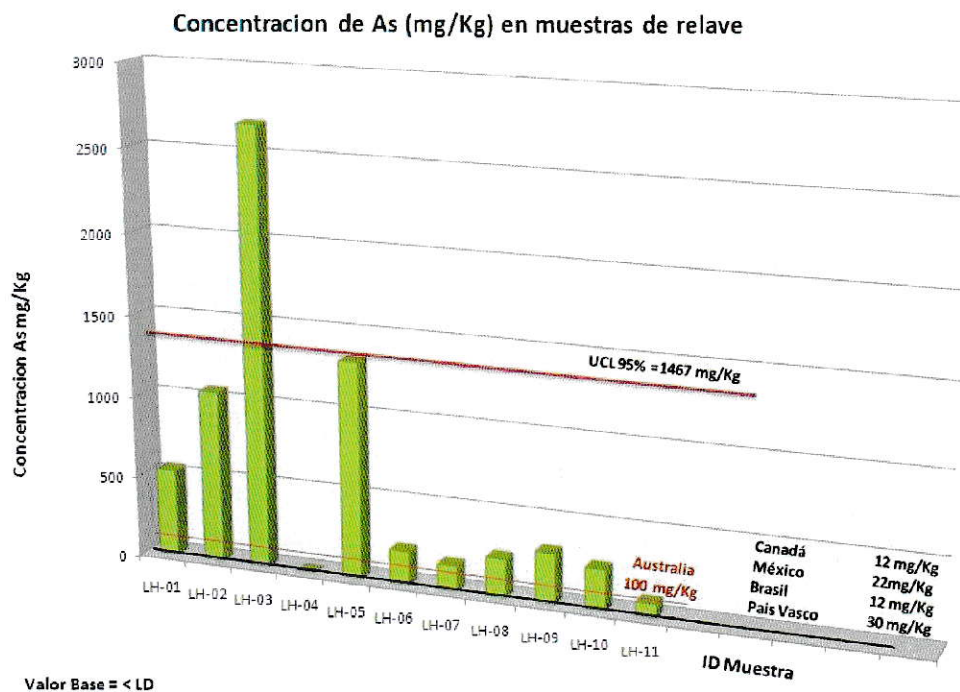


Figura 33. Resultados analíticos y UCL 95% para arsénico en muestras de relave Leopoldo Hernández y su comparación con normativas internacionales y Valores Base.

Es posible apreciar que todas las normativas utilizadas y los contenidos basales detectados de As en la zona son superados ampliamente por el valor de UCL 95% calculado.

A su vez los resultados de concentraciones obtenidas en los suelos cercanos a los relaves presentaron los valores indicados en la Tabla 21:

Tabla 21. Concentración de metales detectados por ICP en muestras de suelo aledaños a los SPPC y Hg por mercuriómetro.

ID	Hg	Pb	As
	mg/kg		
LH-S01	42,25	33,49	121,32
LH-S02	0,16	7,60	< LD
UCL 95% Valor Base	0,14	7,90	< LD
LD	0,0015 Mercuriómetro	0,27	2,3

La concentración puntual de mercurio en uno de los suelos cercanos a los relaves supera el valor base. Esto podría deberse a derrames y también a la retención del metal por materia orgánica y contenido de arcillas presente en los suelos, influenciado por la presencia de los relaves. También se supera en magnitudes importantes el valor de As y Pb en menor medida.

3.3.3 Calidad de aguas comuna de Illapel.

Calidad de Aguas Superficiales.

Con el fin de evaluar preliminarmente si los relaves afectan la calidad de las aguas superficiales de Illapel se solicitó información a la DGA, con la cual se analizará la calidad de las aguas, ya que si éstas se encuentran dentro de los parámetros de calidad establecidos, los relaves no estarían influenciando de forma significativa la contaminación de dichas aguas.

Por otro lado, si se encuentran evidencias de una calidad deteriorada, no sería posible correlacionar dicho deterioro con la influencia de los relaves (ni de identificar alguno en particular), dado que podría deberse incluso a factores naturales propios de la zona.

Debido a la alta actividad agrícola de la zona y el consiguiente uso principal de las aguas para riego, se evalúa la calidad de las aguas en base a la NCh1333 a modo referencial.

Los datos obtenidos de la DGA provienen de tres de las estaciones de monitoreo de dicha institución (Figura 34), de las cuales 2 se encuentran en el río Illapel; una aguas arriba (A Ar en los gráficos) -Estación Las Burras- y otra aguas abajo (A Ab en los gráficos) -Estación El Peral-, cerca de la unión de dicho río con el río Choapa. La tercera estación está ubicada en el estero Aucó (Estación Estero Aucó) antes de llegar al río Illapel. Los datos presentados corresponden en su mayoría a valores puntuales y promedios de valores puntuales anuales.

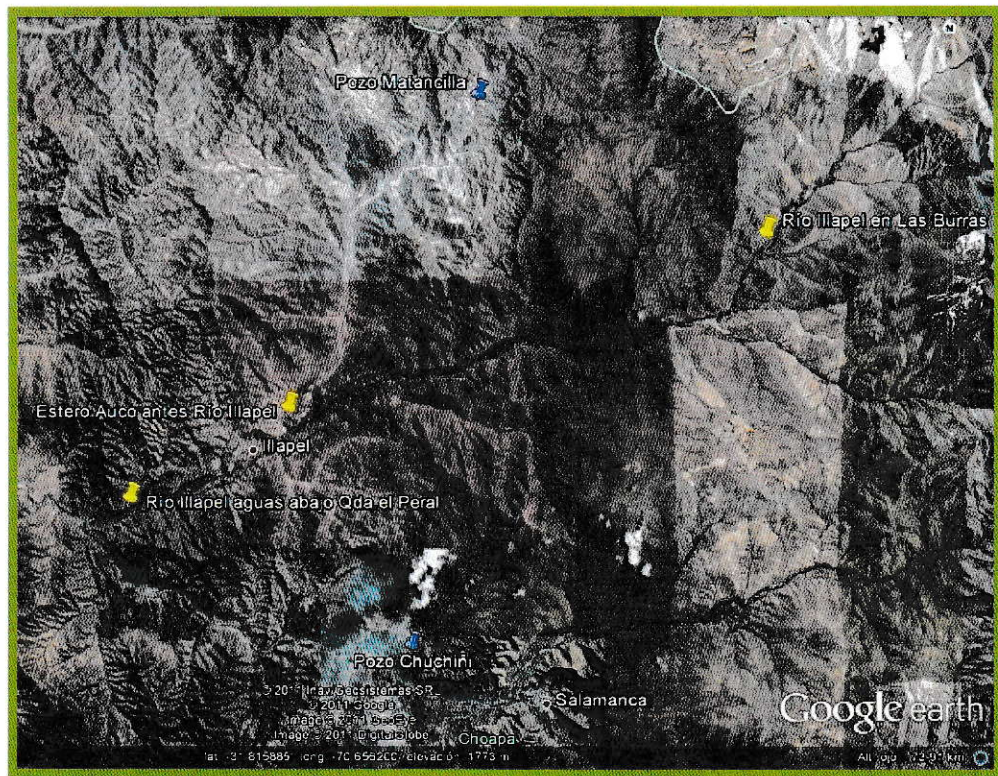


Figura 34. Ubicación estaciones de monitoreo de la Dirección General de Aguas (Imagen Google Earth).

A continuación se presentan las gráficas que resumen los datos calidad de agua obtenidos de las estaciones de monitoreo de la DGA, Figuras 35 y 36.

