



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

# INFORME FINAL

## “EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA DE ANDACOLLO”

DOCUMENTO TÉCNICO DEL PROYECTO  
“EVALUACIÓN DE RIESGOS PARA LA SALUD EN  
ASENTAMIENTOS HUMANOS PRÓXIMOS A SITIOS DE  
MINERÍA METÁLICA”

Preparado por el Centro Nacional de Medio Ambiente (CENMA), para  
Ministerio de Medio Ambiente (MMA)

Santiago de Chile  
Diciembre 2011



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

---

Informe preparado por:

**Julio A. Salinas Torres, Ph.D., B.Q.**

Evaluación de Riesgos en la Salud Humana, CENMA

**Mag. Daniel E. Rebolledo Fuentes**

Químico del Laboratorio de Química Ambiental, CENMA

Este Informe debe ser citado como:

J. Salinas y D. Rebolledo. "EVALUACIÓN DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA DE ANDACOLLO." INFORME FINAL. 2011.

Revisado y aprobado por:

Dr Italo Serey Estay

Director Ejecutivo

Fundación Centro Nacional del Medio Ambiente.



Universidad de Chile

INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

**Otros participantes del proyecto y sus funciones:**

|                          |  |
|--------------------------|--|
| Dra. Isel Cortés Nodarse | Jefe del Laboratorio de Química Ambiental del CENMA  |
| Don. Jaime Duran         | Director de Desarrollo Estratégico y Coordinador de Proyectos del CENMA                        |
| Qco. Jorge Muñoz Muñoz   | Revisión y Supervisión de Informes de Análisis del Laboratorio de Química Ambiental del CENMA. |
| Sr. Wilson Novoa         | Toma de muestras en terreno  |
| Qco. Carolina Parada     | Análisis de Hg total y de SPLP por absorción atómica con vapor frío del CENMA.                 |

Más información

Centro Nacional del Medio Ambiente

Av. Larraín 9975, La Reina, Santiago de Chile

788-0096 LA REINA

Teléfono: (56-2) 927-5570 Fax : (56-2) 275-1688

<http://www.cenma.cl>



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

---

## RESUMEN EJECUTIVO

El presente estudio tiene por objeto estimar los riesgos en la salud humana asociados con desechos de los procesos de extracción de minerales, que se encuentran como tortas de relaves de grandes dimensiones dispersas en el pueblo de Andacollo.

Con las muestras obtenidas durante el estudio realizado en octubre del 2010 denominado "Evaluación de sitios contaminados por mercurio. Un caso de estudio: Andacollo." INFORME FINAL. 2010 para la determinación de Hg en los relaves de Andacollo, se cuantificó As, Cd, Pb, Cr, Cu, Fe, Mn y Zn en 13 relaves por medio del análisis instrumental de Fluorescencia de rayos x.

Los resultados obtenidos de cada uno de los 13 relaves en cuestión, fueron sometidos a una serie de tratamientos estadísticos, con el objeto de obtener las concentraciones representativas (95% NSC) de los contaminantes de riesgo potencial presentes en cada uno de ellos.

Se analizaron los mecanismos de liberación y transporte de los contaminantes presentes en los relaves de la zona de estudio y fueron identificadas las principales vías y rutas de exposición para niños y adultos de las zonas aledañas a dichos pasivos mineros ambientales.



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

Con la información disponible se calcularon las dosis de contaminantes a las cuales están expuestas los niños y adultos que residen en las inmediaciones de los depósitos de relaves. Dichas dosis fueron posteriormente empleadas para el cálculo de Índices de Peligrosidad y del Riesgo Extra de Cáncer que presentan los receptores aledaños a cada uno de los relaves estudiados.

La metodología usada en el presente estudio refleja las prácticas y conceptos desarrollados y recomendados por la USEPA.

El análisis de riesgos en la salud permitió concluir que las tortas de relave no presentan un riesgo inminente a la salud de la comunidad de Andacollo.

Los índices de peligrosidad estimados indican que no se esperan efectos crónicos significativos en la salud asociados con exposición al material superficial de relaves, y los valores en exceso estimados se explican por la metodología conservadora usada. Los ÍPs para niños residentes aledaños a los depósitos de relave no indican efectos crónicos potenciales en la salud. Los valores de IP que exceden la unidad se explican por las contribuciones parciales del hierro, cobre y arsénico, y por el alto grado conservador de la metodología usada. Por lo tanto no hay sustento para esperar efectos negativos en la salud a los niveles de exposición observados en Andacollo. Los IPs para adultos estimados en los niveles superficiales y a 2 metros de profundidad no son biológicamente significativos.

Los riesgos cancerígenos estimados para niños expuestos a suelos superficiales están en el rango  $7.3E-06$  a  $1.5E-04$ , es decir dentro de la zona del riesgo de



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

*minimis* y hasta el nivel de riesgo considerado significativo. Un riesgo de  $1.0E-04$  es equivalente a 1/10.000, es decir, un niño que podría contraer cáncer por cada 10.000 habitantes, en este caso asociado principalmente por exposición al arsénico. El riesgo más alto estimado es de  $1.5E-04$  (1/6.666), el que es consistente con la población de Andacollo y por lo tanto dado el nivel conservador de la metodología usada, está dentro de un valor estadísticamente aceptable. En adultos, la gran mayoría de las tortas presentan riesgos cancerígenos que están en la zona de gestión de riesgos,  $1E-05$  a  $1E-04$ . La ingestión accidental de arenas de relave y el contacto directo de la piel con el material no consolidado que contiene As son las vías primordiales de exposición en los niños.

En este estudio se propone el uso de un riesgo *de minimis* de  $1E-05$ , que es mayor al usado en los EE.UU., y que refleja un valor de referencia razonable para Chile.

La metodología usada y las suposiciones incorporadas hacen que el enfoque usado en general sea altamente conservador, y por lo tanto los riesgos reales pueden ser mucho menores que los reportados. Los efectos potenciales en la salud fueron estimados usando métodos y procedimientos estándar en análisis de riesgos, y un cambio en los terrenos, movimientos de tierra u otros procedimientos, pueden alterar las condiciones de la exposición, y por lo tanto es posible que los riesgos en la salud sean mayores que los reportados.



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

**INDICE**

|  |    |
|--|----|
| CAPITULO I: INTRODUCCIÓN .....   | 19 |
| 1.1. Contexto general .....  | 19 |
| 1.2.1. Objetivo general.....   | 19 |
| 1.2.2. Objetivos específicos .....   | 19 |
| 1.3. Alcance del estudio.....  | 20 |
| CAPITULO II: ANTECEDENTES DEL AREA DE ESTUDIO .....  | 21 |
| 2.1. Antecedentes generales .....  | 21 |
| 2.2. Actividad minera en la zona.....  | 23 |
| 2.3. Población de la zona .....  | 23 |
| 2.4. Clima .....   | 24 |
| 2.5. Flora y fauna.....  | 25 |
| 2.6. Calidad del aire.....   | 25 |
| CAPITULO III: METODOLOGÍA EMPLEADA PARA LA EVALUACIÓN DE<br>RIESGOS A LA SALUD.....          | 27 |
| 3.1. Generalidades .....   | 27 |
| 3.2. Fundamentos de la metodología empleada .....  | 27 |
| 3.3. Implementación de la metodología .....  | 28 |
| CAPITULO IV: MUESTREO .....  | 32 |
| 4.1. Alcance y objetivo.....   | 32 |
| 4.1.1. Descripción del área de estudio y de los fundamentos del muestreo en<br>relaves ..... | 32 |
| 4.2. Objetivo del programa de muestreo.....  | 33 |
| 4.3. Obtención de muestras.....  | 34 |
| 4.4. Metodología de muestreo .....   | 39 |



Universidad de Chile

INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

---

|   |    |
|---|----|
| 4.4.1. Metodología de muestreo de muestras sólidas .....  | 39 |
| 4.4.1. Metodología de muestreo de muestras líquidas: Aguas .....                                      | 41 |
| 4.5. Puntos de muestreo.....  | 43 |
| 4.5.1. Sitio 1.....   | 44 |
| 4.5.2. Sitio 2.....   | 45 |
| 4.5.3. Sitio 3.....   | 46 |
| 4.5.3. Sitio 4.....   | 47 |
| 4.5.5. Sitio 5.....   | 48 |
| 4.5.6. Sitio 6.....   | 49 |
| 4.5.7. Sitio 7.....   | 50 |
| 4.5.8. Sitio 8.....   | 51 |
| 4.5.9. Sitio 9.....   | 52 |
| 4.5.10 Sitio 10.....  | 53 |
| 4.5.11. Sitio 11.....   | 54 |
| 4.5.12. Sitio 13.....   | 55 |
| 4.5.13. Sitio 18.....   | 56 |
| 4.6. Transporte de muestras.....  | 57 |
| 4.7. Entrega de muestras en el laboratorio .....  | 57 |
| 4.8. Cadena de custodia.....  | 57 |
| CAPITULO V: INSTRUMENTACIÓN EMPLEADA PARA EL ANÁLISIS QUÍMICO<br>PARA DETERMINACIÓN DE METALES.....   | 60 |
| 5.1. Análisis de mercurio total por Analizador directo de Mercurio (Mercuriómetro<br>DMA-80).....     | 60 |
| 5.2. Análisis de mercurio total por espectroscopía de absorción atómica (EAA) por<br>vapor frío ..... | 62 |
| 5.3. Analizador portátil de fluorescencia de rayos X (XRF).....                                       | 63 |





Universidad de Chile

INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

---

|   |    |
|---|----|
| 5.4. Análisis de metales totales por espectroscopía de emisión atómica por medio de Plasma Inductivamente Acoplado (ICP)..... | 66 |
| CAPITULO VI: RESULTADOS ANALITICOS Y SELECCIÓN DE CONTAMINANTES DE INTERÉS .....  | 69 |
| 6.1. Resultados analíticos.....   | 69 |
| 6.2. Contaminantes Tentativamente Identificados (CTIs).....   | 69 |
| 6.3. Selección de Contaminantes de Riesgo Potencial (CRP) .....   | 70 |
| 6.4. Determinación de niveles background de componentes ambientales .....   | 73 |
| CAPITULO VII: ANÁLISIS DE DATOS .....   | 75 |
| 7.1. Tratamiento de datos.....  | 75 |
| 7.1.1. Informe de contaminantes no detectados (NDs) .....   | 75 |
| 7.1.2. Estimación del 95% nivel superior de confianza del promedio (95% NSC) .....  | 76 |
| 7.2. Concentraciones para el calculo de exposición, 95% NSC del promedio.....   | 78 |
| 7.2.1. Análisis de los Sitios a nivel superficial .....   | 79 |
| 7.2.2. Análisis de los Sitios a 2 metros de profundidad .....   | 81 |
| CAPITULO VIII: CARACTERIZACIÓN DE LA EXPOSICIÓN .....   | 83 |
| 8.1. Generalidades .....  | 83 |
| 8.2. Presencia y movimiento de los contaminantes en el medio ambiente.....  | 84 |
| 8.2.1. Fuentes primarias y secundarias de contaminantes ambientales.....  | 85 |
| 8.2.2 Mecanismos de liberación y transporte ambiental de los contaminantes .  | 85 |
| 8.2.3 Mecanismos de destino ambiental .....   | 85 |
| 8.3. Punto de Contacto entre contaminante y receptor .....  | 87 |
| 8.4. Escenario de exposición .....  | 88 |
| 8.5. Concentración representativa de contaminante en la matriz ambiental.....   | 89 |
| 8.6. Receptores humanos.....  | 91 |
| 8.7. Probabilidad temporal y espacial de ocurrencia de la exposición.....   | 92 |



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

---

|   |     |
|---|-----|
| 8.8. Desarrollo del Modelo Conceptual del Problema de Contaminación.....                                    | 92  |
| 8.9. Vías de exposición.....  | 94  |
| 8.10. Rutas de exposición .....   | 97  |
| 8.11. Algoritmos para estimar dosis de exposición .....   | 99  |
| 8.11.1. Dosis de contaminante por inhalación de mercurio volátil .....                                      | 101 |
| 8.11.2. Dosis de contaminante presente en partículas de polvo resuspendidas<br>en aire de respiración ..... | 102 |
| 8.11.3. Dosis de contaminante por contacto directo del relave con la piel.....                              | 103 |
| 8.11.4. Dosis de contaminante presente en suelo ingerido involuntariamente                                  | 104 |
| 8.12. Selección de los Factores de Exposición Humana (FEHs) .....   | 105 |
| 8.13. Estimación de la dosis de contaminante .....  | 108 |
| CAPITULO IX: CARACTERIZACIÓN DE LA TOXICIDAD .....  | 110 |
| 9.1 Fuentes de información .....  | 110 |
| 9.2. Perfil toxicológico de los contaminantes de riesgo potencial.....                                      | 111 |
| 9.2.1. Arsénico.....  | 111 |
| 9.2.2. Cadmio .....   | 114 |
| 9.2.3. Cobre.....   | 118 |
| 9.2.4. Cromo.....   | 119 |
| 9.2.5. Hierro.....  | 121 |
| 9.2.6. Manganeseo .....   | 123 |
| 9.2.7. Mercurio.....  | 125 |
| 9.2.8. Plomo .....  | 127 |
| 9.2.9. Zinc.....  | 128 |
| 9.3. Criterios de toxicidad de los contaminantes de riesgo potencial .....                                  | 132 |
| 9.3.1. Criterios de toxicidad de contaminantes crónicos (con umbral de dosis-<br>respuesta).....            | 132 |



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

|  |     |
|--|-----|
| 9.3.2 Criterios de toxicidad de contaminantes cancerígenos (sin umbral de dosis-respuesta) ..... | 134 |
| 9.3.3. Criterios de toxicidad substitutos.....   | 134 |
| 9.4 Inclusión de sustancias cancerígenas con “peso de evidencia” categorías A y B. ....          | 135 |
| CAPITULO X: CARACTERIZACIÓN DE LOS RIESGOS A LA SALUD HUMANA                                     | 137 |
| 10.1. Aspectos generales .....   | 137 |
| 10.1.1. Nivel de complejidad del análisis de riesgo .....  | 137 |
| 10.2. Índice de Peligrosidad asociado con contaminantes crónicos no cancerígenos. ....           | 138 |
| 10.2.1. Significado e Interpretación del Índice de Peligrosidad .....                            | 140 |
| 10.3. Estimación del Riesgo Extra de Cáncer de por Vida.....                                     | 141 |
| 10.3.1. Significado e Interpretación del riesgo de cáncer .....                                  | 144 |
| 10.3.2. Interacción entre efectos de contaminantes identificados .....                           | 146 |
| 10.4. Interacción entre efectos de contaminantes identificados .....                             | 146 |
| 10.5. Resultados del análisis de riesgo para receptores hipotéticos .....                        | 146 |
| 10.5.1. Análisis de resultados para los Índices de Peligrosidad .....                            | 147 |
| 10.5.1.1. Segregación del Índice de Peligrosidad total .....                                     | 151 |
| 10.5.2. Análisis de resultados del Riesgo Extra Cancerígeno de por Vida. ....                    | 153 |
| 10.5.2.1. Conclusión para Riesgos Cancerígenos.....  | 157 |
| 10.6 Niveles sanguíneos de plomo en receptores hipotéticos.....                                  | 157 |
| CAPITULO XI: ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE .....   | 170 |
| 11.1. Fuentes de incertidumbre en análisis de riesgo .....                                       | 170 |
| 11.2. Conclusiones del análisis de incertidumbre .....   | 173 |
| CAPITULO XII: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DE RIESGO...                                 | 175 |
| 12.1. Conclusiones del estudio .....   | 175 |
| 12.2 Verificación de los objetivos del análisis de riesgo.....                                   | 176 |



Universidad de Chile

INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

---

|   |     |
|---|-----|
| CAPITULO XIII: GESTIÓN DE RIESGOS ..... | 178 |
| CAPITULO XIV: REFERENCIAS.....          | 180 |

ANEXO 1: RESULTADOS ANALÍTICOS

ANEXO 2: ESTIMACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES REPRESENTATIVAS DE  
METALES PESADOS EN RELAVES DE ANDACOLLO

ANEXO 3: INDICE DE PELIGROSIDAD Y RIESGO DE CANCER



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

---

**INDICE DE TABLAS**

|   |     |
|---|-----|
| Tabla N° 4.1: Resumen de información sobre el muestreo efectuado en Octubre 2010 .....  | 34  |
| Tabla N° 5.1: Detalle instrumental empleado para la determinación de Hg.....  | 61  |
| Tabla N° 5.2: Detalle instrumental empleado para la determinación de Hg.....  | 62  |
| Tabla N° 5.3: Detalle instrumental empleado para la determinación de metales.....   | 64  |
| Tabla N° 5.4: Detalle instrumental empleado para la determinación de metales.....   | 67  |
| Tabla N° 7.1: 95% NSC del promedio, valores del contaminante en Superficie .....  | 80  |
| Tabla N° 7.2: 95% NSC del promedio, valores del contaminante a 2 m de profundidad .....   | 82  |
| Tabla N° 8.2: Factores de exposición asociados con los escenarios de exposición empleados en la comuna de Andacollo .....   | 107 |
| Tabla N° 8.3. Factores empleados para cálculo de la dosis de exposición. ....   | 108 |
| Tabla N° 9.1: Criterios de toxicidad asociados con los contaminantes identificados en los relaves mineros de Andacollo .....  | 136 |
| Tabla N° 10.1: Resumen de Índices de Peligrosidad (riesgo crónico) estimados para los contaminantes en superficie y bajo suelo de cada torta de relave, estimados en niños y adultos..... | 149 |
| Tabla N° 10.2: Riesgo Extra de Cáncer de por Vida estimados para los contaminantes en superficie y bajo suelo de cada torta de relave, estimados en niños y adultos.....                  | 155 |



## INDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura N° 1.1: Relaves mineros en la ciudad de Andacollo.....   | 22 |
| Figura N° 3.1: Componentes de la evaluación de riesgos en la salud.....   | 29 |
| Figura N° 4.2: Ubicación general de los sitios muestreados, en la ciudad de Andacollo.....  | 35 |
| Figura N° 4.3: Foto que ilustra la heterogeneidad de los relaves, nótese los colores diferentes en los distintos estratos de la pila..... | 37 |
| Figura N° 4.4: Ilustración genérica de las áreas a muestrear en la superficie de un relave para el estudio de evaluación de riesgos. .... | 37 |
| Figura N° 4.5: Vista panorámica que ilustra la ubicación de los relaves en la zona urbana de la comuna de Andacollo.....                  | 38 |
| Figura N° 4.6: Toma de muestra a nivel superficial.....   | 39 |
| Figura N° 4.7: Toma de muestra a 2 metros de profundidad con barreno manual en forma vertical.....  | 40 |
| Figura N° 4.8: Toma de muestra a 2 metros de profundidad con barreno manual en forma horizontal.....                                      | 40 |
| Figura N° 4.9: Trasvasije de muestra del barreno al envase.....   | 41 |
| Figura N° 4.10: Muestreo de agua potable según NCh 409/2.....   | 42 |
| Figura N° 4.11: Muestreo de agua de proceso en trapiches. Comuna de Andacollo... ..   | 42 |
| Figura N° 4.12: Ubicación del Sitio 1 respecto de la ciudad de Andacollo.....   | 44 |
| Figura N° 4.13: Ubicación de los puntos de muestreo en el sitio 1.....  | 44 |
| Figura N° 4.14: Ubicación del Sitio 2 respecto de la ciudad de Andacollo.....   | 45 |
| Figura N° 4.15: Ubicación de los puntos de muestreo en el sitio 2 (maray). ....   | 45 |
| Figura N° 4.16: Ubicación del Sitio 3 respecto de la ciudad de Andacollo.....   | 46 |
| Figura N° 4.17: Ubicación de los puntos de muestreo en el sitio 3.....  | 46 |



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

---

|   |    |
|---|----|
| Figura N° 4.18: Ubicación del Sitio 4 respecto de la ciudad de Andacollo.....   | 47 |
| Figura N° 4.19: Ubicación de los puntos de muestreo en el sitio 4.....  | 47 |
| Figura N° 4.20: Ubicación del Sitio 5 respecto de la ciudad de Andacollo.....   | 48 |
| Figura N° 4.21. Ubicación de los puntos de muestreo en el sitio 5.....  | 48 |
| Figura N° 4.22: Ubicación del Sitio 6 respecto de la ciudad de Andacollo.....   | 49 |
| Figura N° 4.23: Ubicación de los puntos de muestreo en el sitio 6.....  | 49 |
| Figura N° 4.24: Ubicación del Sitio 7 respecto de la ciudad de Andacollo.....   | 50 |
| Figura N° 4.25: Ubicación de los puntos de muestreo en el sitio 7.....  | 50 |
| Figura N° 4.26: Ubicación del Sitio 8 respecto de la ciudad de Andacollo.....   | 51 |
| Figura N° 4.27: Ubicación de los puntos de muestreo en el sitio 8.....  | 51 |
| Figura N° 4.28: Ubicación del Sitio 9 respecto de la ciudad de Andacollo.....   | 52 |
| Figura N° 4.29: Ubicación de los puntos de muestreo en el sitio 9.....  | 52 |
| Figura N° 4.30: Ubicación del Sitio 10 respecto de la ciudad de Andacollo.....  | 53 |
| Figura N° 4.31. Ubicación de los puntos de muestreo en el sitio 10.....   | 53 |
| Figura N° 4.32: Ubicación del Sitio 11 respecto de la ciudad de Andacollo.....  | 54 |
| Figura N° 4.33: Ubicación de los puntos de muestreo en el sitio 11.....   | 54 |
| Figura N° 4.34: Ubicación del Sitio 13 respecto de la ciudad de Andacollo.....  | 55 |
| Figura N° 4.35: Ubicación de los puntos de muestreo en el sitio 13.....   | 55 |
| Figura N° 4.36: Ubicación del Sitio 18 respecto de la ciudad de Andacollo.....  | 56 |
| Figura N° 4.37: Ubicación de los puntos de muestreo en el sitio 18.....   | 56 |
| Figura N° 4.38: Registro de Cadena de Custodia. ....  | 59 |
| Figura N° 5.1: Mercuriometro Milestone DMA 80.....  | 61 |
| Figura N° 5.2. Espectrofotómetro de Absorción Atómica (EAA) Perkin Elmer.....   | 63 |
| Figura N° 5.3. Analizador portátil de fluorescencia de rayos x Bruker S1 Turbo sd                                       | 65 |
| Figura N° 5.4. Analizador portátil XRF Bruker S1 Turbo sd en terreno.....   | 66 |
| Figura N° 6.1. Ubicación general de los sitios muestreados, en la ciudad de Andacollo. Campaña de Octubre de 2010. .... | 74 |



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

---

|  |     |
|--|-----|
| Figura N° 7.1: 95% NSC del promedio calculado con el software ProUCL .....   | 78  |
| Figura N° 8.1. Modelo Conceptual del Problema de Contaminación.....  | 93  |
| Figura N° 8.2: Componentes y procesos de una vía de exposición .....   | 94  |
| Figura N° 10.1: Índices de Peligrosidad para Niños estimados para los<br>contaminantes en superficie y bajo suelo de cada torta de relave. ....              | 150 |
| Figura N° 10.2: Índices de Peligrosidad para Adultos estimados para los<br>contaminantes en superficie y bajo suelo de cada torta de relave. ....            | 150 |
| Figura N° 10.3: Riesgo extra de cáncer de por vida para Niños estimados para los<br>contaminantes en superficie y bajo suelo de cada torta de relave. ....   | 156 |
| Figura N° 10.4: Riesgo extra de cáncer de por vida para Adultos estimados para los<br>contaminantes en superficie y bajo suelo de cada torta de relave. .... | 156 |





INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

**ABREVIACIONES USADAS EN EL INFORME**

| Abreviación | Significado  |
|-------------|--|
| ERS         | Estimación de los riesgos en la salud  |
| DS          | Desviación estándar  |
| 95%NSC      | 95% nivel superior de confianza del promedio   |
| PRGs        | Valores Preliminares de Remediación Basados en Riesgo (del inglés <i>Preliminary Remediation Goals</i> ) |
| FPC         | Factor de potencia cancerígena (oral, dérmica)   |
| FRUi        | Factor de Riesgo Unitario (inhalatoria)  |
| DRf         | Dosis de referencia (oral, dérmica)  |
| CRf         | Concentración de referencia (inhalatoria)  |
| ProUCL      | Software para estimar el 95% NSC del promedio  |
| EMR         | Exposición máxima razonable del receptor   |
| CP          | Cociente de Peligrosidad   |
| IP          | Índice de Peligrosidad   |
| RECV        | Riesgo Extra de Cáncer de por Vida   |
| CTI         | Contaminantes Tentativamente Identificados   |
| CRP         | Contaminante de Riesgo Potencial   |
| CRS         | Contaminante de Riesgo Significativo   |
| LD          | Límite analítico de detección química  |
| MCC         | Modelo Conceptual del Problema de Contaminación  |
| FEH         | Factores de Exposición Humana  |



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

| Abreviación | Significado  |
|-------------|--|
| Cc          | Concentración de contaminante $c$ en una matriz ambiental  |
| PC          | Peso corpóreo promedio humano                              |
| PT          | Ponderación temporal                                       |
| DDPV        | Dosis Diaria Promedio de por Vida                          |
| DDPA        | Dosis Diaria Promedio Anual                                |
| VRh         | Volumen de aire respirado por hora                         |
| ABS         | Absorción de contaminante por una ruta de exposición       |
| IDA         | Ingesta diaria de agua                                     |
| FAC         | Fracción de agua ingerida contaminada                      |
| IIP         | Ingestión involuntaria de polvo                            |
| FRP         | Fracción de retención de partículas en la vía respiratoria |
| CDV         | Consumo Diario de productos Vegetales                      |
| CDA         | Consumo diario de productos Animales                       |
| TE          | Tiempo de exposición, h/d                                  |
| FE          | Frecuencia de exposición, d/años                           |
| DE          | Duración de exposición, años                               |
| IARC        | International Agency for Research in Cancer                |
| USEPA       | U.S. Environmental Protection Agency                       |
| CDC         | U.S. Centro para la Prevención y Control de Enfermedades   |
| NRC         | U.S. National Research Council                             |



---

## CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

### 1.1. Contexto general

Este documento constituye el “**INFORME FINAL DE EVALUACIÓN DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA DE ANDACOLLO**” del Proyecto “EVALUACIÓN DE RIESGOS PARA LA SALUD EN ASENTAMIENTOS HUMANOS PRÓXIMOS A SITIOS DE MINERÍA METÁLICA”, correspondiente al código 7.11 del Convenio CENMA-CONAMA 2011, según Términos de Referencia.

### 1.2. Objetivos

#### 1.2.1. Objetivo general

- El objetivo general fue efectuar investigaciones confirmatorias y una evaluación de riesgo a la salud, como herramientas de apoyo a la gestión pública de los asentamientos humanos de Andacollo, próximos a sitios de minería metálica, histórica y actual, con presencia de contaminantes.

#### 1.2.2. Objetivos específicos

- Culminar las Investigaciones Confirmatorias iniciadas en asentamientos humanos de Andacollo y efectuar una Evaluación de Riesgos a la Salud en las áreas en las que se determine la presencia de contaminantes.
- Planificar el manejo de los principales riesgos que resulten de la evaluación de riesgos a la salud de grupos poblados presentes en la ciudad de Andacollo y sus alrededores.



Universidad de Chile

INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

---

**1.3. Alcance del estudio**

El alcance del presente estudio abarca a los pasivos ambientales mineros (relaves)



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

---

## **CAPITULO II: ANTECEDENTES DEL AREA DE ESTUDIO**

### **2.1. Antecedentes generales**

Andacollo se encuentra ubicada en la provincia del Elqui, Región de Coquimbo a 56 kilómetros en dirección sudeste de la Serena. Andacollo es una ciudad que depende de su actividad minera proveniente de medianas y pequeñas explotaciones de cobre y oro. La artesanía y explotación de recursos turísticos relacionados con la riqueza histórica y cultural de la localidad contribuyen a la economía comunal. No obstante, la población de Andacollo vive en condición de pobreza.

La microrregión de Andacollo se sitúa sobre un extenso yacimiento. La zona poniente del pueblo está ocupada por las mineras Carmen de Andacollo (producción de cobre catódico) y Dayton (extracción de oro mediante el proceso de solución de cianuro), y el centro mismo está cubierto de tortas de relave (Figura 1.1) desechos de las actividades del proceso de extracción de oro en los trapiches.



Figura N° 1.1: Relaves mineros en la ciudad de Andacollo

Andacollo cuenta con unos 10.288 habitantes (ONEMI, Julio, 2009), rodeado de cerros desérticos. Existen relaves dispersos por toda la ciudad. Estas tortas de desecho denominadas Relaves, fueron generadas durante varios siglos de faena minera de extracción de oro, plata y cobre, que acontecían aquí antes de la llegada de los españoles. En la actualidad hay más de 1.000 pirquineros que bajan su producción a los trapiches de molienda en el pueblo. En un tiempo hubo más de 150 trapiches funcionando, pero hoy en día quedan muy pocos en los alrededores de Andacollo. Las tortas de relave presentan erosión profunda y derrames superficiales.



## 2.2. Actividad minera en la zona

Desde el punto de vista de la actividad económica de la zona, la minería ha sido una actividad productiva importante desde los tiempos prehispánicos. Actualmente se desarrollan explotaciones de dos grandes compañías mineras. Además la comuna contabiliza 66 plantas de beneficio, 5 de ellas activas y las restantes paralizadas o desmanteladas. También posee 53 minas y un total de 251 tranques de relave con un total de 8.700.000 m<sup>3</sup>, los cuales forman parte del pasivo ambiental de la comuna. Gran parte de las instalaciones de la actividad minera se ubican en la parte central de la comuna en las cercanías de la ciudad de Andacollo, lo que representa un riesgo latente para la población residente, que además depende de esta actividad económica para enfrentar la pobreza y el desempleo.

La comuna de Andacollo presenta un agotamiento de los recursos naturales no renovables por explotación minera, mala calidad de vivienda en sectores marginales y rurales, inadecuado sistema de disposición y tratamiento de desechos sólidos urbanos. La ciudad y sectores aledaños han sido declarados Zona saturada por Material Particulado Respirable MP10, como concentración de 24 horas y anual.

## 2.3. Población de la zona

De los 10.288 habitantes, 5.140 corresponden a mujeres y 5.148 a hombres. El 91,2% de estos habitantes corresponden a población urbana y el 8,8% a población rural. En cuanto a los grupos etarios, de 3.345 habitantes se encuentran en el rango de 0 a 17 años, en el rango de 18 a 64 años 5.929 habitantes y 1.014 habitantes sobrepasa los 65 años de edad (Figura N° 1.1).

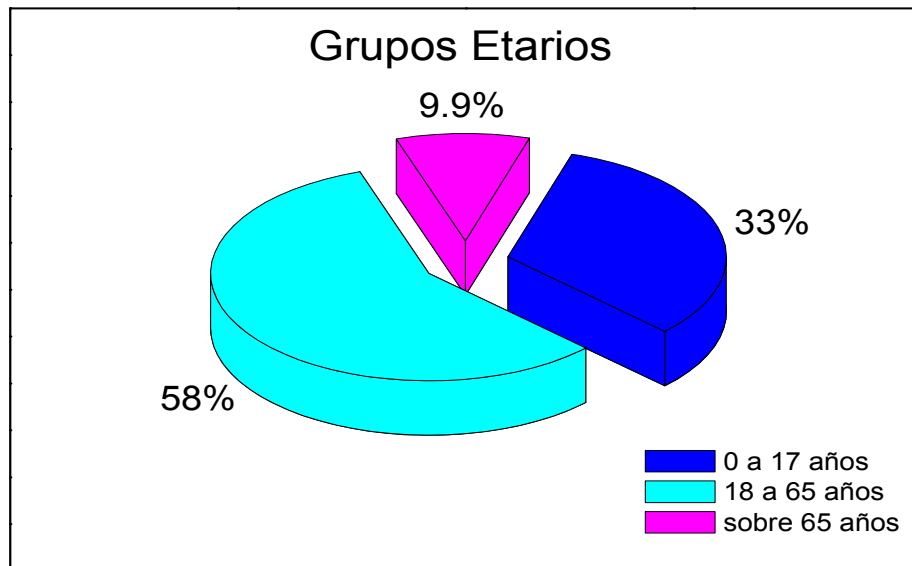


Figura N° 2.1: Grupos etarios de la comuna de Andacollo

#### 2.4. Clima

La zona de Andacollo se caracteriza por presentar un clima árido, de baja precipitación, con un promedio anual de 135 mm concentrada en los meses de mayo y agosto, presenta mayormente días despejados, con ausencia de nubosidad y sequedad del aire, con temperaturas muy estables a través del año con un promedio de 17°C y períodos de sequía característicos. Los suelos no son apropiados para la producción de cultivos y frutales. Las napas subterráneas son profundas, con cotas a más de 80 m de profundidad.





INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

Respecto a los vientos predominares en la zona, existen tendencias claras de flujos que son de SSW-S entre las 00:00 a 9:00 y 18:00 a 24:00 y N-NNW entre las 9:00 y 18:00. Dichos horarios sabrían entre las diferentes estaciones del año, cabe destacar que dichas direcciones presentan cambios graduales, por lo que se pueden encontrar ambas direcciones diariamente (Cortes, 2009).

## 2.5. Flora y fauna

Respecto a la vegetación de zona, la superficie de la comuna que se encuentra cubierta por vegetación, se estima entre un 10 a 15%, predominando las especies leñosas.

Respecto la fauna de la zona de estudio, se han identificado cerca de 27 especies de vertebrados silvestres, entre ellas el Zorro Culpeo (*Pseudalopex culpaeus*), Zorro Chilla (*Pseudalopex griseus*), Ratón Chinchilla (*Abrocoma bennetti*) y también algunos reptiles que se encuentran en estado vulnerable como son la Culebra de Cola Larga (*Philodryis chamissonis*), Lagartija (*Liolaemus nitidus*) y la Iguana (*Callopistes palluma*) (SIGA, 2006).

## 2.6. Calidad del aire

El lunes 6 de abril del 2009, la localidad de Andacollo y sus sectores aledaños fueron declarados como zona saturada por material particulado respirable (PM 10) como concentración de 24 horas y anual. La declaración se sustenta en los resultados obtenidos del monitoreo oficial de PM10; los cuales el año 2007 superaron la norma primaria de 24 horas en ocho ocasiones, siendo el máximo



Universidad de Chile

INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

---

permitido siete días con concentraciones superiores al percentil 98 de la norma o igual que  $150 \text{ ug/m}^3$  (CONAMA, 2009).



## CAPITULO III: METODOLOGÍA EMPLEADA PARA LA EVALUACIÓN DE RIESGOS A LA SALUD

### 3.1. Generalidades

El análisis de riesgo permite generar información requerida para la toma de decisiones relacionadas con la prevención, disminución, o control del riesgo que presentan las tortas de relaves mineros, en este caso. En primer lugar, la estimación del riesgo permite obtener una perspectiva acerca de las diferentes fuentes y naturaleza de riesgo, y tener evidencia acerca de las contribuciones de las fuentes, los contaminantes, y las vías de exposición, respecto del índice de peligrosidad total y los riesgos de cáncer total. En segundo lugar la estimación de riesgo permite identificar los riesgos máximos para una variedad de receptores humanos sujetos a diversos escenarios de exposición. En tercer lugar el análisis de riesgo provee las bases de un marco sistemático usado para definir los recursos óptimos para evitar ó controlar los riesgos, en particular de riesgos futuros (tales como traslado de las tortas o remediación in situ).

### 3.2. Fundamentos de la metodología empleada

La metodología usada en el presente análisis de riesgo refleja principios y prácticas usadas y recomendadas por la U.S. Environmental Protection Agency (U.S.EPA) y es como se practica actualmente en los EE.UU. La metodología de estimación de riesgos en la salud para problemas de contaminación de sitios por sustancias peligrosas está descrita en la colección que comienza con el documento titulado ***Risk Assessment Guidance for Superfund, Volume 1 – Human Health Evaluation Manual, Part A – Baseline Risk Assessment (U.S.EPA, 1989)***. Este



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

es el primero de numerosos documentos guía en el área de análisis de riesgo, y otros documentos que describen metodologías de apoyo son citados en su oportunidad.