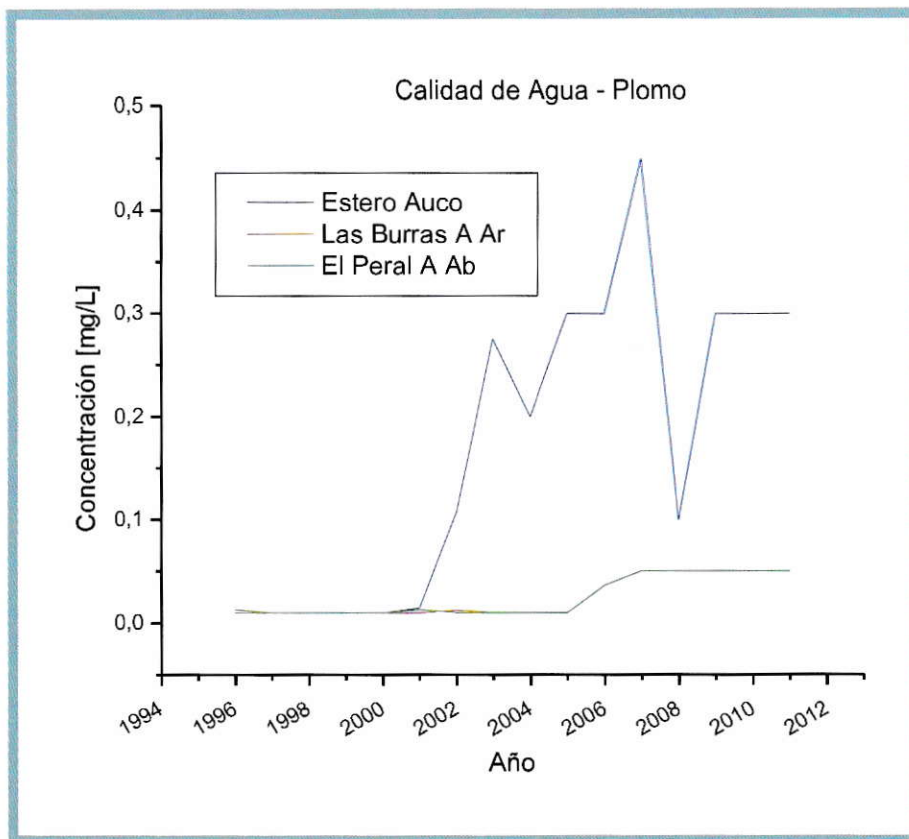


Figura 35. Valores históricos de concentración de plomo en estaciones Estero Aucó, Las Burras (aguas abajo) y El Peral (aguas arriba), comparación a NCh 1333

El valor de la norma para plomo no se presenta en el gráfico, ya que este corresponde a 5mg/L. Por lo tanto, el plomo no supera la norma en el rango temporal presentado. Sin embargo, presenta una tendencia al alza en los últimos años en la estación del estero Aucó.

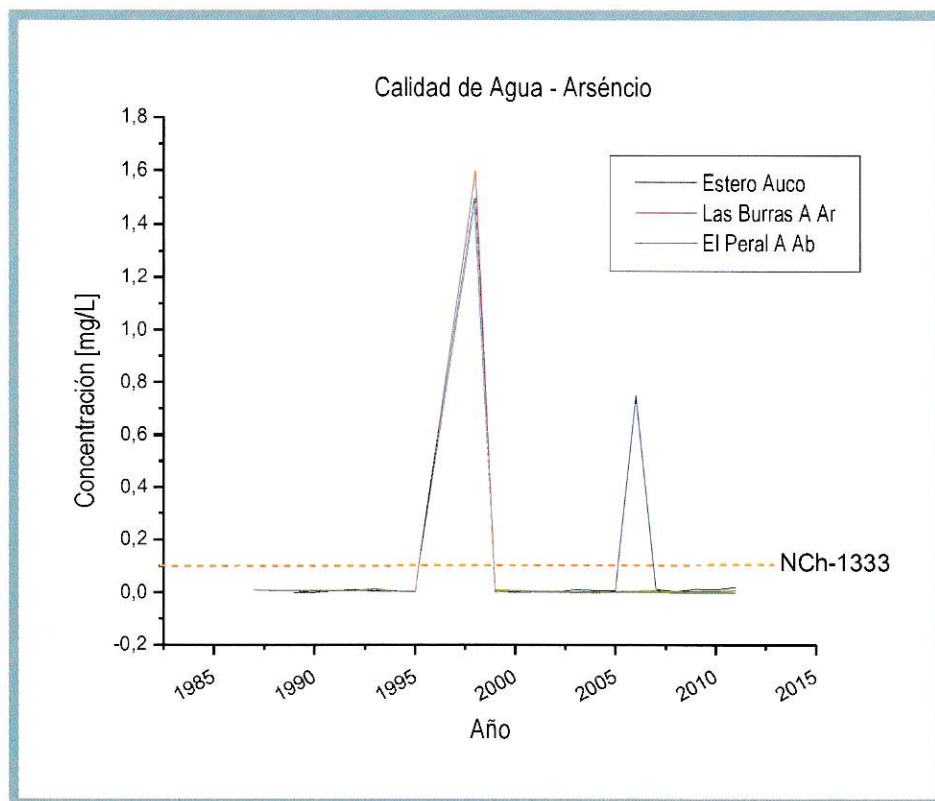


Figura 36. Valores históricos de concentración de arsénico en estaciones Estero Aucó, Las Burras (aguas abajo) y El Peral (aguas arriba), comparación a NCh 1333

Se puede apreciar que el arsénico supera en dos eventos el valor estipulado por la NCh 1333 en casi un orden de magnitud. Ambas superaciones de la norma ocurren en el estero Aucó, mientras que la primera también se presenta en la Estación las Burras. Estación de monitoreo El Peral (aguas abajo), no supera la norma en ningún caso.

En resumen, las aguas superficiales del río Illapel y el estero Aucó ven afectada su calidad por As, sin embargo, los eventos de superación de la norma por este elemento son puntuales y no una constante según lo que se grafica con los datos históricos otorgados por DGA. En el caso del Pb, si bien se registran concentraciones de este elemento disuelto en las aguas, éstas no superan la norma utilizada para evaluación.

El mercurio se presenta bajo el límite de detección en todas las medidas realizadas por la DGA para la serie temporal seleccionada en este estudio.

Por otra parte con el fin de evaluar la calidad de las aguas superficiales de la zona de estudio, se tomaron muestras puntuales. Los puntos de muestreo de estas aguas se ilustran en la Figura 37.

Tabla 22. Muestras de agua Illapel y parámetros medidos en terreno

Muestreo Aguas					
ID	Coord UTM Datum WGS84 Zona 19J		pH	T [°C]	Conductividad Eléctrica [µs/cm]
	Este	Norte			
AS-eArl	296804,226	6499600,86	8,14	20,0	467
AS-rl(PO)	294125,288	6497312,98	8,62	25,8	492
AS-rl(aguas arriba)	299552,964	6501971,81	7,15	20,6	553
AP-aguas del valle	295783,044	6498728,4	7,57	30,3	1062

AS-eArl: Agua superficial estero Aucó-Río Illapel AS-rl(PO): Agua Superficial Pluma de Oro; AP-aguas del valle: Agua pozo Aguas del Valle.

Norma Ch.1333 indica valores de pH en el rango 5,5 – 9,0: Conductividad Especifica 750 mhos/cm (750µS/cm) y No indica valores de temperatura.

Las muestras de agua no presentan parámetros que superen los valores indicados por la norma exceptuando Agua Pozo Aguas del Valle que supera levemente la norma por conductividad, pero se trata de aguas de pozo, las cuales no son utilizadas directamente para riego, sino que son aguas tratadas para posteriormente ser distribuidas como agua potable a la población. En este proceso son nuevamente controladas al finalizar el tratamiento de potabilización y deben cumplir con la normativa correspondiente (la cual es más restrictiva que NCh 1333)

Paralelamente, se puede observar una tendencia hacia pH levemente alcalino. A pH alcalino tanto el plomo como el mercurio tienden a precipitar (formando sus hidróxidos), lo que podría ayudar a que éstos estén menos disponibles en disolución en las aguas de Illapel. Arsénico se mantiene soluble al formar oxianiones.

A continuación, en la Figura 37 se presenta la distribución espacial con la que fueron tomadas las muestras puntuales de agua en terreno:



Figura 37. Muestras de agua superficial Illapel y muestra de agua bocatoma Aguas del Valle.

Asimismo, en la Tabla 23 se muestran los contenidos de elementos medidos en las muestras puntuales de agua colectadas en terreno.

Tabla 23. Concentración (mg/L) de elementos para análisis de aguas superficiales

ID	Hg	Pb	As
	mg/L		
AS-EARI	<LD	<LD	<LD
AS-RI (PO)	<LD	<LD	<LD
AS-RI(Aguas arriba)	<LD	<LD	<LD
AP-Aguas del Valle	<LD	$5,7 \cdot 10^{-2}$	<LD
NCh 1333	0,001	5	0,1
LD	$3,93 \cdot 10^{-4}$	$2,18 \cdot 10^{-3}$	$6,36 \cdot 10^{-3}$

Código identificación: AS-EARI: Agua superficial estero Aucó-Río Illapel/ AS-RI(PO): Agua Superficial Pluma de Oro/ AS-RI(Aguas arriba): Agua superficial Río Illapel aguas arriba

Todos estos valores se encuentran por debajo de los valores indicados en la NCh1333. Mercurio y arsénico medido en estas muestras, presentan resultados por debajo del límite de detección en todos los casos.