La evaluación de los riesgos en la salud es un proceso científico que se usa para estimar la probabilidad de efectos en la salud en humanos como consecuencia de una exposición a sustancias químicas peligrosas.

La evaluación de riesgos está diseñada para responder a preguntas tales como:

- Está el sitio contaminado con sustancias peligrosas?
- Si la gente se pone en contacto con las sustancias, se pueden enfermar?
- Es necesario llevar a cabo actividades de gestión de riesgo en el área contaminada?

### 3.3. Implementación de la metodología

La implementación de una metodología de evaluación de riesgo debe considerar al menos la evaluación de tres factores: el grado de contaminación del ambiente, la exposición de la población afectada presente y/o futura y los posibles efectos biológicos a la población y los ecosistemas presentes. Actualmente existen diversas metodologías de evaluación de riesgo que han sido aplicadas a sitios específicos de grandes zonas mineras, algunas de las cuales consideran un enfoque ecosistémico, otros netamente toxicológicos y otras, una simple caracterización del sitio como un diagnóstico del problema.

La evaluación de riesgo utilizada consiste en cuatro fases: 1. la caracterización del peligro representado por la contaminación, 2. la caracterización de la exposición

humana, 3. la Caracterización de la toxicidad de los contaminantes, y 4. la caracterización del riesgo en la salud. La relación entre estas fases se muestra en el siguiente diagrama.

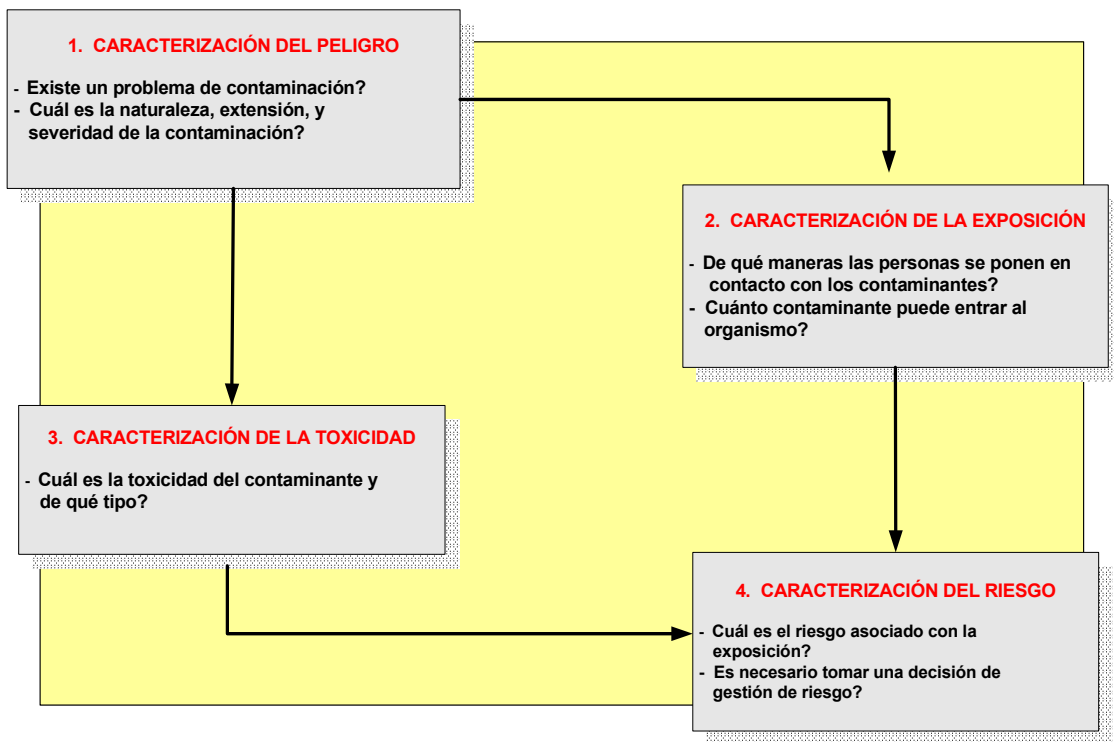


Figura Nº 3.1: Componentes de la evaluación de riesgos en la salud

La **caracterización del peligro** consiste en determinar si la contaminación por sustancias peligrosas realmente existe. Durante la caracterización se determina qué



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

tipos de contaminantes existen (naturaleza), cuál es la localidad y profundidad en que se encuentran (extensión), y cuál es la concentración de cada contaminante (severidad).

En la **caracterización de la exposición** se determina de qué maneras las personas se ponen en contacto con los contaminantes, y cuánto de cada contaminante entra al organismo.

En la fase de **caracterización de la toxicidad**, se identifican la información relacionada con la toxicidad del contaminante, de qué tipo, y cuáles son los criterios de toxicidad (es decir los factores de dosis-respuesta) de cada contaminante.

Finalmente en la fase de **caracterización del riesgo**, se integra toda la información previa y se calcula riesgo crónico ó cancerígeno asociados con los contaminantes y vías de exposición, para los receptores en estudio.

Los resultados finales indican las magnitudes de los riesgos, que permiten establecer las bases para tomar decisiones de es necesario una gestión de riesgo tal como remediación del terreno, ó si el riesgo es suficientemente bajo como para justificar no llevar a cabo tareas de remediación. Como consecuencia final, se puede determinar si es necesario tomar una decisión respecto a los riesgos que presentan los contaminantes.

La evaluación de riesgo sitio específico sigue las directrices sobre cómo llevar a cabo un estudio que permita fundamentar la toma de decisiones frente a la necesidad de implementar posibles medidas de intervención para la minimización del riesgo ambiental encontrado. En efecto, si la evaluación de riesgos caracteriza los riesgos existentes como no tolerables, entonces el sitio bajo estudio debe ser intervenido para reducir los niveles de las sustancias peligrosas hasta



Universidad de Chile

INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

---

concentraciones que signifiquen un riesgo aceptable para la salud pública o el medio ambiente.



---

## CAPITULO IV: MUESTREO

### 4.1. Alcance y objetivo

El objetivo de este documento es detallar el protocolo para el muestreo de contaminantes metálicos en relaves mineros en el marco de estudios de evaluación de riesgos a la salud presuntamente relacionados con la existencia de pasivos ambientales mineros (PAM).

#### 4.1.1. Descripción del área de estudio y de los fundamentos del muestreo en relaves

La comuna de Andacollo se ubica en una hondonada junto a la quebrada Andacollo y sus afluentes. La ciudad se ordena en torno a sus hitos religiosos los que sobresalen en el centro de su entorno construido. La incorporación al espacio urbano de tortas de desechos, ubicadas en la zona central de la ciudad agrega un valor sustantivo a la morfología del área urbana según consigna la propuesta de Plan Regulador para la Comuna de Andacollo, elaborada en 2008.

El área de estudio abarca la zona urbana de la ciudad de Andacollo y la recolección y análisis de muestras desde distintos sitios de minería tanto activos (maray, trapiches) como abandonados (relaves).





#### **4.2. Objetivo del programa de muestreo**

El objetivo del programa de muestreo fue producir un conjunto de muestras representativas del ambiente bajo estudio y convenientes para los análisis subsecuentes y objetivos, evitando favorecer positiva o negativamente a ninguno de los actores con intereses en cualquier situación ambiental. Esto es, no deben conducir a evaluaciones sesgadas a favor de privados, pobladores, autoridades, ni a diseños tan sencillos que cuestionen la validez científica de las conclusiones obtenidas. De este modo, las muestras fueron obtenidas en lugares y cantidades tales que permitan una información confiable y libre de sesgos. Por consiguiente, si las muestras son representativas del problema, la información analítica obtenida de ellas también será representativa del problema en estudio.

La obtención de muestras representativas de un problema ambiental considera diferentes aspectos que pueden variar de un programa de muestreo a otro, según los parámetros físicos y químicos específicos a medir y de los componentes ambientales a considerar tales como aire, suelo, aguas, biota.

Otro aspecto esencial que fue considerado durante la realización de los procedimientos de muestreo, fue la integridad de la muestra desde el campo hasta el laboratorio, evitando que los analitos de interés se puedan modificar durante el trayecto de la muestra hasta el laboratorio. Lo anterior incluyo tanto una posible pérdida física por volatilización de alguno de los componentes, como la contaminación química o la degradación microbiológica de los mismos (ILTMS-001, 2004).



### 4.3. Obtención de muestras

En todos los casos, se utilizaron muestras puntuales de los distintos puntos de muestreo, las que fueron debidamente identificadas y conservadas hasta su análisis según los protocolos establecidos en el Laboratorio de Química Ambiental de CENMA. Dada la heterogeneidad propia de los relaves, se desestimó el uso de muestras compuestas porque se consideraron menos representativas de la situación en estudio.

Este proyecto se desarrolló, considerando la toma de muestras en sitios representativos de la actividad minera, de modo de obtener la información representativa para realizar la evaluación de riesgos a la salud y así orientar la gestión ambiental de estos pasivos mineros, según se resume en la siguiente tabla. Esto, en consideración a la prioridad local de evaluar los sitios con ubicación más inmediata al radio urbano, como se explicó anteriormente.

Tabla N° 4.1: Resumen de información sobre el muestreo efectuado en Octubre 2010.

| Tipo de sitios | Sitios por tipo | Muestras por tipo de sitio | Identificación de los sitios en este documento |
|----------------|-----------------|----------------------------|--|
| Relaves        | 12              | 228                        | 1,3,4,5,6,7,8,9,10,11,13,18                    |
| Maray          | 1               | 3                          | 2  |
| Trapiches      | 5               | 25                         | 12,14,15,16,17                                 |
| TOTAL          | 18              | 256                        |  |

La selección de los sitios específicos a muestrear se realizó considerando una distribución que permitiera obtener información de la exposición que finalmente puede estar recibiendo la población de la ciudad de Andacollo, por tanto se consideraron sitios distribuidos por toda la ciudad, además de considerar distintos tipos de sitios representativos de la diversidad de la actividad minera en la zona, como se presenta en la siguiente figura.



Figura N° 4.2: Ubicación general de los sitios muestreados, en la ciudad de Andacollo.



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

Nota: Los cuadros identificados como 306 y 307 corresponden a dos muestras de suelo obtenidas como zonas de referencia al norte y al sur de la ciudad y referidas como Valor base durante el estudio.

Se realizó una visita preliminar (Informe Final Andacollo 2010, Anexo 2) donde se efectuó la toma de muestra en el nivel superficial, a 1 metro de profundidad y a 2 metros de profundidad en el caso de los relaves. Esto basado en los siguientes antecedentes:

El objetivo final del estudio en el caso de estudio Andacollo es llegar a una evaluación de riesgos a la salud que facilite la toma de decisiones para la gestión de los pasivos ambientales mineros, específicamente los relaves. Por consiguiente, deberá disponerse de muestras cuyos contenidos den cuenta de las vías de exposición planteadas en estudios anteriores, o sea, inhalación de partículas sólidas que el viento arrastra desde el relave y el contacto dermal o ingestión de material porque los niños jueguen en el relave. De este modo, las muestras de la parte alta del relave son las que quedan con mayor exposición al viento y las de la parte baja son las que con mayor frecuencia estarán relacionadas con el juego de los niños en la zona. Por consiguiente, se diseñó el muestreo de los relaves considerando muestras en la cima y en las zonas bajas de los mismos.

Es de considerar que las pilas de residuos o relaves son heterogéneas tanto horizontal como verticalmente y que podrían contener niveles distintos de contaminantes peligrosos a distintas profundidades. Esta heterogeneidad puede o no ser evidente a simple vista como se aprecia en la Figura N° 4.3.



Figura N° 4.3: Foto que ilustra la heterogeneidad de los relaves, nótese los colores diferentes en los distintos estratos de la pila.

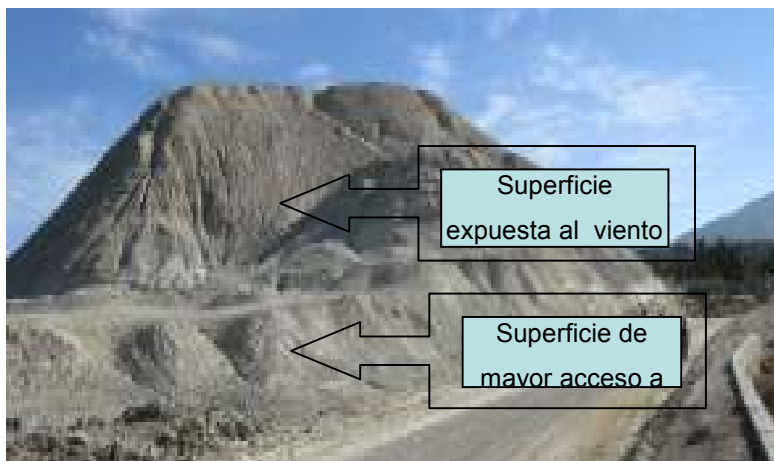


Figura N° 4.4: Ilustración genérica de las áreas a muestrear en la superficie de un relave para el estudio de evaluación de riesgos.



Figura N° 4.5: Vista panorámica que ilustra la ubicación de los relaves en la zona urbana de la comuna de Andacollo.

En virtud de lo anterior, se consideró muestrear a nivel superficial y a cierta profundidad (2 metros) para evaluar la composición química del relave a nivel superficial y también al interior de la pila de desechos, de modo que esta información pueda ser útil para orientar las posibles acciones de gestión, ya que serán considerados en las etapas de Evaluación de Riesgos a la salud las concentraciones de los contaminantes en ambos estratos.

#### 4.4. Metodología de muestreo

##### 4.4.1. Metodología de muestreo de muestras sólidas

El enfoque utilizado para el diseño del muestreo, se encuentra acorde a lo planteado en la norma ASTM 6009-96 Standard Guide for Sampling Waste Piles. Esta norma describe los principios para el muestreo de desechos dispuestos en forma de pilas aplicable a la evaluación de sitios contaminados entregando recomendaciones para el equipamiento y las condiciones de seguridad a emplear.

De acuerdo a lo antes planteado la toma de muestras fue realizada a dos niveles: Nivel superficial (0 a 10 cm) como se aprecia en la Figura N° 4.6. y a 2 metros de profundidad , Figura N° 4.7.



Figura N° 4.6: Toma de muestra a nivel superficial.

Las muestras a 2 metros de profundidad fueron obtenidas por medio de un barreno manual introducido desde la superficie en forma vertical. Los relaves que forman



grandes acumulaciones, pueden muestrearse desde los bordes, de modo que introducir el barreno lateralmente en forma horizontal (Figura N° 4.8).



Figura N° 4.7: Toma de muestra a 2 metros de profundidad con barreno manual en forma vertical.



Figura N° 4.8: Toma de muestra a 2 metros de profundidad con barreno manual en forma horizontal.



Una vez que la muestra es obtenida desde el punto de muestreo, es depositada en envases de vidrio debidamente rotulado (Figura N° 4.9)



Figura N° 4.9: Trasvasije de muestra del barreno al envase.

#### 4.4.1. Metodología de muestreo de muestras líquidas: Aguas

El proyecto también contempló el análisis de muestras de aguas superficiales, potables e industriales en la zona de estudio de modo de verificar los niveles de Hg en dichas matrices. Para ello se utilizaron los protocolos establecidos en el Laboratorio de Química Ambiental de CENMA que son referidos a las Normas Chilenas 411.



Figura N° 4.10: Muestreo de agua potable según NCh 409/2.



Figura N° 4.11: Muestreo de agua de proceso en trapiches. Comuna de Andacollo.



Universidad de Chile

INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

---

#### **4.5. Puntos de muestreo**

A continuación se presentan el detalle de los puntos de muestreo para cada uno de los sitios estudiados.

#### 4.5.1. Sitio 1

Este sitio es un relave que se ubica al nororiente de la ciudad de Andacollo según se ilustra en la siguiente figura:



Figura N° 4.12: Ubicación del Sitio 1 respecto de la ciudad de Andacollo.



Figura N° 4.13: Ubicación de los puntos de muestreo en el sitio 1.

#### 4.5.2. Sitio 2

Este sitio es un maray (trapiche artesanal) que se ubica al nororiente de la ciudad de Andacollo, cerca relave del sitio 1, según se ilustra en la siguiente figura.



Figura Nº 4.14: Ubicación del Sitio 2 respecto de la ciudad de Andacollo.



Figura Nº 4.15: Ubicación de los puntos de muestreo en el sitio 2 (maray).



### 4.5.3. Sitio 3

Este sitio es un relave que se ubica al centro oeste de la ciudad de Andacollo según se ilustra en la siguiente figura:



Figura Nº 4.16: Ubicación del Sitio 3 respecto de la ciudad de Andacollo.



Figura Nº 4.17: Ubicación de los puntos de muestreo en el sitio 3.

#### 4.5.3. Sitio 4

Este sitio es un relave que se ubica al centro oeste de la ciudad de Andacollo, próximo al sitio 3 según se ilustra en la siguiente figura:



Figura Nº 4.18: Ubicación del Sitio 4 respecto de la ciudad de Andacollo.



Figura Nº 4.19: Ubicación de los puntos de muestreo en el sitio 4.

#### 4.5.5. Sitio 5

Este sitio es un relave que se ubica al sur oriente de la ciudad de Andacollo, próximo al sitio 3 según se ilustra en la siguiente figura:



Figura Nº 4.20: Ubicación del Sitio 5 respecto de la ciudad de Andacollo.



Figura Nº 4.21. Ubicación de los puntos de muestreo en el sitio 5.



#### 4.5.6. Sitio 6

Este sitio es un relave que se ubica al centro de la ciudad de Andacollo próximo a los sitios denominados como 7 y 8, según se ilustra en la siguiente figura.



Figura Nº 4.22: Ubicación del Sitio 6 respecto de la ciudad de Andacollo.



Figura Nº 4.23: Ubicación de los puntos de muestreo en el sitio 6.

#### 4.5.7. Sitio 7

Este sitio es un relave que se ubica al centro de la ciudad de Andacollo, próximo a los sitios 6 y 8 según se ilustra en la siguiente figura



Figura Nº 4.24: Ubicación del Sitio 7 respecto de la ciudad de Andacollo.