Calidad de Agua Potable.

En cuanto a la calidad del agua potable de la comuna, según información recabada en un estudio a petición del SEREMI de salud de la región de Coquimbo en Febrero del año 2011, la calidad del agua potable de la zona se encontraría en buenas condiciones.

Por otra parte según datos solicitados a la Superintendencia de Servicios Sanitarios de fiscalización del agua potable de la empresa Aguas del Valle y también la solicitud de datos de calidad a la propia empresa Aguas de Valle (empresa proveedora de agua potable de Illapel), los valores se encuentran dentro de lo estipulado por la norma. Además, fue colectada una muestra de la bocatoma para potabilización de la empresa Aguas del Valle, cuyos resultados del barrido de elementos se muestran en la Tabla 23.

Al comparar los valores obtenidos con los valores de la NCh-409/1, sólo el plomo supera la norma, siendo su valor límite estipulado de 0,05 mg/L. Sin embargo, la muestra en cuestión es una muestra de agua cruda, es decir que aún no pasa por los procesos de potabilización, por lo tanto, dicha superación de la norma, que puede ser considerada como baja, probablemente se vea subsanada por los procesos de fluoculación y posterior precipitación.

El mercurio también fue medido en esta muestra y no se encontró presencia de dicho elemento.

A continuación se presentan fotografías del muestreo de aguas (Figuras 38 y 39).

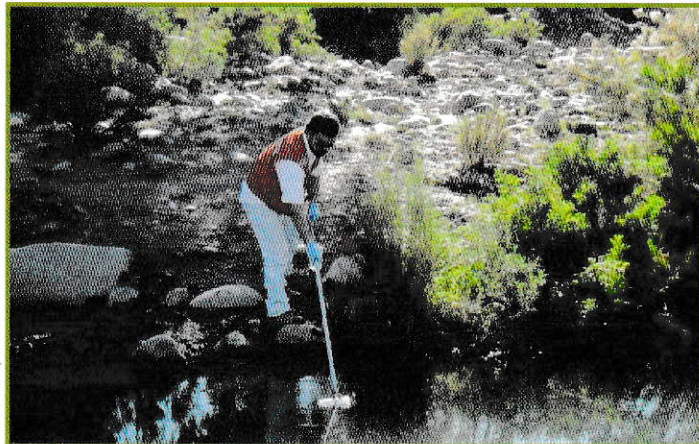
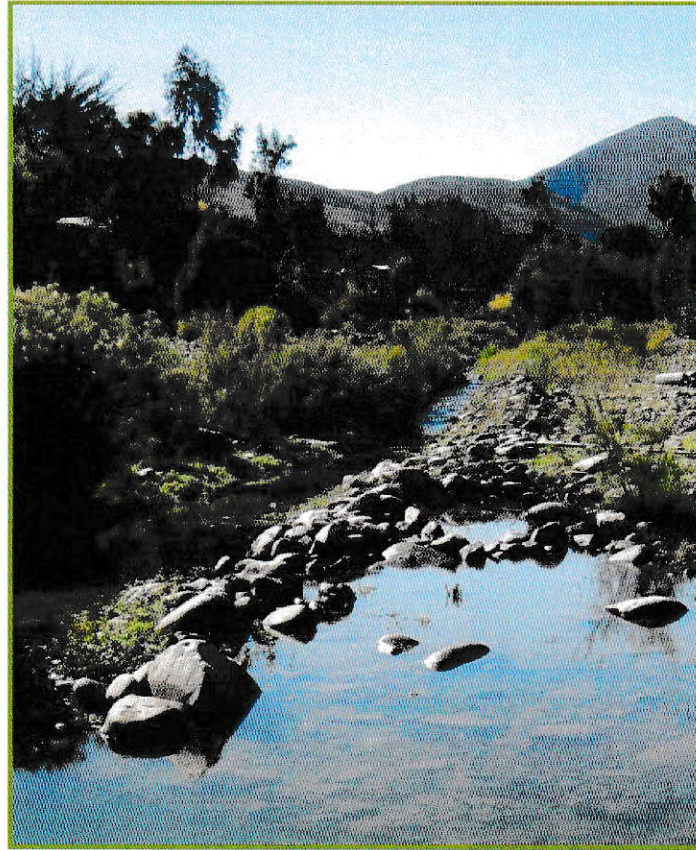


Figura 38. Zona de muestreo en terreno río Illapel aguas arriba.



Figura 39. Análisis en terreno de parámetros en aguas.

3.4 Caracterización Preliminar del Riesgo.

En esta etapa de la investigación se requiere llevar a cabo una segunda etapa de muestreo, donde se obtenga información detallada para la realización de los cálculos, por lo que cabe destacar que se le nombra como “preliminar” ya que a modo de ejercicio inicial y explicativo se ejecutan los cálculos para estimar el riesgo, con la información disponible para una evaluación aproximada.

Además, se ha seleccionado el contaminante arsénico para el ejercicio de cálculo, utilizando una concentración de arsénico calculada por medio de media aritmética UCL 95% según distribución de datos **As = 1467 mg/kg**.

Para el cálculo de **Riesgo no cancerígeno (umbral)** se utilizan las variables presentadas en la Tabla 24, para completar Ecuaciones 4, 5, 6 y 7.

Tabla 24. Variables utilizadas para la caracterización del riesgo no cancerígeno

Ingestión	RESIDENCIAL			Dérmico	RESIDENCIAL		
	UNIDAD	Niño	Adulto		UNIDAD	Niño	Adulto
C	mg/kg	1467	1467	C	mg/Kg	1467	1467
CF ₁	kg/mg	1·10 ⁻⁰⁶	1·10 ⁻⁰⁶	CF ₄	(kgcm ²)/(mgm ²)	0,01	0,01
EF	días/año	350	350	SA	m ² /día	0,53	0,53
FI	NA	1	1	AF	mg/cm ²	1	1
ED	años	6	24	ABS	NA	0,03	0,03
IR	mg/día	200	100	EF	días/año	350	350
BW	kg	15	70	ED	años	30	30
CF ₂	días/año	365	365	BW	kg	15	70
				CF ₂	días/año	365	365

Realizando el cálculo en las Ecuaciones 4, 5, 6 y 7 con las variables anteriormente mencionadas, se obtienen los resultados de la Tabla 25, para la caracterización del riesgo no cancerígeno:

Tabla 25. Resultados obtenidos en la caracterización del riesgo no cancerígeno

RESIDENCIAL	Niño	Adulto
Dosis Ingesta accidental mg/kg·día	$1,88 \cdot 10^{-02}$	$2,01 \cdot 10^{-03}$
Dosis Contacto dérmico mg/kg·día	$1,49 \cdot 10^{-02}$	$3,20 \cdot 10^{-03}$
HQ ingesta accidental (Dosis/RfD _i)	$6,25 \cdot 10^{+01}$	$6,70 \cdot 10^{+00}$
HQ contacto dérmico (Dosis/RfD _d)	$4,97 \cdot 10^{+01}$	$1,07 \cdot 10^{+01}$
HI = HQ_i + HQ_d	$1,12 \cdot 10^{+02}$	$1,73 \cdot 10^{+01}$

En la caracterización preliminar del riesgo no cancerígeno por contenidos de arsénico de 1467 mg/kg (UCL 95%), se obtienen valores para el cociente de peligro (HQ) por ingesta accidental para niños y adultos de $6,25 \cdot 10^{+01}$ y $6,70 \cdot 10^{+00}$ respectivamente y por contacto dérmico de $4,97 \cdot 10^{+01}$ y $1,07 \cdot 10^{+01}$ respectivamente, como también el **índice de peligro (HI) para niños de $1,12 \cdot 10^{+02}$ y adultos de $1,73 \cdot 10^{+01}$ en usos residenciales de suelo, los cuales indican un alto nivel de riesgo superando ampliamente el valor establecido para la evaluación (HI > 1 indicador de existencia de riesgo).**

Para el cálculo de **Riesgo cancerígeno (no umbral)** se utilizan las variables presentadas en la Tabla 26 para completar Ecuación 4, 5, 8 y 10:

Tabla 26. Variables utilizadas para la caracterización del riesgo cancerígeno

Ingestión	RESIDENCIAL			Dérmico	RESIDENCIAL		
	UNIDAD	Niño	Adulto		UNIDAD	Niño	Adulto
C	mg/kg	1467	1467	C	mg/Kg	1467	1467
CF ₁	kg/mg	$1 \cdot 10^{-06}$	$1 \cdot 10^{-06}$	CF ₄	(kgcm ²)/(mgm ²)	0,01	0,01
EF	días/año	350	350	SA	m ² /día	0,53	0,53
FI	NA	1	1	AF	mg/cm ²	1	1
ED	años	6	24	ABS	NA	0,03	0,03
IR	mg/día	200	100	EF	días/año	350	350
BW	kg	15	70	ED	años	30	30
CF ₂	días/año	365	365	BW	Kg	15	70
LT	años	70	70	CF ₂	días/año	365	365
				LT	años	70	70

Realizando el cálculo en la Ecuaciones 4, 5, 6 y 7 con las variables anteriormente mencionadas, se obtienen los resultados que muestra la Tabla 27, para la caracterización del riesgo no cancerígeno:

Tabla 27. Resultados obtenidos en la caracterización del riesgo cancerígeno.