Figura Nº 4.25: Ubicación de los puntos de muestreo en el sitio 7.

#### 4.5.8. Sitio 8

Este sitio es un relave que se ubica al centro de la ciudad de Andacollo, próximo a los sitios 6 y 7 según se ilustra en la siguiente figura.



Figura Nº 4.26: Ubicación del Sitio 8 respecto de la ciudad de Andacollo.



Figura Nº 4.27: Ubicación de los puntos de muestreo en el sitio 8.

#### 4.5.9. Sitio 9

Este sitio es un relave que se ubica al sur poniente de la ciudad de Andacollo según se ilustra en la siguiente figura:



Figura N° 4.28: Ubicación del Sitio 9 respecto de la ciudad de Andacollo.



Figura N° 4.29: Ubicación de los puntos de muestreo en el sitio 9.



#### 4.5.10 Sitio 10

Este sitio es un relave que se ubica al centro de la ciudad de Andacollo, próximo al sitio 8, según se ilustra en la siguiente figura:



Figura N° 4.30: Ubicación del Sitio 10 respecto de la ciudad de Andacollo.



Figura N° 4.31. Ubicación de los puntos de muestreo en el sitio 10.

#### 4.5.11. Sitio 11

Este sitio es un relave que se ubica al centro de la ciudad de Andacollo según se ilustra en la siguiente figura:



Figura N° 4.32: Ubicación del Sitio 11 respecto de la ciudad de Andacollo.



Figura N° 4.33: Ubicación de los puntos de muestreo en el sitio 11.

#### 4.5.12. Sitio 13

Este sitio es un relave que se ubica al centro poniente de la ciudad de Andacollo según se ilustra en la siguiente figura:



Figura N° 4.34: Ubicación del Sitio 13 respecto de la ciudad de Andacollo.



Figura N° 4.35: Ubicación de los puntos de muestreo en el sitio 13.

#### 4.5.13. Sitio 18

Este sitio es un relave que se ubica al suroriente de la ciudad de Andacollo según se ilustra en la siguiente figura:



Figura N° 4.36: Ubicación del Sitio 18 respecto de la ciudad de Andacollo.



Figura N° 4.37: Ubicación de los puntos de muestreo en el sitio 18.





#### **4.6. Transporte de muestras**

Las muestras debidamente embaladas fueron transportadas en recipientes adiabáticos (coolers) con icepack, de manera de evitar altas temperaturas y fueron transportadas en un vehículo institucional hacia el Laboratorio de Química Ambiental del CENMA.

#### **4.7. Entrega de muestras en el laboratorio**

Las muestras se entregaron al encargado de recepción de muestras del laboratorio de Química Ambiental del CENMA.

Quienes verificaron que todos los envases han llegado de manera conforme, así como también acorde con el tiempo transcurrido desde la toma de muestras.

#### **4.8. Cadena de custodia**

Una parte esencial del muestreo es asegurar la integridad de la muestra desde la colección hasta el análisis. La posesión y manejo de muestras debe ser trazable. Esta documentación de la historia de la muestra se conoce como “la cadena de custodia”

A lo largo del programa de terreno, la identificación consistente y completa de la muestra y los procedimientos de la cadena de custodia son seguidos por el personal de terreno y del laboratorio. Esta sección documenta los requisitos, formas, y contingencias para cada uno de estos procedimientos.



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

El propósito de procedimientos de cadena de custodia es establecer un detalle escrito y documentación legal del evento de muestreo y todas las transacciones en las que las muestras son transferidas la custodia de un individuo a otro. La forma y procedimientos de cadena de custodia deben usarse desde el momento de toma de muestra hasta el recibo en el laboratorio. Todas las transferencias de posesión de muestras deben documentarse en el registro de cadena de custodia (Figura N° 4.37). Al transferir la posesión de muestras las personas que entregan y reciben firmarán, fecha, y anotarán la hora en el registro.

Una muestra es una evidencia física colectada del ambiente. La posesión de las muestras será trazable desde el momento que las muestras son colectadas hasta que ellas sean entregadas por los muestreadores. Los muestreadores son personalmente responsables del cuidado y custodia de las muestras coleccionadas hasta que ellas sean transferidas apropiadamente o se despachan



Universidad de Chile

# INFORME FINAL

## EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA DE ANDACOLLO

**Registro de Cadena de Custodia**  
**Laboratorio de Química y Referencia Medio Ambiental**

Teléfono: (+56 2) 2994170  
Fax: (+56 2) 2994172  
Av. Larrain 9975  
La Reina, Santiago de Chile

**N° 001**

Cliente N°: \_\_\_\_\_ Coord. del Proyecto/Contacto: \_\_\_\_\_  
Dirección: \_\_\_\_\_ Teléfono: \_\_\_\_\_ Fax: \_\_\_\_\_  
Ciudad/Región: \_\_\_\_\_ Muestreadores (nombre y firma): \_\_\_\_\_ (Coordinador)  
Nombre del Proyecto N°: \_\_\_\_\_  
Contrato/Orden de Compra/Corización: \_\_\_\_\_

| Identificación de Muestra |       | Localización/Descripción | Fecha | Hora | Tipo de Muestra | Tipo de Muestra | Tipo empaque del envase | Preserv. | Análisis Requerido |  | Pág. ____ de ____                                       |
|---------------------------|-------|--------------------------|-------|------|-----------------|-----------------|-------------------------|----------|--------------------|--|---|
| Código                    | CENMA |                          |       |      |                 |                 |                         |          |                    |  | Fecha:  |
|                           |       |                          |       |      |                 |                 |                         |          |                    |  | Cooler N°:  |
|                           |       |                          |       |      |                 |                 |                         |          |                    |  | Control de Temp.:                                       |
|                           |       |                          |       |      |                 |                 |                         |          |                    |  | <input type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No |
|                           |       |                          |       |      |                 |                 |                         |          |                    |  | Comentarios:  |

|                                       |              |                                      |              |                        |   |
|---------------------------------------|--------------|--------------------------------------|--------------|------------------------|---|
| Entregado por (nombre y firma): _____ | Fecha: _____ | Recibido por (nombre y firma): _____ | Fecha: _____ | Método de envío: _____ | Después del análisis, las muestras serán:                           |
| Compañía: _____                       | Hora: _____  | Compañía: _____                      | Hora: _____  | N° de guía: _____      | <input type="checkbox"/> Tratadas y desechadas (pago adicional)     |
| Razón: _____                          |              | Razón: _____                         |              | Fecha: _____           | <input type="checkbox"/> Almacenadas (30 días máx.)                 |
|                                       |              |                                      |              |                        | <input type="checkbox"/> Almacenadas sobre 30 días (pago adicional) |
|                                       |              |                                      |              |                        | <input type="checkbox"/> Devueltas al cliente                       |
|                                       |              |                                      |              |                        | <input type="checkbox"/> Otro (.....)                               |

|                                       |              |  |                    |
|---------------------------------------|--------------|--|--------------------|
| Entregado por (nombre y firma): _____ | Fecha: _____ | Recibido en Lab. por (nombre y firma): _____ | Comentarios: _____ |
| Compañía: _____                       | Hora: _____  | Fecha: _____ Hora: _____                     | _____              |
| Razón: _____                          |              | Temp (°C): _____                             | _____              |

FL-043 (04.11.03) v4 Distribución: Biotec/Laboratorio Amunillo-Cliente Rosado-Coordinador del Proyecto Vando-Coordinador en Torneo

Figura N° 4.38: Registro de Cadena de Custodia.



## **CAPITULO V: INSTRUMENTACIÓN EMPLEADA PARA EL ANÁLISIS QUÍMICO PARA DETERMINACIÓN DE METALES**

Para la cuantificación de los metales en cada una de las fuentes contaminares, fueron empleadas distintas técnicas analíticas, las cuales son descritas a continuación:

### **5.1. Análisis de mercurio total por Analizador directo de Mercurio (Mercuriómetro DMA-80)**

La cuantificación de mercurio en las muestras sólidas fueron medidas con el Mercuriómetro Milestone DMA-80 (Figura N° 5.1). Este método utiliza un horno oxigenado de descomposición para realizar un calentamiento controlado y de esta forma liberar el mercurio de las muestras (EPA Método 7473).

La muestra se seca y se descompone térmica y químicamente dentro del horno. Los productos de la descomposición son transportados por un flujo de oxígeno a la sección catalítica del horno, en este punto se completa la oxidación y los halógenos y óxidos de nitrógeno y azufre son atrapados. A continuación los productos resultantes son transportados a una trampa amalgamadora selectiva de mercurio.

El amalgamador se calienta rápidamente liberando el vapor de mercurio el cual es arrastrado por el oxígeno hasta las celdas de absorbancia colocadas en la trayectoria de la luz, a una sola longitud de onda del espectrofotómetro de absorción atómica.

La absorbancia (altura o área del pico) se mide a la longitud de onda de 253,7 nm en función de la concentración de mercurio.

Tabla N° 5.1: Detalle instrumental empleado para la determinación de Hg

| Equipo utilizado |   |
|------------------|---|
| Técnica          | Espectrofotometría de absorción atómica                   |
| Marca/modelo     | Milestone / DMA-80  |
| N° Serie         | 10020818  |
| Sistema          | Vapor de mercurio caliente                                |
| Software         | DMA-80's software terminal y Easydoc 3.3, versión rev. 03 |



Figura N° 5.1: Mercuriometro Milestone DMA 80



## 5.2. Análisis de mercurio total por espectroscopía de absorción atómica (EAA) por vapor frío

La cuantificación de mercurio en muestras líquidas fue realizada con un EAA Perkin Elmer (Figura N° 5.2). En donde el mercurio presente en forma de iones, en una porción de muestra líquida (proveniente de muestras de agua previamente digeridas), es reducido a mercurio elemental en estado de vapor, mediante reacción con un agente reductor en medio ácido.

El vapor atómico, o vapor frío es generado y conducido por un gas inerte de arrastre hacia una celda de cuarzo posicionada en el paso óptico de un espectrofotómetro de absorción atómica. La celda se encuentra a temperatura ambiente. La cantidad de radiación absorbida por la muestra es directamente proporcional a la concentración de Hg en la misma (Standard Methods, 2005).

Tabla N° 5.2: Detalle instrumental empleado para la determinación de Hg

| Equipo utilizado |   |
|------------------|---|
| Técnica          | Espectrofotometría de absorción atómica |
| Marca/modelo     | Perkin Elmer/ AAnalyst 700              |
| Sistema          | Generación de vapor frío                |
| N° Serie         | 700S10070101                            |
| Software         | Winlab 32, versión 6.5.0.0266.          |



Figura N° 5.2. Espectrofotómetro de Absorción Atómica (EAA) Perkin Elmer

### **5.3. Analizador portátil de fluorescencia de rayos X (XRF)**

El análisis de metales que incluye al As, Cd, Pb, Cr, Fe, Cu, Mn y Zn, fue realizado con el XRF Bruker S1 Turbo sd, un espectrofotómetro de fluorescencia de rayos x que permite realizar un barrido de metales en forma simultánea en cuestión de minutos.

La técnica XRF utiliza la emisión secundaria o fluorescente de radiación X que se genera al excitar una muestra con una fuente emisora de rayos X. La radiación X incidente o primaria expulsa electrones de capas interiores del átomo. Entonces, los electrones de capas más externas ocupan los lugares vacantes, y el exceso energético resultante de esta transición se disipa en forma de fotones: la llamada radiación X fluorescente o secundaria. Esta radiación de fluorescencia es



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

característica para cada elemento químico. Por lo tanto, es posible identificar un elemento dentro del espectro de la muestra si se conoce la energía entre los orbitales atómicos implicados (longitud de onda). La concentración de cada elemento se detecta midiendo la intensidad de la energía asociada a cada transición de electrones. Es decir, la salida de un análisis XRF es un espectro que muestra la intensidad de radiación en función de la energía.

El detalle de la validación de la metodología analítica se encuentra en el documento “Evaluación de la calidad de los suelos en el sector Jesús de Nazaret en Bajos de Mena, comuna de Puente Alto”. Informe Técnico. Agosto 2011 (I.Cotes 2011) realizado por CENMA

Tabla N° 5.3: Detalle instrumental empleado para la determinación de metales

| Equipo utilizado |                            |
|------------------|----------------------------|
| Técnica          | Fluorescencia de rayos x   |
| Marca/modelo     | Bruker/ S1 Turbo sd        |
| Sistema          | Fluorescencia de rayos x   |
| N° Serie         | LE1520                     |
| Software         | Bruker S1, versión 1.0.3.0 |





Figura N° 5.3. Analizador portátil de fluorescencia de rayos x Bruker S1 Turbo sd

Otra ventaja además de su rapidez en la generación de resultados es la posibilidad de emplearla en el análisis de muestras en terreno (Figura N° 5.4).

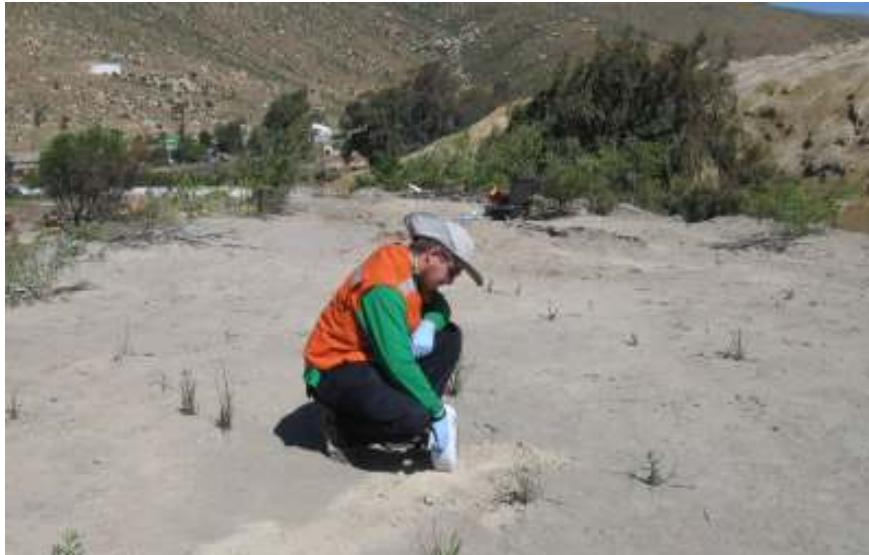


Figura N° 5.4. Analizador portátil XRF Bruker S1 Turbo sd en terreno

#### **5.4. Análisis de metales totales por espectroscopía de emisión atómica por medio de Plasma Inductivamente Acoplado (ICP)**

El barrido de metales que incluyó al Cd, Zn, Cr, As, Cu, Ni, Pb, Al, Se, Mn, Ag, V, Ba, Co, Mo, Be, B y Fe fue realizado a muestras líquidas fue por medio del ICP Óptico Perkin Emel 3300 XL.

En ICP-EOS la muestra es aspirada y transportada en forma líquida a un plasma de argón, el cual consiste en un flujo de gas de argón ionizado al que se aplica un campo de radio frecuencia. En el nebulizador del instrumento la muestra es convertida en un aerosol. La muestra en forma de aerosol es transportada al interior del plasma de argón donde es desolvatada, vaporizada, atomizada, excitada y/o ionizada. Los iones y átomos excitados emiten su radiación característica la cual es



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

detectada por un dispositivo foto sensible que selecciona la radiación por longitud de onda. La radiación es detectada y transformada en señales las que son convertidas en unidades de concentración.

Tabla N° 5.4: Detalle instrumental empleado para la determinación de metales

| Equipo utilizado |                                       |
|------------------|---------------------------------------|
| Técnica          | Espectrofotometría de emisión atómica |
| Marca/modelo     | Perkin Elmer/ Optima 3300 XL          |
| Sistema          | Plasma inductivamente acoplado        |
| N° Serie         | 069N8021002                           |
| Software         | Winlab 32, versión 4.0.0.0305         |



Figura N° 5.4. ICP Óptico Perkin Elmer 3300 XL



## CAPITULO VI: RESULTADOS ANALITICOS Y SELECCIÓN DE CONTAMINANTES DE INTERÉS

### 6.1. Resultados analíticos

Los resultados obtenidos del análisis cuantitativo de las muestras de relaves se encuentran en el **ANEXO 1 “RESULTADOS ANALÍTICOS”**. En el se detallan los niveles de Hg, As, Cd, Pb, Cr, Fe, Cu, Mn y Zn para cada uno de los puntos de muestreo descritos en el inciso 4.5. “Puntos de muestreos”. Cabe destacar que dichos puntos fueron analizados en 2 niveles, superficial y a 2 metros de profundidad, como fue descrito en el inciso N° 4.4.1. “Metodología de muestreo de muestras sólidas”.

### 6.2. Contaminantes Tentativamente Identificados (CTIs)

Según sean las evidencias ó sospechas acerca del problema de contaminación, las matrices ambientales y muestras problemas son analizadas químicamente de acuerdo a una **Lista de Analitos de Interés (LAIs)** para cada matriz ambiental de interés. Los resultados del análisis no siempre concuerdan con la LAIs que fueron solicitadas a ser analizadas por el laboratorio, y no es raro que los resultados informados por el laboratorio muestren *un número reducido, un gran número, ó sustancias insospechadas* además de las sustancias sospechadas.



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

Las sustancias informadas por el laboratorio corresponden a los **Contaminantes Tentativamente Identificados (CTIs)**, y queda aún por determinarse si guardan relación con el problema de contaminación. Los Contaminantes Tentativamente Identificados (CTIs) corresponden al subgrupo de analitos que tienen el mérito de haber sido positivamente identificados como resultado del muestreo y análisis químico.

La lista de CTIs incluye las siguientes sustancias positivamente identificados en los relaves de Andacollo: **Hg, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, Zn.**

### 6.3. Selección de Contaminantes de Riesgo Potencial (CRP)

Los CTIs pueden incluir sustancias químicas normalmente presentes en la naturaleza en bajas concentraciones, elementos que no influyen en los riesgos (macronutrientes tales como sodio, calcio, magnesio, etc.), o elementos que no son de interés para el análisis de riesgo. Por esta razón, y para simplificar el análisis y evitar una complejidad innecesaria, la USEPA recomienda eliminar aquellos contaminantes que no tienen significado químico ni biológico en el análisis de riesgo. Esta nueva lista de contaminantes seleccionados corresponde a los **Contaminantes de Riesgo Potencial (CRPs)** ya que está por determinarse si éstos realmente presentan un riesgo a la salud. Los CRPs son seleccionados dentro de cada matriz ambiental analizada químicamente.



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

En el presente estudio, los CTIs estudiados fueron todos aquellos de los cuales hay evidencia positiva de presencia y toxicidad establecida. Los CRPs fueron seleccionados de acuerdo con los siguientes criterios:

- Todos los CRPs para los cuales existe reglamentación ambiental chilena: **aluminio, arsénico, boro, cobre, cromo, hierro, manganeso, mercurio, molibdeno, plomo y zinc.**
- Todos los CRPs para los cuales se dispone por lo menos de un criterio de toxicidad tal como dosis de referencia (DRf), concentración de referencia (CRf), factor de potencia cancerígena (FPC) o factor de riesgo unitario (FRU): **aluminio, antimonio, arsénico, bario, berilio, boro, cadmio, cobre, cromo, estroncio, hierro, litio, manganeso, mercurio, molibdeno, níquel, plata, plomo, selenio, uranio, vanadio, y zinc.**
- Se incluyeron todos los contaminantes clasificados con un USEPA Peso de Evidencia (*Weight of Evidence*) A y B para los cuales existe un factor de potencia cancerígena o factor de riesgo unitario. Cancerígenos Clase A son reconocidos como cancerígenos en humanos, tal como el **arsénico, y cromo (VI)**. Cancerígenos clase B significa que sólo existe evidencia en animales experimentales pero no en humanos), e incluyen el **cadmio** (sólo por la vía de inhalación), y



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

**plomo.** La inclusión de cancerígenos Clase B se hace como política de protección adicional de la salud humana recomendada por la USEPA.

No se seleccionaron los siguientes contaminantes sobre la base que se describe:

- CRPs para los cuales no se dispone de criterios de toxicidad en la base de datos USEPA IRIS (2006), e incluyen: **bismuto**, **calcio** (macroelemento esencial), **cobalto** (microelemento esencial), **estaño**, **fósforo** (macroelemento esencial en forma de fosfatos), **magnesio** (macroelemento esencial), **potasio** (macroelemento esencial), **sodio** (macroelemento esencial).
- **Sulfato:** este es abundante en la dieta y es un metabolito intermedio normal. No fue incluido en el análisis de riesgo, ya que no hay criterios de toxicidad disponible. Efectos laxantes en ciertas personas han sido atribuidos al anión sulfato a concentraciones ambientales de >1200 mg/L, pero la evidencia es débil.
- Nó considerados como cancerígenos por ser Clase D incluyen **chromo III, manganeso, y mercurio.**
- USEPA ha recomendado que el **plomo** y sus compuestos sean considerados como *posibles* cancerígenos humanos (B2), y por lo tanto no ha desarrollado un factor de potencia cancerígena (FPC) para





INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

plomo. Por esta razón los riesgos cancerígenos atribuidos al plomo no fueron estimados en el presente estudio.

**La lista de CRPs seleccionados para el análisis de riesgos de los relaves de Andacollo incluye: As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb, Zn.**

#### **6.4. Determinación de niveles background de componentes ambientales**

La determinación de los niveles basales de la zona de estudio, fue realizada empleando la misma metodología del análisis cuantitativo de los sitios en estudio. En cada sitio, las muestras se tomaron según el plan de muestreo específico.

En la Figura N° 6.1 se ilustra la ubicación general de los sitios muestreados, en la ciudad de Andacollo. Campaña de Octubre de 2010. Los cuadros identificados como **306** y **307** corresponden a dos muestras de suelo obtenidas al norte y sur de la ciudad, las cuales serán consideradas como el nivel basal de la calidad del suelo para la comuna de Andacollo (Valor base).



Figura N° 6.1. Ubicación general de los sitios muestreados, en la ciudad de Andacollo. Campaña de Octubre de 2010.



## CAPITULO VII: ANÁLISIS DE DATOS

### 7.1. Tratamiento de datos

El análisis estadístico de los resultados se limitó a determinar valores de concentración representativa de contaminantes, que requieren de tratamientos de datos y de cálculos de un nivel superior de confianza, como se explican a continuación.

#### 7.1.1. Informe de contaminantes no detectados (NDs)

Los análisis químicos cuantitativos de contaminantes ocasionalmente incluyen resultados informados como “bajo el límite de detección, (<LD), lo cual es inevitable en estudios ambientales. Hasta hace unos años atrás, estos resultados se informaban como “cero”, y se los referían como “valores censurados a la izquierda.” Valores censurados a la izquierda no pueden ser utilizados como tal, puesto que introducen error negativo por prejuicio (*sesgo*). El límite de detección depende de factores tales como la metodología de análisis y de los instrumentos usados en la medición, y la falta de certeza de la ausencia total de la sustancia analizada se traduce en una incertidumbre agregada.

Existen tres métodos para el tratamiento de datos censurados. Un método es aceptar un valor numérico cero, y la consecuencia es que se puede subestimar la concentración verdadera y agregar sesgo negativo a los resultados. Un segundo método es remplazar el valor censurado por el valor límite de detección, y ocasionalmente se utiliza como enfoque conservador.



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

En el presente estudio el método usado para el tratamiento de datos censurados fue el **método aproximado del ½ límite de detección (LD) o ½ límite de cuantificación (LC)**. Para los efectos de un análisis de riesgo, y como una medida conservadora de precaución, la U.S. EPA recomienda que *datos censurados a la izquierda* sean remplazados por un valor equivalente a la *mitad del límite de detección del método analítico* usado. El error que se comete puede ser por exceso, pero la concentración promedio y por lo tanto los riesgos asociados no son subestimados, significando un margen adicional de seguridad en la estimación del riesgo. El método es aplicable si el número de NDs es bajo (p.ej., 10-15%). El método aproximado de remplazo de un “<LD” por el ½ LD debe ser usado con precaución, especialmente cuando se trata de datos con distribución lognormal.

#### 7.1.2. Estimación del 95% nivel superior de confianza del promedio (95% NSC)

Para estimar exposición, es necesario determinar la *concentración promedio* o en el punto de contacto, que representa una estimación razonable de las concentraciones probablemente contactadas a lo largo del tiempo de exposición. Debido a la incertidumbre asociada con la estimación del verdadero promedio para un sitio ó fuente de contaminantes, se recomienda el uso del 95% nivel superior de confianza del promedio (“**95% NSC del promedio**”). El 95% NSC significa que el *valor verdadero* del promedio está con una certeza del 95% por debajo del valor del 95% NSC, y es confiable, conservador, y estable. La U.S.EPA recomienda que no se usen valores máximos observados como valor estimado de la concentración del punto de exposición (CPE).



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

Para facilitar e introducir consistencia en los cálculos, la U.S. EPA desarrolló el software ProUCL. El software fue desarrollado específicamente para calcular el 95% NSC y otras estadísticas de poblaciones de datos relacionados con estimación de exposición, estimación de concentración promedio de contaminantes, ó niveles promedios de background.

El programa ProUCL *no procesa valores censurados a la izquierda*, sino el usuario debe procesar previamente los datos censurados. Todas las recomendaciones paramétricas y no paramétricas para calcular el promedio, desviación estándar, y 95% NSC calculados por el programa ProUCL están basadas en grupos de valores completos, sin valores censurados. El programa analiza los datos para determinar el tipo de distribución (normal, lognormal, ó gamma) que mejor describe la distribución de los datos, y luego provee recomendaciones resumidas para grupos de datos: 1) distribuidos normalmente, 2) con distribución gamma, 3) distribuidos lognormalmente, y 4) grupos de datos no paramétricos y que no siguen ninguna de las tres distribuciones mencionadas anteriormente incluidas en ProUCL.

En el software se ingresan la serie de datos disponible, y este realiza un tratamiento estadístico asumiendo distintos tipos de distribuciones, dependiendo de la data empleada. En forma instantánea, entrega resultados de la desviación estándar, numero de datos y el valor máximo, entre otros. Además el software sugiere al usuario la selección del 95% NSC más apropiado (Figura N° 7.1). Estas recomendaciones se basan en los resultados de simulación según estudios de Singh, y Iaci (2002).



Universidad de Chile

# INFORME FINAL EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA DE ANDACOLLO

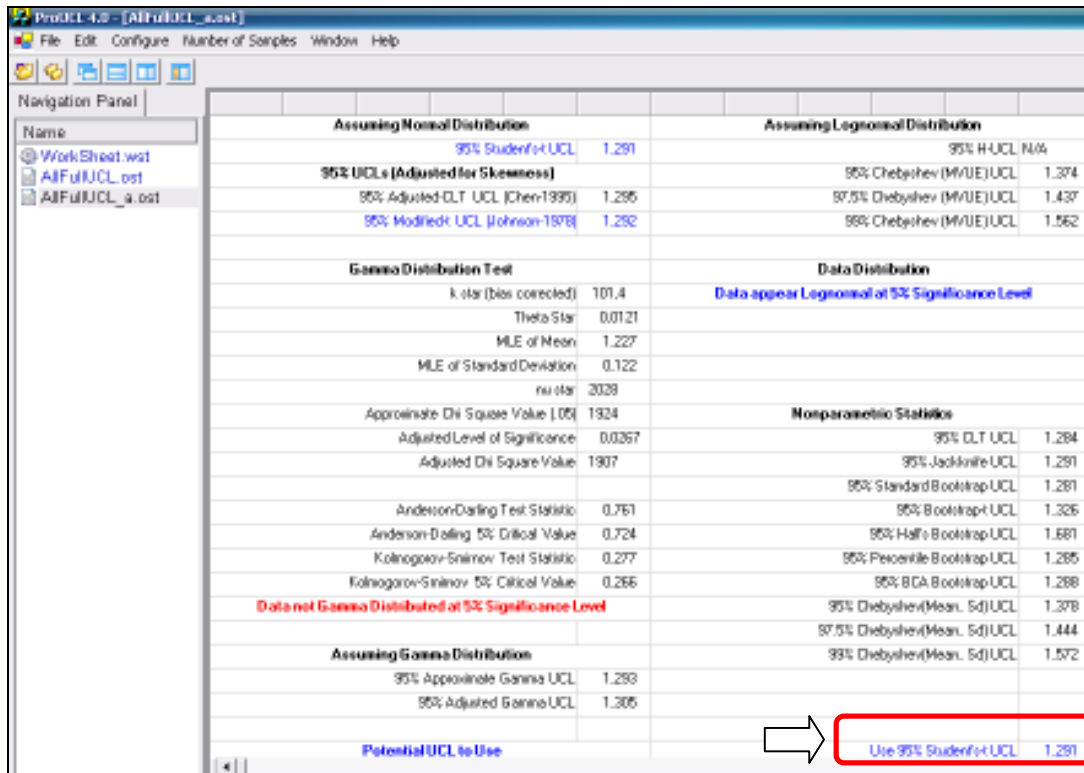


Figura N° 7.1: 95% NSC del promedio calculado con el software ProUCL

## 7.2. Concentraciones para el calculo de exposición, 95% NSC del promedio

Los datos de cada uno de los estratos **superficiales** y a **2 metros** de profundidad descritos en el **ANEXO 1 “Resultados Analíticos”**, fueron procesados con el software ProUCL. Los valores obtenidos para cada uno de los analitos de los distintos sitios en estudios se presentan en las Tablas N° 7.1 y 7.2. Dichas tablas contienen los valores que serán empleados para los cálculos de exposición en el



análisis de riesgos a la salud. El detalle de la desviación estándar, número de datos utilizados, valor máximo de la serie de datos y la metodología empleada para la obtención del 95% NSC se presenta en el **ANEXO 2 “ESTIMACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES REPRESENTATIVAS DE METALES PESADOS EN RELAVES DE ANDACOLLO”**

#### **7.2.1. Análisis de los Sitios a nivel superficial**

Los suelos superficiales de 19 tortas de relaves fueron analizados con el fin de estimar la exposición de receptores en Andacollo (Tabla N° 7.1). Se consideró especialmente que los materiales superficiales son fácilmente resuspendidos por el viento y transportados a distancia.

Las concentraciones detectadas de torta en torta son muy variables (p.ej., Hg, As, Pb, Zn), otras son de baja variabilidad (p.ej., Fe), y no parecen obedecer a tendencias generales

Los niveles de Hg, Cd en las tortas fueron más altos que los niveles basales, y por el contrario el Cu basal fue el más bajo observado. Los otros metales no mostraron tendencias definidas.

Todos los valores que se indican en la Tabla fueron considerados contaminantes de riesgo potencial (CRPs) e incorporados en el análisis de exposición y riesgo.

Tabla N° 7.1: 95% NSC del promedio, valores del contaminante en Superficie

| 95% NSC del promedio - valores del contaminante en Superficie |       |       |       |       |       |       |       |       |        |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Identificación  | Hg    | As    | Cd    | Pb    | Cr    | Fe    | Cu    | Mn    | Zn     |
| Valor base  | 0,385 | 10,50 | 13,50 | 11,38 | 78,68 | 57270 | 640,5 | 1922  | 115,2  |
| Sitio 1   | 4,832 | 4,950 | 13,50 | 5,500 | 22,50 | 27062 | 982,9 | 554,2 | 126,2  |
| Sitio 2   | 13,07 | 32,13 | 13,50 | 46,23 | 57,43 | 65987 | 1179  | 1591  | 1159   |
| Sitio 3   | 5,016 | 20,04 | 20,41 | 95,19 | 88,59 | 64592 | 1235  | 2176  | 247,5  |
| Sitio 4   | 3,761 | 38,43 | 33,17 | 5,500 | 135,9 | 59476 | 15111 | 1421  | 2769   |
| Sitio 5   | 0,617 | 2,500 | 20,30 | 9,373 | 32,66 | 48629 | 1578  | 389,4 | 50,61  |
| Sitio 6   | 7,784 | 20,37 | 13,50 | 37,98 | 36,33 | 39952 | 3970  | 823,7 | 161,5  |
| Sitio 7   | 7,815 | 19,66 | 16,17 | 31,17 | 31,58 | 41586 | 3465  | 1144  | 100,10 |
| Sitio 8   | 2,859 | 2,500 | 13,50 | 5,500 | 22,50 | 21021 | 2334  | 330,5 | 34,42  |
| Sitio 9   | 0,464 | 2,500 | 13,50 | 5,500 | 22,50 | 20661 | 4516  | 268,5 | 30,26  |
| Sitio 10  | 9,005 | 20,95 | 18,68 | 44,68 | 83,55 | 68540 | 723   | 1838  | 2177   |
| Sitio 11  | 12,03 | 3,554 | 17,47 | 10,42 | 30,86 | 32986 | 2209  | 470,3 | 44,25  |
| Sitio 13  | 7,968 | 66,16 | 16,36 | 124,3 | 131,1 | 56271 | 1367  | 2475  | 1786   |
| Sitio 18  | 3,352 | 14,68 | 33,42 | 59,74 | 88,92 | 51031 | 2531  | 1721  | 146,1  |
| LD (mg/Kg)  | 0,002 | 5,0   | 27,0  | 11,0  | 45,0  | 17,0  | 6,0   | 20,0  | 5,0    |





### **7.2.2. Análisis de los Sitios a 2 metros de profundidad**

Los suelos de profundidad de 18 tortas de relaves fueron analizados con el fin de estimar la exposición de receptores en caso de remoción o traslado de los relaves (Tabla N° 7.2).

Al igual que para los análisis superficiales, las concentraciones detectadas son muy variables, y no parecen obedecer a tendencias generales.

Los niveles de As, Hg, Cd en las tortas fueron más altos que los niveles basales. Los otros metales no mostraron tendencias definidas.

Todos los valores que se indican en la Tabla fueron considerados contaminantes de riesgo potencial (CRPs) e incorporados en el análisis de exposición y riesgo.



Universidad de Chile

INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

Tabla N° 7.2: 95% NSC del promedio, valores del contaminante a 2 m de profundidad

| 95% NSC del promedio - valores del contaminante a 2 metros de profundidad |       |       |       |       |        |       |       |       |       |
|---|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| Identificación  | Hg    | As    | Cd    | Pb    | Cr     | Fe    | Cu    | Mn    | Zn    |
| Valor base  | 0,370 | 2,500 | 13,50 | 5,500 | 109,20 | 71820 | 29,40 | 410,4 | 48,20 |
| Sitio 1   | 5,812 | 14,07 | 16,76 | 37,42 | 32,76  | 32613 | 2203  | 1326  | 446,2 |
| Sitio 2   | 14,08 | 21,93 | 13,50 | 19,27 | 53,90  | 58780 | 1185  | 972,0 | 411,9 |
| Sitio 3   | 1,910 | 2,500 | 32,65 | 5,500 | 22,50  | 37136 | 1642  | 428,9 | 62,37 |
| Sitio 4   | 2,780 | 3,744 | 25,02 | 13,55 | 31,75  | 42345 | 3670  | 485,0 | 388,1 |
| Sitio 5   | 0,410 | 2,500 | 25,59 | 9,495 | 30,75  | 44731 | 2775  | 420,7 | 64,73 |
| Sitio 6   | 8,227 | 53,09 | 13,50 | 89,61 | 88,68  | 52393 | 3015  | 1001  | 258,3 |
| Sitio 7   | 3,188 | 10,53 | 28,59 | 15,99 | 39,22  | 39105 | 2179  | 548,8 | 71,86 |
| Sitio 8   | 6,654 | 27,80 | 33,73 | 51,73 | 39,82  | 45888 | 2903  | 409,0 | 167,9 |
| Sitio 9   | 0,421 | 2,500 | 22,15 | 5,500 | 22,50  | 15890 | 1956  | 240,5 | 28,30 |
| Sitio 10  | 9,530 | 25,70 | 23,28 | 63,38 | 121,3  | 80665 | 478,7 | 935,9 | 542,5 |
| Sitio 11  | 4,149 | 3,356 | 16,16 | 6,646 | 28,17  | 32255 | 3929  | 536,6 | 53,37 |
| Sitio 13  | 8,342 | 37,50 | 21,10 | 104,2 | 169,8  | 87359 | 1917  | 1860  | 528,0 |
| Sitio 18  | 3,532 | 18,76 | 34,27 | 88,3  | 90,6   | 50483 | 1921  | 1695  | 256,0 |
| LD (mg/Kg)  | 0,002 | 5,0   | 27,0  | 11,0  | 45,0   | 17,0  | 6,0   | 20,0  | 5,0   |



## CAPITULO VIII: CARACTERIZACIÓN DE LA EXPOSICIÓN

La caracterización de la exposición consiste en estimar la *dosis*, esto es calcular la magnitud de contaminante que ingresa al interior del organismo a partir de la matriz ambiental contaminada durante el contacto con el límite exterior del organismo y por la ruta de exposición correspondiente.