RESIDENCIAL	Niño	Adulto
Dosis Ingesta accidental mg/kg·día	$1,61 \cdot 10^{-03}$	$6,89 \cdot 10^{-04}$
Dosis Contacto dérmico mg/kg·día	$2,44 \cdot 10^{-07}$	$2,62 \cdot 10^{-07}$
ELCR ingesta accidental (Dosis·SFO _i)	$2,41 \cdot 10^{-03}$	$1,03 \cdot 10^{-03}$
ELCR ingesta accidental (Dosis·SFO _d)	$1,05 \cdot 10^{-08}$	$1,13 \cdot 10^{-08}$
ELCR_T = ELCR_i + ELCR_d	$1,20 \cdot 10^{-02}$	$3,09 \cdot 10^{-03}$

En la caracterización preliminar del riesgo cancerígeno por contenidos de arsénico de 1467 mg/kg (UCL 95%), se obtienen valores para el riesgo extra de cáncer de por vida (ELCR) por ingesta accidental para niños y adultos de $2,41 \cdot 10^{-03}$ y $1,03 \cdot 10^{-03}$ respectivamente y por contacto dérmico de $1,05 \cdot 10^{-08}$ y $1,13 \cdot 10^{-08}$ respectivamente, como también el **riesgo extra de cáncer de por vida total (ELCR_T) para niños de $1,20 \cdot 10^{-02}$ y adultos de $3,09 \cdot 10^{-03}$ en usos residenciales de suelo, que indican un alto nivel de riesgo de cáncer superando ampliamente el valor establecido para la evaluación (ELCR_T < $1 \cdot 10^{-4}$)**. Esto estaría indicando que existe el riesgo de que se presenten 12 casos de cáncer en una población total de 1000 niños o aproximadamente 31 en una población total de 10.000 adultos expuestos a los depósitos de relave en un periodo vital de 70 años.

No se debe perder de vista que los depósitos de relave si bien no están emplazados directamente en los suelos de los sectores residenciales evaluados, estos están a escasos metros entre si, por lo cual la población recibe la incidencia del material acumulado de forma permanente por resuspensión de material particulado o por escurrimientos del relave, situación que se ha presentado en repetidas oportunidades en el pasado.

IV. CONCLUSIONES.

- ◇ Fue posible la identificación, inspección y priorización de SPPC en la comuna de Illapel y posteriormente la recopilación de datos y antecedentes relevantes de cada sitio, con especial énfasis en las potenciales sustancias contaminantes presentes. De la misma manera se pudo identificar las posibles rutas y receptores en cada SPPC, con la consiguiente elaboración de modelos conceptuales representativos del potencial riesgo asociado a cada uno de los sitios priorizados.

- ◇ Se realizó el correspondiente análisis estadístico de los resultados obtenidos de la caracterización de los SPPC, y su comparación con valores base obtenidos de zonas no intervenidas por la actividad minera, así como también con normas internacionales (Australia, Canadá, País Vasco, México y Sao Paulo). De estas comparaciones se obtuvieron los siguientes resultados:

- Leopoldo Hernández:

Respecto a Valores Base:

El mercurio supera ampliamente el valor base por alrededor de tres órdenes de magnitud alcanzando un UCL 95% de 939 mg/kg.

Arsénico supera el valor base presentando concentraciones de alrededor de 1467 mg/kg (en valor base no fue posible cuantificar dicho contaminante sobre el límite de detección de la técnica analítica utilizada).

El plomo supera el valor base (7,9 mg/kg) en poco más de un orden de magnitud presentando UCL 95% de 107,8 mg/kg

Respecto de las normas:

El plomo no supera norma alguna.

El mercurio supera todas las normas por un rango amplio (entre 2 y 3 órdenes de magnitud).

El arsénico supera todas las normas por cerca del doble de concentración.

En resumen se considera que el sitio Leopoldo Hernández presenta indicios claros de importante presencia de contaminantes mercurio, arsénico y en menor medida plomo. Cabe destacar los altos niveles de mercurio y arsénico, los cuales presentan concentraciones extremadamente elevadas, las que superarían de manera contundente cualquier norma vigente a nivel mundial.

A su vez los suelos aledaños presentan altas concentraciones de mercurio. De la misma manera, en la visita de inspección al sitio se encontró indicios de mercurio en el pozo del APR que se encuentra quebrada abajo del sitio, por lo que podría existir contaminación del agua subterránea.

- ◇ En cuanto a la calidad de las aguas superficiales, se aprecian malas condiciones en eventos aislados de arsénico. Los eventos de mala calidad del agua se producen principalmente en la estación del estero Aucó (de baja capacidad de dilución) y estación El Peral (río Illapel aguas abajo). Plomo y mercurio no superan la norma en el período evaluado.

- ◇ Los análisis de agua potable de la zona de Illapel no presentan evidencia de contaminación producto de elementos provenientes de los relaves. De manera similar, el agua cruda extraída de pozo por Aguas del Valle, no presenta altas concentraciones de elementos, por lo que el factor de contaminación de las

napas subterráneas debería ser un factor a reevaluar en el modelo conceptual para estos SPPC, ya que posiblemente esta ruta de exposición no se presenta.

- ◇ En la caracterización preliminar del riesgo no cancerígeno por contenidos de arsénico de 1467 mg/kg (UCL 95%), se obtiene **índice de peligro (HI) para niños de $1,12 \cdot 10^{+02}$ y adultos de $1,73 \cdot 10^{+01}$ en usos residenciales de suelo, los cuales indican un alto nivel de riesgo superando ampliamente el valor establecido para la evaluación ($HI > 1$ indicador de existencia de riesgo).**

- ◇ En la caracterización preliminar del riesgo cancerígeno por contenidos de arsénico de 1467 mg/kg (UCL 95%), se obtiene **riesgo extra de cáncer de por vida total ($ELCR_T$) para niños de $1,20 \cdot 10^{-02}$ y adultos de $3,09 \cdot 10^{-03}$ en usos residenciales de suelo, que indican un alto nivel de riesgo de cáncer superando ampliamente el valor establecido para la evaluación ($ELCR_T < 1 \cdot 10^{-4}$).**

- ◇ Cabe destacar que hasta esta etapa de la metodología de evaluación de riesgos se ha comprobado la existencia de una fuente de contaminación en el sitio en evaluación, alcanzando en algunos casos niveles extremadamente altos de contaminación, por lo que en próximas etapas deberían evaluarse las diferentes rutas y dosis de contaminantes recibidas por los receptores de modo más específico con las correspondientes campañas de muestreo detallado, **para estimar la existencia o inexistencia de riesgo, por medio del cálculo de índices de peligro, y su caracterización en un nivel de profundidad adecuado.**

- ◇ La ausencia de un estándar nacional para definir la calidad de suelo y los criterios para establecer el grado de alteración o contaminación tolerable, dificulta una clasificación aceptable para los distintos actores que participan de la gestión ambiental.

- ◇ Se debiera completar la evaluación de riesgos de los sitios que presentan altos niveles de contaminación, por medio del monitoreo de muestras planificadas, amplias e integrales, que permitan la caracterización del riesgo, con el fin de proponer las medidas de gestión adecuadas al nivel de riesgo que sea determinado para cada sitio.

- ◇ Para complementar el proceso de evaluación de riesgos se debe desarrollar una línea sistemática de educación e información a la comunidad con el fin de enterar a la comunidad acerca de la existencia o inexistencia de riesgos asociados a pasivos ambientales que se encuentran en su entorno, así como de su magnitud.

- ◇ Es posible integrar en este tipo de estudios el aporte de otras áreas afines, como lo sería un estudio epidemiológico (estudio multidisciplinario) el cual evidencie la incidencia de enfermedades relacionadas a la intoxicación por elementos como los evaluados (As, Hg y Pb) y/o incidencias de cáncer, en relación a poblaciones control, las cuales no estén expuestas a altos niveles de dichos elementos.