### 8.1. Generalidades

La exposición se define como un contacto físico por un determinado tiempo entre un contaminante y un receptor humano, resultando en una cantidad del contaminante que ingresa al organismo. La exposición se describe mediante la concentración de un contaminante, en el medio de transporte, en el punto de contacto con el organismo, y por la duración del contacto. En el caso de las exposiciones de larga duración (meses, años), la exposición generalmente se representa por una concentración promedio.

La *dosis absorbida* se calcula para todas las sustancias y para las rutas de interés. Se expresa en términos de la cantidad de la sustancia (mg) que ingresa al organismo por unidad de masa corporal (kg) y por unidad de tiempo (día).

La caracterización de la exposición tiene por objeto:

- Determinar si los contaminantes de riesgo potencial pueden estar en contacto con personas



- Calcular la cantidad de contaminantes que ingresan al organismo
- Determinar la ruta de entrada de contaminantes al organismo
- Determinar la frecuencia, duración, y largo de tiempo del contacto contaminante-receptor
- Determinar la tendencia central y el nivel alto de la exposición
- Identificar los receptores potenciales y el número de receptores potenciales
- Evaluar la incertidumbre asociada con la exposición

## 8.2. Presencia y movimiento de los contaminantes en el medio ambiente

Una vía de exposición es el *camino ambiental* recorrido por un contaminante desde una fuente ambiental hasta el punto donde hace *contacto físico* con un receptor humano.

Una vía de exposición está constituida por varios *componentes* unidos por *procesos*, y la forma como se integran se muestra en Figura 17, abajo. Los componentes son: (a) la fuente de contaminante, (b) la concentración de contaminante en la matriz ambiental y en el punto de exposición, y (c) el punto de exposición del receptor humano con el contaminante. Los procesos son: (a) la liberación ambiental y el destino ambiental, y (b) la probabilidad temporal y espacial. Las secciones siguientes describen los componentes y procesos.



### **8.2.1. Fuentes primarias y secundarias de contaminantes ambientales**

Las fuentes primarias de contaminantes están representadas por las tortas de relaves, que han estado en el mismo lugar por hace siglos. Por efecto de la erosión siguiente a precipitaciones, ha habido movimiento de las arenas de relaves, constituyendo fuentes secundarias.

### **8.2.2 Mecanismos de liberación y transporte ambiental de los contaminantes**

Los contaminantes pueden ser liberados y transportados desde la matriz ambiental (suelo, agua) mediante procesos tales como evaporación (para solventes volátiles), volatilización (para mercurio metálico), resuspensión en partículas por efecto del viento, arrastre como sedimento por las aguas en superficie o aguas subterráneas, o por efecto de disolución en las aguas.

Los mecanismos significativos de liberación y transporte para los relaves mineros en Andacollo son la resuspensión de partículas de suelos y relaves por efecto del viento.

### **8.2.3 Mecanismos de destino ambiental**

Mecanismos de destino ambiental incluyen transformaciones físico-químicas del contaminante en el medio ambiental. Todos estos mecanismos llevan a cambios en la concentración y/o la naturaleza del contaminante en estudio.

**Atenuación:** consiste en la degradación química en presencia de otras sustancias químicas, microorganismos, o plantas. En el caso presente, el problema de



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

contaminación por arenas de relaves está limitado a la presencia de metales, de los cuales no hay evidencia de atenuación. El caso del arsénico es un ejemplo que vale la pena mencionar: la mayoría de los compuestos orgánicos de arsénico (tales como metilos y dimetilos) son menos tóxicos que las formas inorgánicas (sin embargo en altas dosis pueden producir toxicidad). Un proceso de atenuación para el arsénico sería la conversión de arsénico inorgánico a arsénico orgánico. Es posible que esto pueda ocurrir en arsénico ingerido por peces en un estero. Sin embargo es poco probable que en las arenas de relave secas esta atenuación pueda ocurrir en cantidad significativa.

**Activación:** el contaminante sufre cambios químicos que aumentan la toxicidad. Un ejemplo sería el caso de la activación del cromo III que no es considerado un cancerígeno, a cromo VI, que sí es considerado cancerígeno. Para que ello ocurra, es necesario la presencia de un oxidante fuerte y las condiciones físico-químicas apropiadas (alta acidez en suelos y/o aguas), y por estas razones se consideró que la activación de cromo III no es probable en las circunstancias presentes.

**Partición** del contaminante entre medios ambientales o entre compartimentos dentro de la matriz. P.ej: los pesticidas se adhieren a partículas de materia orgánica en el suelo en vez de viajar en el agua como sustancia soluble. Las tortas de relaves constituyen una matriz ambiental con bajísimo contenido de humedad y por lo tanto los problemas de partición muy probablemente no existen.

**Bioacumulación** en biota y la cadena alimenticia. Este proceso puede ocurrir en alguna magnitud en plantas que están expuestas a los metales presentes en las



arenas de las tortas. Presencia de vegetación en las tortas de relave en Andacollo es mínima.

### 8.3. Punto de Contacto entre contaminante y receptor

El **punto de contacto** (a veces denominado punto de exposición) es un elemento crítico en la caracterización de la exposición. La exposición puede ocurrir cuando en el punto de contacto concurren simultáneamente el contaminante *en una concentración cuantificable*, en una matriz ambiental identificable (aire, agua, suelo, ó un alimento), y un receptor humano. Además debe haber una probabilidad cierta de ocurrencia temporal y espacial de los eventos.

Un punto de contacto entre una persona y los contaminantes es el lugar geográfico ó la situación durante el cual se establece un contacto físico directo entre el receptor y el contaminante. Ejemplos de punto de contacto es la localidad donde una persona respira aire contaminado, ó el lugar donde ingirió agua contaminada, ó donde ingirió un producto alimenticio contaminado.

Una vez que ocurre el contacto del contaminante con el receptor, la *exposición* sólo ocurre cuando el contaminante ingresa por una ruta de exposición y es absorbido a través de una membrana de intercambio y pasa a ser una *dosis interna* en el organismo. El punto de contacto es el último paso de una vía de exposición, y si no hay un contacto físico entre receptor y contaminante, entonces la exposición y por ende, un riesgo extra no puede existir.



Los puntos de exposición posibles identificados para la situación presente se describen a continuación en Tabla N° 8.1.

Tabla N° 8.1: Puntos de contacto hipotéticos identificados para receptores humanos

| Punto de exposición                                     | Posible ruta de exposición |
|---|----------------------------|
| Partículas de relave resuspendidos en el aire ambiental | inhalación                 |
| Elementos volátiles (fase de vapor) en el aire          | inhalación                 |
| Contacto directo con el relave                          | ingestión, dérmica         |

#### 8.4. Escenario de exposición

En el presente estudio se identificaron cinco escenarios hipotéticos relacionados con los receptores de interés. Estos escenarios son:

**Exposición de un residente del área:** En este escenario hipotético, se pretende tener una “línea base” de exposición y riesgo para residentes locales que no participan de actividades mineras ni trabajan en trapiches, pero que respiran aire contaminado por partículas de suelo en suspensión. En este escenario se supone una exposición de 350 días por año y supone que los residentes no usan equipos de protección personal (respiradores, guantes, botas). La exposición además





incluye el contacto directo de la piel (brazos, manos, piernas, y pies) con las arenas de relave.

**Exposición de niños de 1 a 6 años residentes aledaños a los relaves:** En este escenario se supone que los niños viven en hogares cercanos a los relaves, tal igual que el caso de adultos se asume una exposición 350 días por año y supone que los residentes no usan equipos de protección personal (respiradores, guantes, botas). La exposición además incluye el contacto directo de la piel (brazos, manos, piernas, y pies) con las arenas de relave.

#### **8.5. Concentración representativa de contaminante en la matriz ambiental**

Una vez que ocurre el contacto, el contaminante puede ingresar al organismo por una ruta de exposición y es absorbido a través de una membrana de intercambio. La exposición ocurre sólo cuando el contaminante ha sido absorbido y pasa a ser una dosis interna en el organismo.

Un problema fundamental en análisis de riesgo es estimar la concentración representativa de cada contaminante en cada matriz ambiental para cada punto de exposición. La determinación de la concentración de contaminante en el punto de exposición se puede llevar a cabo mediante toma de muestras y análisis químico en los puntos de contacto hipotéticos, ó mediante modelos matemáticos que describen el movimiento de los contaminantes en el medio ambiente. Ambas metodologías fueron consideradas para uso en la situación presente. Las ventajas y desventajas de cada una se pueden resumir como sigue:



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

**Mediante muestreo y análisis químico:** Esta metodología está indicada para situaciones presentes ó de un pasado ó un futuro cercano, ya que los contaminantes pueden sufrir cambios de concentración debido a la migración ambiental. Es una metodología muy cara y consume recursos (tiempo, personal, instrumentación, equipo, etc.). El muestreo y análisis químico además presenta múltiples requerimientos y problemas relacionados con la calidad de la evidencia proveniente de la matriz ambiental, lo cual a menudo dificulta el procedimiento. Ejemplo de estos problemas incluyen la volatilidad de los contaminantes, la posible degradación ó reactividad de los contaminantes, el tiempo entre la toma de la muestra y el análisis.

**Mediante modelos matemáticos:** Metodología indicada para situaciones pasadas ó en un futuro, permite hacer predicciones. Se recomienda cuando el análisis no es práctico ó es demasiado caro. Por ser de costo menor y flexible, el modelo puede repetirse según sea necesario. Sin embargo los modelos deben estar validados y ser específicos para la situación, y a menudo se corre el riesgo de usar un modelo inapropiado. El usuario debe conocer las suposiciones y limitaciones del modelo. Los resultados de la modelación están afectados por incertidumbre asociada con inexactitudes del modelo matemático. Información acerca de presencia actual de contaminantes también puede ser usada para modelar migración futura ambiental.

En lugar de estimar la concentración en el punto de exposición, a veces es posible usar biomarcadores de exposición, es decir, determinar la concentración del contaminante(s) en sangre, tejidos grasos ó hígado, hueso, aire expirado, orina, ó



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

leche materna, o biomarcadores de efectos, tales como cambios en la actividad enzimática, cambios en los niveles de metabolitos intermediarios, etc.

En el caso presente, se prefirió usar la evidencia proporcionada por el muestreo y análisis ambiental y no usar modelos matemáticos de migración ambiental. Tampoco se eligió usar biomarcadores de exposición, ya que son procedimientos invasivos al organismo, y son en general muy caros.

Para la concentración representativa del contaminante en el punto de exposición se siguió la recomendación de la U.S.EPA de usar valores del 95% del Nivel Superior de Confidencia del Promedio.

#### **8.6. Receptores humanos**

Para el caso estudio de Andacollo se considerador como receptores humanos de preocupación aquellos que presentan mayor susceptibilidad, mayor exposición, ó que presentan alguna característica que los hacen más vulnerable a la exposición de los contaminantes bajo estudio. En el caso de Andacollo, se identificaron los siguientes receptores de interés:

- Niños (de 1 a 6 años de edad)
- Adultos (mayores de 18 años y hasta 30 años de edad)



### **8.7. Probabilidad temporal y espacial de ocurrencia de la exposición**

Conceptualmente se refiere al grado de certeza respecto a la probabilidad de que exista un contacto físico entre contaminante y un receptor humano, dado que ésta situación depende de factores tales como la migración ambiental, de la incertidumbre en la identificación del lugar preciso del contacto, y de la incertidumbre temporal de la simultaneidad de la presencia de todos los componentes en el punto de exposición.

A fin de controlar la incertidumbre asociada con modelos y extrapolaciones espaciales, se decidió hacer uso de evidencia directa de contaminación, es decir, la exposición se estimó haciendo uso de resultados de análisis de matrices ambientales contaminadas.

### **8.8. Desarrollo del Modelo Conceptual del Problema de Contaminación**

La información acerca de fuentes de contaminantes, mecanismos de liberación, transporte y migración ambiental, medio ambiente contaminado, destino físico-químico del contaminante, y punto de exposición con diversos receptores hipotéticos, se integran en un modelo conceptual del problema de contaminación (MCPC). Este se muestra en un diagrama más abajo.

En el modelo MCPC se indican la fuente primaria y fuentes secundarias del problema de contaminación, como también los mecanismos de descarga (ó liberación) de cada fuente. El MCPC muestra el curso que siguen los contaminantes en el medio ambiente, y cómo llegan hasta el punto de exposición. En éste punto y

mediante una ruta de exposición relevante (oral, dérmica, respiración), y dadas las condiciones de la exposición (duración, magnitud, biodisponibilidad, absorción), los contaminantes ingresan al organismo.

El modelo MCPC no es *estático*, y puede ser modificado de acuerdo a la evidencia que se hace disponible para que represente fidedignamente las condiciones actuales del problema de contaminación. En el diagrama se indican los receptores hipotéticos, como también las rutas de exposición afectadas. Cada abreviación “V#” indica el algoritmo respectivo para estimar la dosis por la vía de exposición específica que se explica en Sección 4.14.

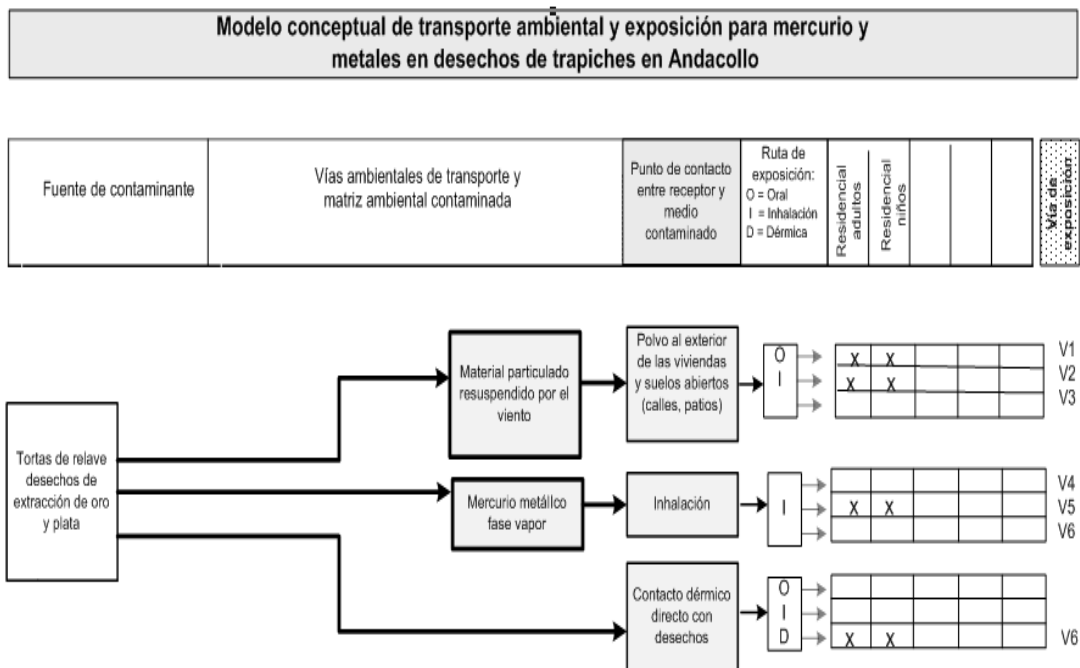


Figura N° 8.1. Modelo Conceptual del Problema de Contaminación

### 8.9. Vías de exposición

Una vía de exposición es el *camino ambiental* recorrido por un contaminante desde una fuente ambiental hasta el punto donde hace *contacto físico* con un receptor humano. Una vez que ocurre el contacto, la exposición ocurre sólo cuando el contaminante ingresa por una ruta de exposición y es absorbido a través de una membrana de intercambio. La exposición ocurre sólo cuando el contaminante ha sido absorbido y pasa a ser una dosis interna en el organismo.

Una vía de exposición está constituida por varios *componentes* unidos por *procesos*, y la forma como se integran se muestra en la Figura N° 8.2. Los componentes son: (a) la fuente de contaminante, (b) la concentración de contaminante en la matriz ambiental y en el punto de exposición, y (c) el punto de exposición del receptor humano con el contaminante. Los procesos son: (a) la liberación ambiental y el destino ambiental, y (b) la probabilidad temporal y espacial, y (c) la absorción específica e ingreso al organismo por ruta de exposición. Las secciones siguientes describen los componentes y procesos.

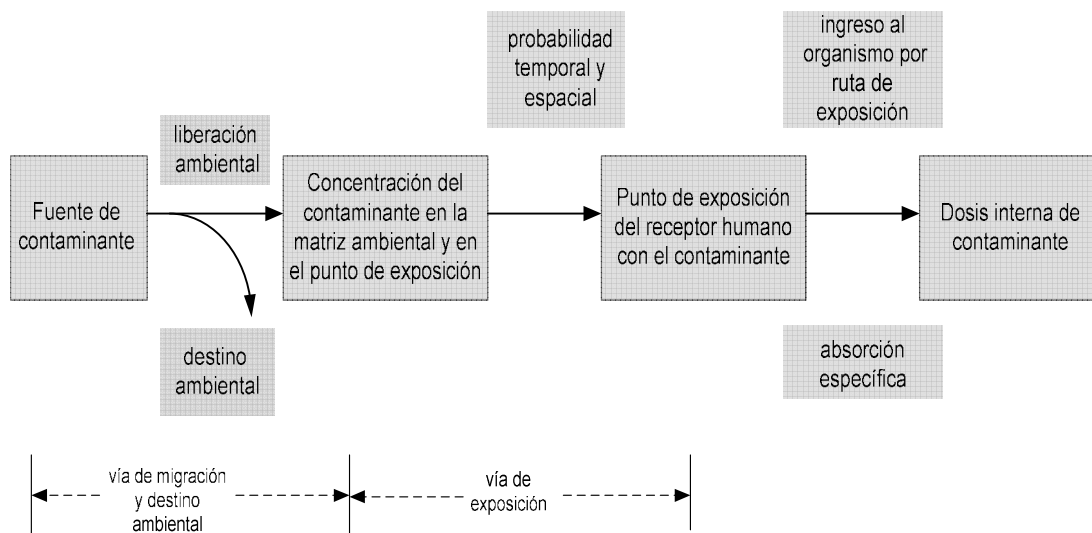


Figura N° 8.2: Componentes y procesos de una vía de exposición



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

Las vías de exposición hipotéticas y posibles identificadas en el presente estudio son las siguientes, en las cuales la *fuentes* corresponde a una torta de relave:

Fuente —————> receptor

Fuente → migración ambiental —————> receptor

Vías de exposición directas son la inhalación de partículas de relaves resuspendidas con el viento, contacto dérmico directo con los relaves, y la ingestión accidental de polvos de los relaves. Otras vías tales como la ingestión de agua de pozo fue desechada, ya que la comunidad de Andacollo recibe agua de consumo municipal. Tampoco se consideró la vía del consumo de productos agrícolas cultivados en casa (ej., tomates, frutas), como tampoco el consumo de productos animales (ej., leche, huevos, carnes, queso).

Es importante determinar si cada vía de exposición ha ocurrido en el pasado, está ocurriendo en el presente, ó si se espera ocurrirá en el futuro. Es posible que uno o más elementos de una vía de exposición no existan, o no se logren identificar en el problema de contaminación. Por ejemplo, es posible que la migración de aguas subterráneas contaminadas aun no llega a un lugar considerado como punto de contacto. O el consumo de frutas y verduras (contaminadas) que son solo estacionales y por lo tanto la exposición no es posible parte del año. Para ciertos contaminantes tales como el plomo, puede no quedar en claro si una presencia



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

potencial de plomo en agua potable municipal, puede provenir de las cañerías del hogar, del sistema de distribución, ó del agua del pozo.

Las vías de exposición pueden ser completa, potencial o incompleta, dependiendo del tipo de evidencia disponible para su apoyo.

**Vía completa de exposición:** Una vía de exposición se considera completa y el receptor se considera expuesto, si hay evidencia de que todos los elementos de la vía de exposición existen, han existido, ó van a existir (en un tiempo cercano), todos los elementos de la vía de exposición están *conectados*, los contaminantes están presentes en el medio ambiental de contacto, y los contaminantes están presentes en el punto de exposición.

Todas las vías de exposición completas deben ser incluidas en una estimación de riesgo. En el estudio presente, existe evidencia para considerar que la inhalación de partículas resuspendidas por el viento, contacto dérmico directo con arenas de relave, e ingestión accidental de arenas de relave, son vías de exposición completas.

**Vía de exposición potencial:** (incompleta pero probable). El receptor puede ser considerado como expuesto en el pasado ó en el futuro, si existe evidencia de que uno o más elementos de la vía de exposición no están presentes, *pero éstos*





INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

*pueden estar ocurriendo, han ocurrido en el pasado pero no han sido identificados, ó puede que existan en un futuro cercano.* La contaminación puede existir en el presente en un medio ambiental y en una localidad que es probable que llegue a ser un punto de exposición dentro de un tiempo de migración discreto. Por ejemplo, es probable que ciertos metales lixivien hacia aguas profundas como resultado de precipitación de lluvia durante el período de lluvias. En el presente no hay evidencia de ello, más aun, considerando que las tortas de desecho han permanecido en el mismo lugar por varios cientos de años.

Las vías de exposición potencial son analizadas separadamente, y la contribución relativa a la exposición total sea estimada. En el estudio presente, ninguna vía de exposición fue considerada potencial.

**Vía de exposición incompleta e improbable:** Esta existe y el receptor puede ser considerado libre de exposición, si hay evidencia robusta que faltan uno o más elementos de la vía de exposición, no existen, ó no van a existir, y cuando uno o ó más elementos de la vía de exposición no están conectados. Las vías de exposición incompletas no fueron consideradas en el presente estudio.

#### **8.10. Rutas de exposición**

Rutas de exposición son los puntos de ingreso al interior del organismo, y están asociados principalmente con tres funciones corpóreas. Las rutas típicas de exposición (entrada al organismo) son:



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

---

**Por la vía respiratoria:** el tracto respiratorio (nariz, boca, pulmones) la sustancia penetra la membrana que recubre los bronquios, entrando a la sangre. En el caso presente, por la vía respiratoria pueden ingresar compuestos volátiles, y material particulado y aerosoles en suspensión en el aire.

**Por la vía oral:** la sustancia atraviesa la pared gastrointestinal (boca, esófago, estómago, é intestinos) desde el lumen al sistema porta. Mientras la sustancia se encuentre en el lumen del tracto gastrointestinal sin ser absorbido, no hay exposición. Por la vía oral pueden ingresar suelo inadvertida o accidentalmente ingeridos, aguas de bebida, agua ingerida durante actividades recreativas en el estero, ingestión de agua de pozo, ingestión accidental de suelos agrícolas, y la ingestión de pescado.

**Por la piel:** la superficie externa del organismo ocurre cuando la sustancia penetra la piel e ingresa a la circulación. En el caso presente, la piel se estima afectada por contacto con aguas del estero, lodos, aguas de pozo, suelos agrícolas, y sedimentos del estero.



### 8.11. Algoritmos para estimar dosis de exposición

Consiste en estimar la cantidad de contaminante presente en la matriz ambiental que puede ingresar al interior del organismo. Los factores que determinan la dosis son los siguientes:

**DOSIS<sub>C,V</sub>** = Una estimación de la cantidad promedio del contaminante  $c$  que entra al organismo desde la vía de exposición  $v$  durante la exposición, expresado en unidades [mg<sub>C</sub>/kg<sub>PC</sub>·día]

**C<sub>C</sub>** = Concentración de contaminante  $c$  en el medio ambiental en contacto con el organismo (p.ej., aire, agua, suelo) para la ruta específica de exposición;

**FEH** = Factor de Exposición Humana se refiere a valores biológicos propios del receptor humano que están relacionados con la exposición (p.ej., aire respirado, agua ingerida, área dérmica)

**FA** = Factores de ajuste tales como factor de absorción, biodisponibilidad, fracción contaminada, etc.

**Abs** = La absorción de un contaminante es una propiedad bioquímica intrínseca de la sustancia, y depende además de cómo está ligada a la matriz ambiental (suelo, lodo, producto alimenticio, etc.) y de la disponibilidad del contaminante desde la matriz ambiental, y por lo tanto la cantidad de contaminante que está disponible para la absorción es un valor específico.

**FE** = Frecuencia de exposición (días/año)

**DE** = Duración de la exposición (años)



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

**PC** = Peso corpóreo, usado para referir la exposición en unidades de peso corporal;

**PT** = Ponderación temporal. Dependencia temporal de las variables, es el tiempo sobre el cual se promedia la dosis, y se usa para expresar la dosis como una dosis promedio diaria en días:

Para contaminantes cancerígenos:  $PTc = [70 \text{ años}] \times [365 \text{ días/año}] = 25.550 \text{ días}$

Para contaminantes crónicos:  $PTnc = [DE, \text{ años}] \times [365 \text{ días/año}]$

Según se trate de un contaminante cancerígeno ó un contaminante crónico nó cancerígeno, las dosis de contaminante se definen separadamente como:

Dosis de un contaminante cancerígeno = Dosis Diaria Promedio de por Vida = DDPV

La DDPV se calcula usando un promedio  $PTc$ .

Dosis de un contaminante nó cancerígeno = Dosis Diaria Promedio Anual = DDPA

La DDPA se calcula usando un promedio  $PTnc$

En las secciones siguientes se describen los algoritmos usados para estimar las dosis por las vías de exposición identificadas en el presente problema de contaminación.



### 8.11.1. Dosis de contaminante por inhalación de mercurio volátil

$$D1_c = C_c \cdot \left( \frac{1}{VF} \right) \frac{TE_e \cdot FE_e \cdot DE_e}{TE_t \cdot FE_t \cdot DE_t}$$

Donde:

$D1_c$  = Estimación de la cantidad promedio de contaminante  $c$  presente en el aire de respiración que ingresa al organismo por la vía respiratoria, expresada en ( $mg_c/kg_{PC} \cdot día$ )

$C_c$  = Concentración de contaminante  $c$  en las arenas de relave, ( $mg/kg$ )

$VF$  = Factor de volatilización,  $m^3/kg$

$TE_e$  = Tiempo efectivo de exposición, ( $horas/día$ )

$FE_e$  = Frecuencia efectiva de exposición ( $días/año$ )

$DE_e$  = Duración efectiva de la exposición ( $años$ )

$TE_t$  = Tiempo total en que ocurre la exposición, ( $horas/día$ )

$FE_t$  = Frecuencia en que ocurre la exposición ( $días/año$ )

$DE_t$  = Duración en que ocurre la exposición ( $años$ )



### 8.11.2. Dosis de contaminante presente en partículas de polvo resuspendidas en aire de respiración

$$D2_c = C_c \cdot \left( \frac{1}{PEF} \right) \frac{TEe \cdot FEe \cdot DEe}{TEt \cdot FEt \cdot DEt}$$

Donde:

$D2_c$  = Estimación de la cantidad promedio de contaminante  $c$  presente en el aire de respiración que ingresa al organismo por la vía respiratoria, expresada en ( $mg_c/kg_{PC} \cdot día$ )

$C_c$  = Concentración de contaminante  $c$  en las arenas de relave, ( $mg/kg$ )

PEF = Factor de emisión de partículas,  $m^3/kg$

TEe = Tiempo efectivo de exposición, ( $horas/día$ )

FEe = Frecuencia efectiva de exposición ( $días/año$ )

DEe = Duración efectivade la exposición ( $años$ )

TEt = Tiempo total en que ocurre la exposición, ( $horas/día$ )

FEt = Frecuencia en que ocurre la exposición ( $días/año$ )

DEt = Duración en que ocurre la exposición ( $años$ )



### 8.11.3. Dosis de contaminante por contacto directo del relave con la piel

$$D3_C = C_C \cdot SDT \cdot SDE \cdot FAD \cdot AbsD \cdot 1E-3 \cdot \frac{FE \cdot DE}{PC \cdot PT}$$

Donde:

$D7_C$  = Estimación de la cantidad promedio de contaminante  $\underline{c}$  que ingresa al organismo por la piel, expresada en ( $mg_C/kg_{PC} \cdot día$ )

$C_C$  = Concentración de contaminante  $\underline{c}$  en el suelo en contacto con la piel ( $mg_C/kg_S$ )

$SDT$  = Superficie dérmica total , ( $cm^2$  piel para el receptor)

$SDE$  = Fracción de superficie dérmica expuesta (%)

$FAD$  = Factor de adherencia del suelo a la piel, ( $mg_S/cm^2$  piel)

$Abs$  = Fracción de contaminante biodisponible que es absorbido por la piel, (%)

$FE$  = Frecuencia de exposición (días/año)

$DE$  = Duración de la exposición (años)

$PC$  =Peso corpóreo, usado para referir la exposición en unidades de peso corporal;

$PT$  = Ponderación temporal. Dependencia temporal de las variables, es el tiempo sobre el cual se promedia la dosis, y se usa para expresar la dosis como una dosis promedio diaria en días:



para contaminantes cancerígenos:  $PTc = [70 \text{ años}] \times [365 \text{ días/año}] = 25.550$   
días

para contaminantes crónicos:  $PTnc = [DE, \text{ años}] \times [365 \text{ días/año}]$

#### 8.11.4. Dosis de contaminante presente en suelo ingerido involuntariamente

$$D4_c = C_c \cdot IIS \cdot FCkm \cdot ABS_o \frac{FE \cdot DE}{PC \cdot PT}$$

Donde:

$D4_c$  = Estimación de la cantidad promedio de contaminante  $c$  presente en polvos ó suelos, que ingresa al organismo por la vía oral, expresada en ( $mg_c/kg_{PC} \cdot día$ )

$C_c$  = Concentración de contaminante  $c$  en la fase sólida (polvo ó suelo), ( $mg_c/kg_s$ )

IIS = Cantidad de suelo involuntariamente consumida por día ( $mg_s/día$ )

AbsO = Absorción del contaminante en el tracto gastrointestinal (%)

FCkm = Factor de conversión kg a mg =  $1E-06$  kg/mg

FE = Frecuencia de exposición (días/año)

DE = Duración de la exposición (años)





INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

PC =Peso corpóreo, usado para referir la exposición en unidades de peso corporal;

PT = Ponderación temporal. Dependencia temporal de las variables, es el tiempo sobre el cual se promedia la dosis, y se usa para expresar la dosis como una dosis promedio diaria en días:

para contaminantes cancerígenos:  $PT = [70 \text{ años}] \times [365 \text{ días/año}] = 25.550 \text{ días}$

para contaminantes crónicos:  $PT = [DE, \text{ años}] \times [365 \text{ días/año}]$

#### 8.12. Selección de los Factores de Exposición Humana (FEHs)

Factores de exposición humana son variables que describen características biológicas y fisiológicas del receptor humano y que están relacionadas con el ingreso de sustancias químicas al organismo. P.ej., volumen de aire inspirado por hora ó por día, agua ingerida por día, tasa diaria de alimento ingerido, superficie dérmica de cada parte del cuerpo, absorción dérmica por día, peso corpóreo. Existe amplia información respecto a los valores máximos, mínimos, mediana, y variables que definen los factores de exposición.

La información necesaria para conducir análisis de exposición aparece en el documento titulado *Exposure Factors Handbook*, en tres volúmenes, *Volume 1: General Factors*, *Volume II: Food Ingestion Factors*, y *Volume III: Activity Factors*, publicada originalmente por U.S.EPA (1988) y revisada en 2009.



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

La duración, frecuencia, y largo del contacto se refieren al tiempo durante el cual la sustancia está en contacto con el límite exterior del organismo. Para sustancias que ingresan al organismo por la vía respiratoria y dérmica, se supone que la penetración (*exposición*) es inmediata y por lo tanto el tiempo de contacto es igual a la duración de la exposición. Típicamente la exposición se expresa en horas/día.

El valor numérico de los factores de exposición FEH, los factores temporales TFDE, y el peso corpóreo dependen de las circunstancias que ocurren durante la exposición. P.ej., si la exposición se trata de niños en un colegio, entonces los volúmenes de respiración por hora, superficie dérmica expuesta, e ingestión de agua son valores específicos para una determinada edad de niños (ambos sexos).

La absorción del contaminante depende de la liberación previa del contaminante desde la matriz ambiental. Por lo tanto la absorción neta de contaminante depende de la matriz y de la naturaleza del contaminante, y por lo tanto es un valor específico.

Para los cálculos de la exposición en la Comuna de Andacollo, fueron empleados los valores mostrados en la Tabla N° 8.2, los cuales buscan reflejar la hipótesis planteada respecto de la realidad a la cual se ven enfrentados los receptores hipotéticos en cuestión (niños y adultos) residentes de las zonas.



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

Tabla N° 8.2: Factores de exposición asociados con los escenarios de exposición empleados en la comuna de Andacollo

| Factor de exposición  | Niños (1-6 años) | Adultos (>18 años) |
|---|------------------|--------------------|
| <b>TEe</b> , horas/día  | 24               | 24                 |
| <b>TEt</b> , horas/día  | 24               | 24                 |
| <b>FEe</b> , días/año   | 350              | 350                |
| <b>FEt</b> , días/año   | 365              | 365                |
| <b>DEe</b> , años   | 6                | 24                 |
| <b>DEt</b> , años   | 6                | 30                 |
| <b>PC</b> , peso corporal, kg <sub>PC</sub>                               | 17               | 70                 |
| <b>IP</b> , mg/día  | 200              | 100                |
| <b>SDT</b> , superficie dérmica mediana total, cm <sup>2</sup> piel total | 7300             | 19.400             |
| <b>SDE</b> , fracción de la piel expuesta (%)                             | 30               | 30                 |
| <b>FAD</b> , factor adherencia dérmica, mg/cm <sup>2</sup> .día           | 1                | 1                  |
| <b>IDA</b> , ingesta diaria de agua, L/día                                | 1                | 2                  |

Los Factores de Exposición empleados para el cálculo de exposición en la comuna de Andacollo, se caracterizan por ser conservadores, de manera que pueden reflejar el peor de los escenarios de exposición para los receptores hipotéticos.

### 8.13. Estimación de la dosis de contaminante

Una vez que la información necesaria está completa y ha sido verificada, se procede al cálculo de las dosis, información que es utilizada en la estimación del riesgo.

En la Tabla N° 8.3, se muestran los factores específicos para cada uno de los contaminantes empleados en el cálculo de dosis de exposición.

Tabla N° 8.3. Factores empleados para cálculo de la dosis de exposición.

| Elemento        | VF       | PEF      | ABS <sub>dermal</sub> | ABS <sub>oral</sub> |
|-----------------|----------|----------|-----------------------|---------------------|
| Arsénico        | -        | 1,36E+09 | 0,03                  | 1                   |
| Cadmio          | -        | 1,36E+09 | 0,025                 | 0,05                |
| Cobre           | -        | 1,36E+09 | 0,001                 | 1                   |
| Cromo VI        | -        | 1,36E+09 | 0,025                 | 0,025               |
| Cromo III       | -        | 1,36E+09 | 0,013                 | 0,013               |
| Hierro          | -        | 1,36E+09 | 0,001                 | 1                   |
| Manganeso       | -        | 1,36E+09 | 0,001                 | 0,04                |
| Mercurio elem.  | 3,24E+04 | 1,36E+09 | 0,001                 | 0,01                |
| Mercurio inorg. | -        | 1,36E+09 | 0,01                  | 0,07                |
| Plomo           | -        | 1,36E+09 | -                     | -                   |
| Zinc            | -        | 1,36E+09 | 0,001                 | 1                   |

Fuente: USEPA 2011. Regional Screening Levels, Resident Soil Table, June 2011.