V. REFERENCIAS.

ASTM D6009-96 (1996). American Society for Testing Material, *Standard Guide for Sampling Waste Piles*.

Baird, C., 2004. *Química Ambiental*. Ed. Reverté. 2da Edición.

Canadian Council of Ministers of the Environment (2008). National Classification System for Contaminated Sites. Guidance document. (PN 1403).

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.

Catastro de sitios con presencia de dioxinas y furanos asociados al uso de pentaclorofenol en aserraderos Fase II- Metodología de Investigación Confirmatoria y Estimación Preliminar de Riesgos Ambientales

CENMA, 2011. *Protocolo de Muestreo de Contaminantes Metálicos en relaves Mineros*.

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*.

Chávez, M.; Gobernación Choapa, (2010). *Informe Evaluación de Riesgo Ambiental Tranques de Relaves Urbanos Comuna de Illapel*, Programa de Seguridad Ambiental.

CHILE. Ministerio de Medio Ambiente. 2011. Resolución exenta Nº 169: Aprueba metodología para la identificación y evaluación preliminar de suelos abandonados con presencia de contaminantes. 30 de diciembre 2011.

Comisión Nacional del Medio Ambiente - CONAMA/ARCADIS (2006): *Manual Técnico para la investigación Ambiental de Sitio*. Noviembre 2006.

Comisión Nacional del Medio Ambiente - CONAMA/ARCADIS (2006): *Manual Técnico para la investigación Ambiental de Sitio*. Noviembre 2006.

CONAMA, 2009. Plan Nacional para la Gestión de los Riesgos del Mercurio

Consultorías Profesionales Agraria Ltda., 2008. *Estudio de Formulación de Planes Marco de Desarrollo Territorial para la IV Región, Territorio Cuenca del Choapa*

Cortés, I.; Soubllette, N; Rebolledo, D.; Muñoz, J. (2011): *Evaluación de la calidad de los suelos en la comuna de Andacollo*. INFORME TECNICO

Department of Environment and Conservation (2010). *Contaminated Sites Management Series, Assessment levels for Soil, Sediment and Water (Version 4, revision 1)*, Australia.

Díaz, F. 1999. *Metodología de Identificación y Evaluación de Riesgos para la Salud en Sitios Contaminados*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, División de Salud y Ambiente; Organización Panamericana de la Salud (OPS); Oficina Sanitaria Panamericana; Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud. Perú.

Enciclopedia de la Flora Chilena <http://www.florachilena.cl/> Consulta vía web (Dic. 2011)

Fundación Chile (2011) *Guía de Confirmación de Sitios Contaminados*, Versión Preliminar del 9 de Mayo del 2011.

Fundación Chile, Programa de Medio Ambiente. PROYECTO N° 1588-155-LE09 Manejo de desechos de y con contenido de mercurio, Informe Final, Diciembre 2009. http://www.sinia.cl/1292/articles-47891_inf_final.pdf[consulta: Noviembre 2012]

ILMAL-018: *Determinación de mercurio en aguas*. Lab. de Química Ambiental, CENMA.

ILMAL-019. *Determinación de metales por ICP*. Lab. 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.

Ingenieros Geotécnicos Ltda. (Mayo 1999), *Informe de Diagnóstico de Riesgos Ambientales "Tranques de Relaves y Depósitos de Ripios IV Región*, (Informe preparado para CONAMA).

INIA, 2008. *Caracterización Química, Física y Biológica del Agua de la Cuenca del Choapa*

INIA-INNOVA (2008), *Caracterización química, física y biológica del agua de la Cuenca del Choapa*.

Ley 1/2005, de 4 de febrero, para la prevención y corrección de la contaminación del suelo. (País Vasco, España).

Ley N° 19.300 Sobre Bases Generales del Medio Ambiente (1994)

Ley N° 20.417, 2008. "Crea el Ministerio, el Servicio de Evaluación Ambiental y la Superintendencia del Medio Ambiente".

Ley N° 20.417, que "Crea el Ministerio, el Servicio de Evaluación Ambiental y la Superintendencia del Medio Ambiente". (2008).

Mazzo, R. 2009. *Chile y su postulación a la OCDE ¿En la recta final?* [en línea] Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN), 5 de Junio, 2009 http://www.bcn.cl/carpeta_temas_profundidad/chile-ocde-2009 [consulta: Noviembre 2012]

Ministerio de obras públicas, Dirección General de Aguas - DGA/ CADE-IDEPE, 2004: *Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua Según Objetivos de Calidad, Cuenca del Río Choapa.*

Ministerio del Medio Ambiente, 2012. *Informe del Estado del Medio Ambiente 2011.*

MMA-CENMA 2011, Términos de Referencia Proyecto 7 convenio transferencia 2011: *Evaluación de riesgos para la salud en asentamientos humanos próximos a sitios de minería metálica.* Aprobado el 26.04.2011

Norma Chilena Oficial N° 1333, Decreto Supremo del MOP N° 867/78 (Pub. Diario Oficial el 22 de Mayo de 1978), *Norma de Calidad de agua para aguas de regadío.*

Norma Chilena Oficial NCh 409/1.Of2005, *Norma de Calidad de Agua para Uso Potable.*

Norma Of. Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 establece criterios para determinar concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio y/o vanadio.

Observatorio urbano, Ministerio de vivienda y urbanismo, Indicadores urbanos datos de la comuna de Illapel. Visitado en Noviembre de 2011: <http://www.observatoriourbano.cl>

Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE) y Comisión Económica Para América Latina y el Caribe (CEPAL). *Evaluaciones del desempeño ambiental, Chile.* Naciones Unidas, 2005. p.26-34

Organización Mundial de la Salud OMS, 2003. *Elemental Mercury and Inorganic Mercury Compounds: Human Health Aspects.*

Organización Mundial de la Salud OMS, 2012. *Centro de Prensa. Arsénico, Ficha descriptiva N°372* [en línea].

<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs372/es/index.html>

[Consulta: Mayo de 2013]

Organización Mundial de la Salud OMS, 2010. *Exposure to lead: A Major public Health Concern* [en línea].

http://www.who.int/ipcs/assessment/public_health/lead/en/#

[Consulta: Mayo de 2013]

Parra Berrios, Amparo Luz (2006). *Influencia de la actividad minera en la calidad de las aguas del río Choapa y de sus afluentes* (Memoria para optar al Título de Ing. Civil Ambiental - Universidad de La Serena) (Versión Digital)

Plan Anual de Desarrollo Educativo Municipal, PADEM, 2011. Departamento de educación municipal ilustre municipalidad de Illapel (DAEM Illapel).

Ramos, M. 2011. *Expertos identifican las 14 faenas mineras abandonadas más riesgosas del país* [en línea]. Centro de Investigación Periodística CIPER, 10 de Marzo, 2011

<http://ciperchile.cl/2011/03/10/expertos-identifican-a-las-14-faenas-mineras-abandonadas-mas-riesgosas-del-pais/> [consulta: Noviembre 2012]

REGLAMENTO DEL SISTEMA DE EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL Ministerio Secretaría General de la Presidencia DIARIO OFICIAL DE LA REPUBLICA DE CHILE Jueves 3 de Abril de 1997 (Nº 35.731; Página 5 a 16) Núm. 30.- Santiago, 27 de Marzo de 1997-

Rhim, A. 2011. Material de apoyo capacitación: Evaluación de Riesgo. CENMA 2011.

Rhim, A. y Anaconda C. 2004. Riesgos Ambientales Asociados a Sitios Contaminados, Informe Final. Proyecto FDI (INTEC-SAG).

Rivano; S. Sepúlveda, P. 1986. *Carta Geológica de Chile - IV Región Coquimbo -Carta Geológica Illapel Hoja Illapel (Escala 1: 250.000)*, Servicio nacional de Geología y Minería,

Seoanez, M. y col., 1999. *Ingeniería del Medio Ambiente aplicada al medio natural continental*. Ediciones Mundi Prensa. 2da edición revisada.

SERNAGEOMIN-BGR; Golder Associates (2008). *Manual de Evaluación de Riesgos de Faenas Mineras Abandonadas o Paralizadas (FMA/P)*.

Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN); (Proyecto FOCIGAM JICA-SERNAGEOMIN (2007). *Catastro de faenas mineras abandonadas o paralizadas y análisis preliminar de riesgo*. Actualización 2010 [en línea] http://www.semageomin.cl/index.php?option=com_content&task=view&id=109&Itemid=143 [consulta: Noviembre 2012]

Simenov, L.I.; Hassanien, M.A. (Eds). (2009), *Exposure and Risk Assessment of Chemical Pollution - Contemporary Methodology* Ed. Springer, Bulgaria.

Sociedad Pública de Gestión Ambiental del Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente del Gobierno Vasco - IHOBE (1998); *Investigación de la Contaminación del Suelo, Guías Metodológicas; Estudio Histórico y Diseño de Muestreo*.

Standard Methods, 2005. Standard Methods for the Examination of water and wastewater. APHA. AWWA. WEF. 21th edition 2005, part 3000. *Metals by cold-vapour atomic absorption spectrometry* 3112B.

Standard Methods, 2005. Standard Methods for the Examination of water and wastewater. APHA. AWWA. WEF. 21th edition 2005, part 3000. *Metals by cold-vapour atomic absorption spectrometry* 3112B.

TALLER Análisis de riesgos para la salud humana en sitios contaminados: 12 y 13 de julio 2011. Hotel W, Las Condes, Santiago. URS España. (Organiza: Innova Chile CORFO; Fundación Chile; Ministerio del Medio Ambiente)

TALLER Evaluación del Riesgo Ecológico y Ambiental: 1 y 2 de Septiembre 2011. Centro Nacional del Medio Ambiente CENMA, La Reina, Santiago. Matías Medina. (Organiza: CENMA; Ministerio del Medio Ambiente)

U.S. Environmental Protection Agency (Office of Emergency and Remedial Response, 2002). *Calculating upper confidence limits for exposure point concentrations at hazardous waste sites*.

US-EPA (United States Environmental Protection Agency). Method 6010C. *Inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry*. In: United States Environmental Protection Agency. Test methods for evaluating solid wastes. Physical/chemical methods. SW-846 on-line.

US-EPA (United States Environmental Protection Agency). Method 6200. *Field portable x-ray fluorescence spectrometry for the determination of elemental concentrations in soil and sediment*. In: United States Environmental Protection Agency. Test methods for evaluating solid wastes. Physical/chemical methods. SW-846 on-line

US-EPA (United States Environmental Protection Agency). Method 7471B. *Mercury in solid or semisolid wastes (manual cold-vapor technique)*. In: United States Environmental Protection Agency. Test methods for evaluating solid wastes. Physical/chemical methods. SW-846 on-line.

US-EPA (United States Environmental Protection Agency). Method 7473. *Mercury in solids and solutions by thermal decomposition, amalgamation, and atomic absorption spectrophotometry*. In: United States Environmental Protection Agency. Test methods for evaluating solid wastes. Physical/chemical methods. SW-846 on-line

U.S. Environmental Protection Agency, 1997. *Mercury Study Report to Congress, Vol I: Executive Summary*

VI. ANEXOS.

Anexo A. Resumen Fichas "Site Classification Worksheets" de CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment)

**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	---	10.2
2. Surface Water Movement	---	9.7
3. Soil	---	12
4. Vapour	---	6.5
5. Sediment Movement	---	6
6. Modifying Factors	0	0

Raw Total Score 0 44.4

Raw Total Score (Known + Potential) 44.4

Adjusted Total Score (Raw Total / 64 * 33) 22.9 (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		4.5
iii. Ingestion		6
2. Human Receptors Modifying Factors	---	1
Raw Total Human Score	0	19.5

Raw Total Human Score (Known + Potential) 19.5

Adjusted Total Human Score 19.5 (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

Total Other Receptors Score (Known + Potential) 0

Total Exposure Score (Human + Ecological + Other) 19.5

Adjusted Total Exposure Score (Total Exposure / 46 * 34) 14.4 (max 34)

Site Score	
Antacolla	
Site Letter Grade	A
Certainty Percentage	50%
% Responses that are "Do Not Know"	12%
Total NCS Score for site	62.9
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	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	---	10.2
2. Surface Water Movement	---	9.7
3. Soil	---	12
4. Vapour	---	0
5. Sediment Movement	---	6
6. Modifying Factors	4	0

Raw Total Score	4	37.9
Raw Total Score (Known + Potential)	41.9	
Adjusted Total Score (Raw Total / 64 * 33)	21.6	(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		6
iii. Ingestion		6
2. Human Receptors Modifying Factors	---	1
Raw Total Human Score	0	21

Raw Total Human Score (Known + Potential)	21
Adjusted Total Human Score	21.0 (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)	21.0
Adjusted Total Exposure Score (Total Exposure / 46 * 34)	15.5 (max 34)

Site Score	
Centinela	
Site Letter Grade	A
Certainty Percentage	50%
% Responses that are "Do Not Know"	10%
Total NCSCS Score for site	62.7
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.

**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	---	9,7
3. Soil	---	12
4. Vapour	---	6,5
5. Sediment Movement	---	6
6. Modifying Factors	0	0

Raw Total Score 0 34,2
Raw Total Score (Known + Potential) 34,2
Adjusted Total Score (Raw Total / 64 * 33) 17,6 (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		3
iii. Ingestion		6
2. Human Receptors Modifying Factors	---	1
Raw Total Human Score	0	18

Raw Total Human Score (Known + Potential) 18
Adjusted Total Human Score 18,0 (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	0

Total Exposure Score (Human + Ecological + Other) 18,0
Adjusted Total Exposure Score (Total Exposure / 46 * 34) 13,3 (max 34)

Site Score	
Horizonte	
Site Letter Grade	A
Certainty Percentage	56%
% Responses that are "Do Not Know"	9%
Total NCSCS Score for site	
54,9	
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	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	---	10.2
2. Surface Water Movement	---	8.7
3. Soil	---	10
4. Vapour	---	6.5
5. Sediment Movement	---	6
6. Modifying Factors	4	0

Raw Total Score 4 41.4
Raw Total Score (Known + Potential) 45.4
Adjusted Total Score (Raw Total / 64 * 33) 23.4 (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		7
2. Human Receptors Modifying Factors	---	1
Raw Total Human Score	0	22

Raw Total Human Score (Known + Potential) 22
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	
Leopoldo Hernandez	
Site Letter Grade	A
Certainty Percentage	50%
% Responses that are "Do Not Know"	10%
Total NCSCS Score for site	65.2
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	8	---
3. Contaminant Exceedance Factor	---	4
4. Contaminant Quantity	---	4
5. Modifying Factors	2	---

Raw Total Score 18 8

Raw Total Score (Known + Potential) 26

Adjusted Total Score (Raw Total / 40 * 33) 21.5 (max 33)

II. Migration Potential

	Known	Potential
1. Groundwater Movement	---	10.2
2. Surface Water Movement	---	9.7
3. Soil	---	12
4. Vapour	---	0
5. Sediment Movement	---	8
6. Modifying Factors	0	0

Raw Total Score 0 39.9

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		1
c. Exposure Route		
i. Direct Contact		3
ii. Inhalation		3
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	
Pluma de Oro	
Site Letter Grade	A
Certainty Percentage	44%
% Responses that are "Do Not Know"	14%
Total NCSCS Score for site	54.6
Site Classification Category	2

Site Classification Categories*:

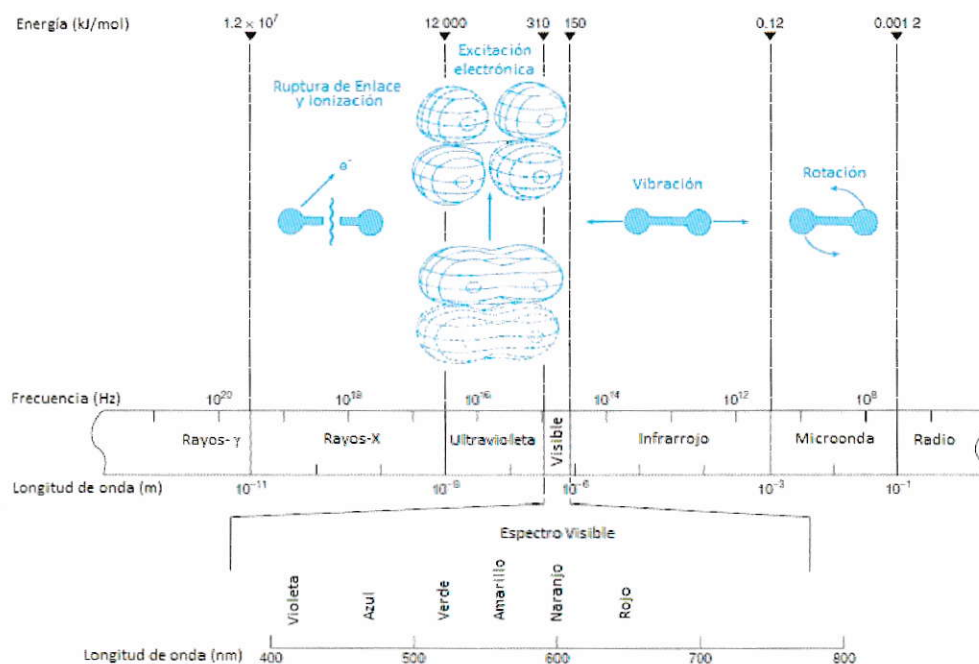
- Class 1 - High Priority for Action (Total NCS Score >70)
- Class 2 - Medium Priority for Action (Total NCS Score 50 - 69.9)
- Class 3 - Low Priority for Action (Total NCS Score 37 - 49.9)
- Class N - Not a Priority for Action (Total NCS Score <37)
- Class INS - Insufficient Information (>15% of responses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

ANEXO B. Técnicas Espectrofotométricas para Analitos en Estudio.

Técnicas Espectrofotométricas.

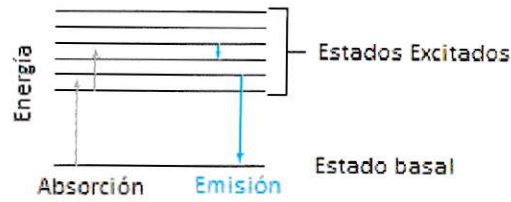
La espectrofotometría es una técnica analítica diversa, en la cual se utilizan diferentes respuestas de ondas electromagnéticas (luz como fotones) para medir concentraciones químicas. En diferentes regiones del espectro electromagnético ocurren procesos moleculares o atómicos distintos cuando la luz de cada región es absorbida, como es posible observar en la Figura i a continuación. En la realidad no hay cambios abruptos de una región del espectro a otra como se muestra es una manera de esquematizar



Fuente: Harris, D. 2010

Figura i. Espectro electromagnético y los procesos moleculares representativos que ocurren cuando cada región del espectro es absorbida.

Cuando un átomo o molécula absorbe un fotón, la energía de la molécula aumenta (estado excitado). Por el contrario la energía de la molécula disminuye cuando esta emite un fotón, como se ve en la Figura ii.



Fuente: Harris, D. 2010

Figura ii. Relación de aumento o disminución de la energía en un átomo/molécula según absorción o emisión de luz.

Dependerá del tipo de energía absorbida la magnitud del efecto en la molécula, ya sea que esta aumente su vibración, rotación, electrones en orbitales de energía más altos o incluso la ionización.

Diferentes técnicas analíticas utilizan este fenómeno, midiendo la emisión o absorbancia a longitudes de onda específicos, para calcular la concentración en diferentes medios de compuestos o elementos en particular.

Cuando la luz es absorbida por una muestra, la irradiancia P (P , energía por segundo por unidad de área de un haz de luz) del rayo incidente decrece. Dicho decrecimiento es proporcional a la concentración y el paso óptico respecto a la muestra, como se observa en la Figura iii:

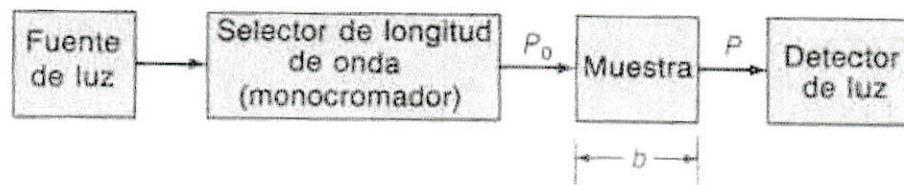


Figura iii. El proceso de absorbancia y su relación proporcional a la concentración

La transmitancia T , se define como la fracción de la luz incidente que sale de la muestra, se expresa en la ecuación (a) a continuación:

$$T = \frac{P}{P_0} \quad (\text{a})$$

Por ello, la transmitancia va en un rango de 0 a 1, lo cual puede ser también expresado en porcentaje. Mientras que la absorbancia (inverso de la transmitancia) se define como (ecuación (b)):

$$A = \log\left(\frac{P_0}{P}\right) = -\log T \quad (\text{b})$$

Si no hay luz absorbida $P = P_0$ y por lo tanto $A = 0$. Si 90% de la luz ha sido absorbida, 10 % ha sido transmitida.

La absorbancia es directamente proporcional a la concentración de las sustancias absorbentes en la muestra analizada, lo que se describe en la ley de Lambert-Beer (con A adimensional) según la ecuación (c):

$$A = \epsilon bc \quad (\text{c})$$

Donde, A = absorbancia; ϵ = Absortividad molar; b = paso óptico; c = concentración en la muestra.

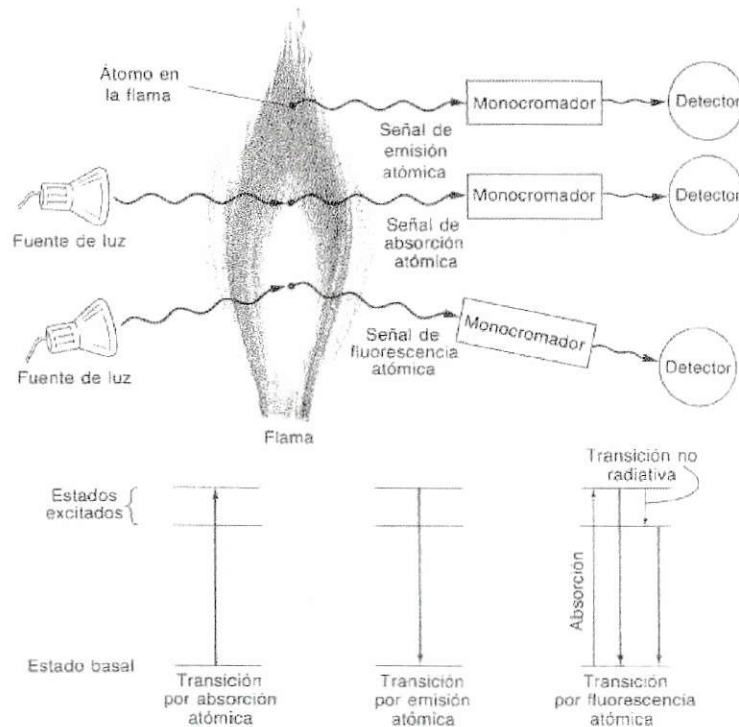
Este fenómeno físico es el fundamento de las técnicas de Espectrofotometría de Absorción Atómica, que le da nombre a la técnica y los instrumentos utilizados para este tipo de mediciones.

Cuando la energía incidente es lo suficientemente alta a una magnitud cercana a la energía de ionización, ocurrirá que ciertos electrones serán expulsados de sus orbitales, dejando espacios vacantes. Al tender la estabilidad, dichos espacios vacantes serán ocupados por electrones en capas superiores a la del electrón perdido, emitiendo un fotón de longitud de onda específico, el cual es posible medir.

Dichas transiciones electrónicas pueden ser inducidas por fuentes de energía tales como fuentes emisoras de rayos-x y plasmas, lo cual también es el origen de los instrumentos que utilizan la técnica (Harris, 2010).

En el caso de este estudio, se utilizaron estas técnicas clásicas para la cuantificación de los elementos de interés a través de instrumentos altamente conocidos para la investigación científica y la industria como son los Espectrofotómetros de Absorción Atómica (EAA), Plasma Inductivamente Acoplado (más conocido como ICP por su sigla en inglés) e instrumentos de Fluorescencia de Rayos-X, los cuales se basan en los fenómenos descritos.

En los tres tipos de análisis mencionados, las mediciones son realizadas a nivel de elementos, no moleculares, y una de las diferencias que presentan es que una mide absorbancia (EAA) y las otras miden emisiones. Aunque todas responden al fenómeno de interacción materia-onda electromagnética (fotón o luz). Un esquema que facilita la comprensión de estos fenómenos es el que se presenta a continuación en la Figura iv:



Fuente: Harris, D. 2010

Figura iv. Esquema de absorción, emisión y fluorescencia atómicas, en las que se emplean átomos en fuentes de energía.

Además, se diferencian en los métodos de atomización de la muestra, es decir, de cómo se aíslan los elementos para su cuantificación (o si no se aíslan del todo como en FRX).

Espectrofotometría de Absorción Atómica:

Esta técnica fue introducida comercialmente en los comienzos de 1960 y aún es una herramienta analítica muy común.

Las muestras deben ser introducidas como disolución ya sea a través de un nebulizador hacia una llama o como vapor en la técnica llamada "vapor frío" (los sólidos deben ser sometidos a una previa digestión para ser disueltos). En la llama o por vapor frío, se ajustan las condiciones para que el elemento de interés de la muestra sea convertido a su estado elemental (no excitado).

Se hace pasar luz a través del paso óptico, el cual puede ser una llama o una celda de cuarzo para vapor frío (generación de hidruros). Dicha luz es emitida desde una fuente confeccionada del elemento a medir (una lámpara de cátodo hueco o lámpara EDL *Electrodeless Discharge Lamp*).

Los átomos que se encuentran en estado elemental en el paso óptico son capaces de absorber una cantidad de la luz emitida.

La cantidad de luz absorbida es proporcional a la cantidad de átomos en el paso óptico y por ende de la concentración de dicho elemento en la muestra.

La respuesta de absorbancia del equipo es calibrada con soluciones patrón (de concentración conocida), para relacionar la señal de absorbancia con la concentración del elemento en la muestra, interpolando los datos en curvas de calibración (SGS, 2010)

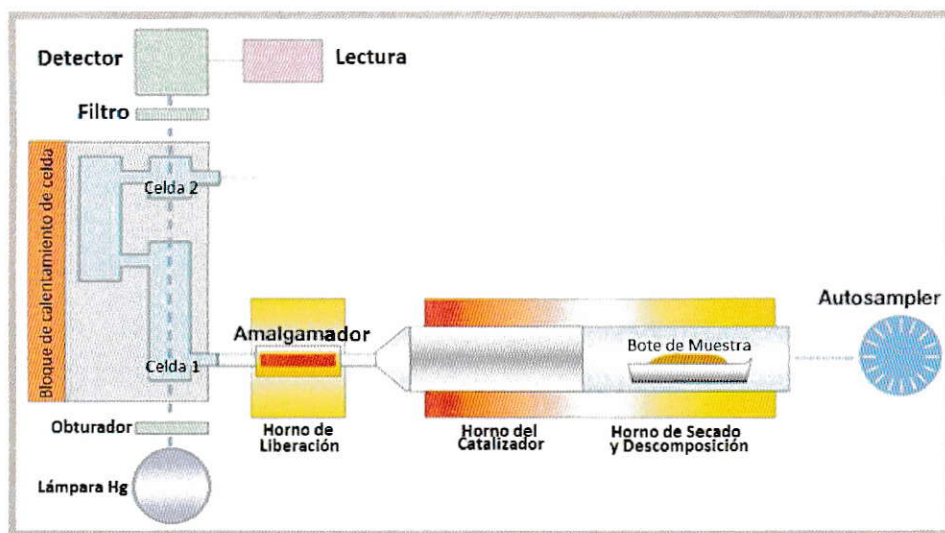
En el caso de este estudio la técnica de vapor frío (generación de hidruros) es la técnica utilizada por ser la más apropiada dadas las propiedades de presión de vapor del elemento Hg. Es posible utilizar mezclas de cloruro de estaño (II) o borohidruro de sodio (en medio de HCl o HNO₃) para producir un medio fuertemente reductor lo que permite arrastrar con gas inerte (ej. N₂ gaseoso) los vapores de Hg⁰ generados en la reducción.

Mercuriómetro:

Esta técnica es relativamente nueva, siendo su única diferencia con la absorción atómica clásica, el método de atomización. Se trata del equipo utilizado para la medición de Hg en sólidos, el cual combina la descomposición térmica, conversión catalítica, amalgamación y espectrofotometría de absorción atómica. Una muestra introducida en bote de cuarzo, es sometida a etapas de calentamiento controlado para secado y posterior descomposición térmica.

Un flujo continuo de oxígeno lleva los productos de descomposición a través de un lecho de catalizador, donde son retenidas las posibles interferencias. Todas las especies de mercurio se reducen a Hg elemental y se llevan después a lo largo de un amalgamador de oro, el cual es capaz de retener de forma selectiva el mercurio del flujo.

Luego, el sistema es purgado y posteriormente el amalgamador es calentado a una temperatura suficiente para liberar el mercurio retenido en la amalgama, en forma de vapor, al paso óptico de una celda espectrofotométrica de absorción atómica a una longitud de onda fija. Allí, la absorbancia a 253,7 nm es medida, la cual es proporcional al contenido de mercurio en la muestra. Un esquema del equipo en su interior se presenta en la Figura v.



Fuente: <http://www.milestonesrl.com>

Figura v. Esquema de los componentes internos del mercuriómetro

Si la muestra posee un contenido de mercurio demasiado alto, la celda tiende a saturarse. No es posible introducir cantidades menores a 50 mg de muestra, ya que la recuperación no es representativa, lo cual fue demostrado empíricamente con materiales de referencia certificados. Tampoco es recomendable realizar diluciones en sólido para este caso, si no se cuenta con una adecuada preparación de muestras. En las siguientes fotografías de la Figura vi, se observan componentes del equipo:



Fuente: <http://www.milestonesrl.com>

Figura vi. Componentes del mercuriómetro

ICP-OES Inductively Coupled Plasma – Optical Emission Spectroscopy (Plasma Inductivamente Acoplado – Espectroscopia de Emisión Óptica):

Es una técnica poderosa para el análisis de suelos, dado su alto rendimiento y su capacidad multi-elementos. En ella, se utiliza ICP como fuente de energía para la excitación de átomos o iones.

Los estándares o muestras son introducidos a través de una nebulización neumática en un plasma de argón generado en un campo de radio frecuencia. Las altas temperaturas del plasma provocan la atomización e ionización de la muestra. A medida que los átomos vuelven a su estado basal emiten luz a longitudes de onda características.

La intensidad de la emisión es medida con un detector apropiado. La radiación policromática (luz) pasa al espectrómetro, donde la luz es dirigida a una rejilla de difracción Echelle. Esta rejilla de alta resolución divide la luz a sus longitudes de onda constituyentes, siendo cada longitud de onda específica de cada elemento. La intensidad de la luz difractada, única de cada elemento, es medida usando un detector CCD (Charged-Coupled-Device) de arreglo de dos segmentos (uno diseñado para el rango UV y otro para el rango visible del espectro electromagnético).

Comparando las intensidades de las longitudes de onda para cada elemento en la muestra con aquellos que se encuentran en un estándar de concentración conocida del elemento a medir, se determinan por interpolación las concentraciones de la muestra (SGS, 2010).

Fluorescencia de Rayos-x:

La Fluorescencia de rayos X (FRX o XRF por su sigla en inglés), tiene su mayor aplicación en la determinación de elementos mayoritarios y minoritarios; aquellos que componen hasta un 97% de la mayoría de las rocas y suelos.

Los rayos x forman parte del espectro electromagnético con longitudes de onda desde 0,1 a 50 Angstroms (Å), es decir, fotones en un rango de energías de 0,25 keV a 12 keV. Este rango de energía es mayor al utilizando en las técnicas espectroscópicas de ICP-OES y EAA, con rangos ente UV y VIS. Mientras que las transiciones electrónicas de los instrumentos de absorción EAA y emisión ICP-OES ocurren en electrones de capas externas, aquellos medidos en FRX son transiciones de mucho mayor energía de electrones en orbitales cercanos al núcleo de los átomos.

El nombre FRX es una descripción de cómo estos análisis son realizados. La muestra es expuesta a un haz primario de rayos-x generado desde una fuente (usualmente un tubo de rayos-x o un elemento radiactivo). Los elementos de la muestra absorben longitudes de onda específicos del rayo primario y se excitan. Cuando regresan a su estado electrónico basal, emiten rayos-x secundarios específicos para cada elemento en la muestra.

Los rayos-x secundarios son separados en base a su energía o longitud de onda (en un instrumento dispersivo de o energía o longitud de onda respectivamente). La intensidad de cada longitud de onda es proporcional a la concentración del elemento en la muestra. Las concentración del elemento en la muestra es determinado por una calibración que relaciona la intensidad de los rayos-x a la concentración de un set de estándares de calibración, usualmente en un software del equipo de medición (SGS, 2010). En este caso la preparación de muestra es fácil y rápida y en muchos casos no destructiva.

Referencias

Manuales en línea equipos Milestone:

<http://www.milestonesrl.com>

SGS, Minerals Service. (2010) *Rocks to Results, A Practical Guide to Laboratory Operations*. 4° Edición.

Harris, D. (2010) *Quantitative Chemical Analysis*, W. H. Freeman and Company, 8° Ed.