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

---

Donde:

**VF** ( $\text{m}^3/\text{Kg}$ ): Factor de volatilización

**PEF** ( $\text{m}^3/\text{Kg}$ ): Factor de emisión de partículas

**ABS<sub>dermal</sub>**: Fracción del contaminante absorbida por la piel desde un sólido (adimensional)

**ABS<sub>oral</sub>**: Fracción del contaminante absorbida por el tracto gastrointestinal (adimensional).



## CAPITULO IX: CARACTERIZACIÓN DE LA TOXICIDAD

Toxicidad es la habilidad intrínseca de todas las sustancias químicas de producir un efecto biológico dañino ó indeseable, y depende principalmente de las propiedades químicas, físicas, y de los mecanismos de acción de la sustancia química.

Este componente también se conoce como la *caracterización de la dosis-respuesta*. En esta etapa se identifica la toxicidad del contaminante ó de los contaminantes a los cuales la persona está o puede estar expuesta. Esta fase consiste en la identificación y selección de las fuentes de información, identificación del perfil toxicológico relevante a la situación en estudio, y la identificación de los criterios de toxicidad de cada contaminante de riesgo potencial.

### 9.1 Fuentes de información

Dos fuentes de información oficial son las siguientes:

- U.S.EPA **IRIS (Integrated Risk Information System)** es la fuente de información acerca de criterios de toxicidad, es decir, dosis de referencia, concentración de referencia, factores de potencia cancerígena, y unidades de riesgo, para todos los contaminantes de los cuales existe información oficial desarrollada por la USEPA. La información en IRIS se renueva regularmente, y se accede en URL: <http://www.epa.gov/iris/>



- U.S. Environmental Protection Agency (1997). *Health Effects Assessment Summary Tables (HEAST). FY-1997 Update*. Office of Solid Waste and Emergency Response. EPA-540-R-97-036. La base HEAST es una lista que contiene información acerca de evidencia de toxicidad, dosis, rutas, especies, efecto crítico, referencia, y criterio de toxicidad para contaminantes peligrosos. La base se renueva mensualmente.

## 9.2. Perfil toxicológico de los contaminantes de riesgo potencial

Para estimar exposición y riesgo, es necesario recolectar información completa acerca de la toxicidad cualitativa y cuantitativa para cada contaminante en estudio, incluyendo la identificación del largo de la exposición. El toxicólogo debe establecer la relevancia de la información de la literatura y la información obtenida del problema de contaminación.

### 9.2.1. Arsénico

Numerosos estudios han demostrado que el arsénico inorgánico puede aumentar el riesgo de cáncer del pulmón, la piel, la vejiga, el hígado, el riñón y la próstata. WHO, DHHS y la EPA han determinado que el arsénico inorgánico es carcinógeno en seres humanos.



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

El efecto más característico de la exposición oral prolongada a arsénico inorgánico es un cuadro de alteraciones de la piel tales como la hiperpigmentación y keratosis. Estas incluyen un oscurecimiento de la piel y la aparición de pequeños callos o verrugas en la palma de las manos, la planta de los pies y el torso, a menudo asociados con alteraciones en los vasos sanguíneos de la piel. Un número pequeño de callos puede a la larga transformarse en cáncer de la piel. La exposición más prolongada a niveles más bajos puede producir efectos de la piel y también desórdenes circulatorios y de los nervios periféricos. Si la piel entra en contacto directo con compuestos inorgánicos de arsénico, la piel puede sufrir irritación, enrojecimiento e hinchazón

La EPA ha establecido límites para la cantidad de arsénico liberado al medio ambiente por fuentes industriales y ha restringido o ha cancelado muchos usos de arsénico en pesticidas. La EPA ha establecido un límite de 0.05 partes por millón (ppm) para arsénico en agua potable. La norma de la EPA de 0.01 ppm para arsénico en agua potable listada en el Tox FAQ para Arsénico de ATSDR de Febrero del 2001 fue basada en el reglamento final de la EPA para arsénico en agua potable publicado el 22 de Enero del 2001 en el Federal Register. Sin embargo, la EPA está actualmente revisando el aspecto científico y el costo monetario relacionados con este reglamento y, en el entretanto, ha vuelto a la norma previa para arsénico. Por lo tanto, la norma actual de la EPA para arsénico en agua potable sigue siendo 0.05 ppm (50 ppb). OSHA ha establecido límites de 10 µg de arsénico por metro cúbico de aire en el trabajo (10 µg/m<sup>3</sup>) durante jornadas de 8 horas diarias, 40 horas a la semana.





INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

Exposición crónica al arsénico, un reconocido cancerígeno en humanos, está asociada a un aumento en los riesgos de enfermedad cardiovascular, y carcinoma (cáncer) de la piel, vejiga, pulmonar, renal, y neurológico. Exposición en niños también aumenta el riesgo de déficit intelectual y desórdenes respiratorios.

Los niveles de arsénico en sangre no son buenos indicadores exactos de exposición, ya que el arsénico se elimina de la sangre dentro de pocas horas de la exposición (la vida media es de aproximadamente 3 días), y además porque el arsénico está presente como arsenobetaina proveniente del consumo de pescados y mariscos y aunque no es tóxico, aparece en la sangre. Por lo tanto valores de arsénico sanguíneo reflejan exposición en el pasado reciente. Valores típicos en individuos no expuestos son inferiores a 1-2  $\mu\text{g/L}$ . Niveles agudamente tóxicos y fatales están en los  $\geq 1.000 \mu\text{g/L}$ .

**Clasificación cancerígena:** US-EPA establece que el arsénico inorgánico es carcinogénico en seres humanos, con Peso de Evidencia Clase A (es un reconocido cancerígeno humano), con FPC oral 1.5 (mg/kg·día)<sup>-1</sup>, FUR inh =  $4.3 \times 10^{-3}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )<sup>-1</sup> [10], la DRf oral es  $3,0\text{E}-04$  (mg/kg·día), y la CRf inh =  $1.0\text{E}-05$  mg/m<sup>3</sup>. El Riesgo Unitario oral =  $5 \times 10^{-5}$  para una exposición de por vida a agua conteniendo arsénico 1  $\mu\text{g/L}$ .



### 9.2.2. Cadmio

Respirar altos niveles de cadmio produce graves lesiones en los pulmones y puede producir la muerte. Ingerir alimentos o tomar agua con niveles de cadmio muy elevados produce seria irritación al estómago e induce vómitos y diarrea. El cadmio puede acumularse en los riñones a raíz de exposición por largo tiempo a bajos niveles de cadmio en el aire, los alimentos o el agua; esta acumulación puede producir enfermedades renales. Lesiones en los pulmones y fragilidad de los huesos son otros efectos posibles causados por exposición de larga duración. En animales a los que se les dio cadmio en la comida o en el agua se observaron aumento de la presión sanguínea, déficit de hierro en la sangre, enfermedades al hígado y lesiones en los nervios y el cerebro. No sabemos si estos efectos ocurren en seres humanos expuestos a cadmio a través de los alimentos o del agua. Contacto de la piel con cadmio no parece constituir un riesgo para la salud ya sea en animales o seres humanos.

En zonas aisladas y deshabitadas, las concentraciones de cadmio en el aire suelen ser inferiores a 1 ng/m<sup>3</sup>. En zonas que se suponen no contaminadas, la concentración mediana de cadmio en el suelo se encuentra entre 0,2 y 0,4 mg/kg. No obstante, a veces se encuentran valores mucho más altos, que pueden llegar hasta 160 mg/kg de suelo. Los factores ambientales influyen en la captación y, por ende, en los efectos tóxicos del cadmio en los organismos acuáticos. Al aumentar la temperatura aumentan la captación y los efectos tóxicos, mientras que el aumento de la salinidad o de la dureza del agua los hace disminuir. Los organismos de agua dulce sufren los efectos del cadmio en concentraciones inferiores a las que afectan a los organismos marinos. La materia orgánica contenida en el agua suele reducir la captación y los efectos tóxicos fijando el cadmio y reduciendo su disponibilidad



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

para los seres vivos. Sin embargo, hay pruebas de que cierto tipo de materia orgánica puede ejercer el efecto contrario.

El cadmio se acumula fácilmente en numerosos seres vivos, particularmente microorganismos y moluscos, en los que los factores de bioconcentración son del orden de varios millares. Los invertebrados del suelo también concentran este metal en grado considerable. La mayoría de los organismos presentan factores de concentración bajos o moderados (inferiores a 100). El cadmio está ligado a proteínas en numerosos tejidos. En organismos expuestos a este metal se han aislado proteínas fijadoras de metales pesados (metalotioneínas). La concentración de cadmio es más elevada en el riñón, las branquias y el hígado (o sus equivalentes). La eliminación se produce probablemente por vía renal, si bien los crustáceos pueden eliminar cantidades importantes con la muda del exoesqueleto. En las plantas, el cadmio se concentra principalmente en las raíces y, en menor medida, en las hojas. El cadmio tiene efectos tóxicos para muy diversos microorganismos. No obstante, la presencia de sedimentos y las concentraciones elevadas de sales disueltas o materia orgánica reducen esos efectos. Los procesos más afectados son el crecimiento y la replicación. Los organismos del suelo más vulnerables son los hongos: algunas especies desaparecen tras la exposición al cadmio en el suelo. Tras exposiciones reducidas al metal en el suelo, se observa una selección a favor de las cepas resistentes.

El cadmio afecta al crecimiento de las plantas en estudios experimentales, pero sobre el terreno no se ha observado efecto alguno. El metal es absorbido por las plantas con más rapidez a partir de soluciones de nutrientes que a partir del suelo;



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

los efectos se han observado sobre todo en estudios de cultivo en soluciones de nutrientes. En éstas se ha notificado que el cadmio influye en la apertura de los estomas, la transpiración y la fotosíntesis. Los invertebrados terrestres son relativamente insensibles a los efectos tóxicos del cadmio, probablemente debido a la existencia de mecanismos eficaces de captura y fijación en ciertos órganos. Los gasterópodos terrestres sufren efectos subletales; los principales procesos afectados son el consumo de alimentos y el letargo, pero sólo con dosis muy elevadas. El metal no produce efectos letales en las aves, ni siquiera con dosis elevadas, si bien se observan lesiones renales. En estudios de campo se ha comunicado que el cadmio induce cambios en la composición de especies en las poblaciones de microorganismos y ciertos invertebrados acuáticos. La descomposición del mantillo de hojas se ve notablemente reducida por la contaminación con metales pesados; se ha identificado al cadmio como el principal causante de este efecto.

La USEPA ha determinado que el cadmio potencialmente causa los siguientes efectos cuando la gente ha sufrido exposición a niveles por encima del MCL por períodos relativamente breves: náuseas, vómitos, diarrea, calambres musculares, salivación, cambios sensoriales, daño hepático, convulsiones, shock y falla renal. Los efectos de una exposición de largo plazo a niveles por sobre el MCL incluyen daño renal, hepático, huesos, y hematológico.

El cadmio puede producir daño renal, daño óseo, cardiovascular, hematológico, hepático, neurológico, y testicular. Estudios recientes muestran relación entre cadmio urinario y aumento de riesgo prediabético y diabético, hipertensión, función



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

pulmonar, y degeneración macular dependiente de la edad. Además, hay evidencia de una asociación cadmio-cáncer para los pulmones, páncreas, senos, endometrio, próstata, y vejiga urinaria. El FUR inh es  $1,8E-03$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )-1, la DRf oral es  $1,0E-03$  (mg/kg-día), y la CRf inh =  $1.0E-05$  mg/m<sup>3</sup>.

La USEPA ha desarrollado un estándar obligatorio llamado Nivel de Contaminación Máximo (MCL) a 5 ppb porque USEPA estima que dadas las presentes tecnologías y recursos, es el nivel más bajo que se puede razonablemente exigir a los sistemas de agua remover este contaminante si está presente en el agua potable.

La EPA no permite la presencia de cadmio en insecticidas. FDA restringe la cantidad de cadmio en colorantes para alimentos a 15 partes de cadmio por cada millón de partes de colorante (15 ppm). OSHA limita la cantidad de cadmio en el aire del trabajo a 100 microgramos por metro cúbico ( $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en la forma de vapores de cadmio y a  $200 \mu\text{g}$  de cadmio/m<sup>3</sup> para polvos de cadmio.

**Clasificación cancerígena:** La USEPA ha clasificado al cadmio como un peso de evidencia B1, es decir, es un probable cancerígeno humano basado en evidencia cancerígena limitada en humanos. El Riesgo Unitario cancerígeno por inhalación es  $1.8E-03$  1/( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). La dosis de referencia por exposición oral crónica en agua es RfD=  $5E-4$  mg/kg-día, y para cadmio en alimentos es  $1E-03$  mg/kg-día, basados en proteinuria significativa como efecto crítico.



### 9.2.3. Cobre

El cobre es esencial para mantener buena salud, pero altas dosis pueden ser dañinas. La exposición prolongada a polvo de cobre puede irritar la nariz, la boca y los ojos, y producir dolores de cabeza, mareo, náusea y diarrea. Tomar agua con niveles de cobre mayores que lo normal puede causar vómitos, diarrea, calambres estomacales y náusea. La ingestión de altos niveles de cobre puede producir daño al hígado y al riñón y puede aun causar la muerte. Intoxicación aguda (dosis elevadas): la ingestión de sulfato de cobre en altas cantidades (gramos) produce náuseas, vómitos, calambres estomacales, diarrea, sudoración, hemólisis intravascular y posible fallo renal; en raras ocasiones convulsiones, coma y muerte. La ingestión intencional de niveles altos de cobre puede producir daño del hígado y los riñones y puede causar la muerte. La ingestión de agua en contacto con recipientes de cobre puede producir irritación del tracto gastrointestinal. La inhalación de polvos, humos o nieblas de sales de Cu puede causar congestión nasal y de las mucosas y ulceración con perforación del tabique nasal. Los efectos tóxicos de una exposición a largo plazo (intoxicación crónica) sólo parecen existir en personas que padecen la enfermedad de Wilson (heredada genéticamente) manifestando en casos de intoxicación lesiones en hígado, riñones, sistema nervioso central, huesos y ojos. La exposición prolongada a polvos de cobre puede irritar la nariz, la boca, los ojos y causar dolores de cabeza, mareo, náusea y diarrea.

EPA ha determinado que el agua potable no debe contener más de 1.3 miligramos de cobre por litro de agua (1.3 mg/L). OSHA ha establecido un límite para vapores de cobre en el aire de 0.1 miligramos por metro cúbico (0.1 mg/m<sup>3</sup>) y 1 mg/m<sup>3</sup> para polvos de cobre y aerosoles de cobre soluble en el aire del trabajo durante una jornada de 8 horas diarias, 40 horas semanales. El Consejo para Alimentos y Nutrición del Instituto de Medicina de los EE.UU. recomienda cantidades diarias



(RDAs) de 340 microgramos (340 µg) de cobre para niños de 1-3 años, 440 µg/día para niños de 4-8 años, 700 µg/día para niños de 9-13 años, 890 µg/día para niños de 14-18 años y 900 µg/día para adultos.

**Clasificación cancerígena:** USEPA considera al cobre Clasificación D, es decir, no hay evidencia de que sea un cancerígeno para los humanos.

#### 9.2.4. Cromo

El cromo (III) es un elemento nutritivo esencial que ayuda al cuerpo a utilizar azúcar, proteínas y grasa. Respirar niveles altos de cromo (VI) puede causar irritación de la nariz, nariz que moquea, hemorragias nasales, y úlceras y perforaciones en el tabique nasal. Ingerir grandes cantidades de cromo (VI) puede producir malestar estomacal y úlceras, convulsiones, daño del hígado y el riñón, y puede aun causar la muerte. Contacto de la piel con ciertos compuestos de cromo (VI) puede causar ulceración de la piel. Cierta gente es extremadamente sensible al cromo (VI) o al cromo (III). Se han descrito reacciones alérgicas consistentes en enrojecimiento e hinchazón grave de la piel.

Exposición de corto plazo: la USEPA ha encontrado que el Cr puede producir irritación de la piel o ulceración después de una exposición por encima del MCL por períodos de tiempo relativamente cortos.

Exposición de Cr a largo plazo a niveles por sobre el MCL tiene el potencial de causar daño hepático, renal, circulatorio, terminaciones nerviosas, e irritación de la piel.



Universidad de Chile

INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

Respirar altos niveles (mayores que  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de cromo (VI) en forma de ácido crómico o trióxido de cromo (VI), puede producir irritación de la nariz, estornudos, comezón, hemorragias nasales, úlceras, y perforaciones en el tabique nasal. Estos efectos han ocurrido principalmente en trabajadores que manufacturan o usan cromo (VI) durante meses o años. La exposición prolongada al cromo ha sido asociada con cáncer del pulmón en trabajadores expuestos a niveles en el aire 100 a 1,000 veces más altos que los que se encuentran naturalmente en el ambiente. El cáncer del pulmón puede ocurrir mucho después que la exposición ha terminado. Los trabajadores que tuvieron contacto con líquidos o sólidos que contenían cromo (VI) desarrollaron úlceras en la piel.

Clasificación cancerígena: Debido a que los compuestos de cromo (VI) han sido asociados con cáncer del pulmón en trabajadores y han causado cáncer en animales, DHHS ha determinado que ciertos compuestos de cromo (VI) (tales como cromato de calcio, trióxido de cromo, cromato de plomo, cromato de estroncio y cromato de cinc) son carcinogénicos en seres humanos. IARC ha determinado que el cromo (VI) es carcinogénico en seres humanos en base a suficiente evidencia en seres humanos expuestos al cromo (VI) en las industrias de producción de cromatos, de colorantes de cromato y de cromado de metales. La USEPA ha establecido un límite de  $100 \mu\text{g}$  de cromo (III) y cromo (VI) por litro de agua potable. OSHA ha establecido límites de  $500 \mu\text{g}$  de compuestos de cromo (III) solubles por metro cúbico de aire ( $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en el área de trabajo,  $1,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de cromo metálico (0), y  $52 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de compuestos de cromo (VI) durante jornadas de 8 horas diarias, 40 horas a la semana.





El cromo (+6) es un potente cancerígeno por la vía respiratoria, puede causar reacciones irritativas y alérgicas de la piel. La DRf oral es  $3,0E-03$  (mg/kg·día), y la CRf inh =  $1.0E-04$  mg/m<sup>3</sup>. El FPC oral es  $5.0E-01$  (mg/kg·día)<sup>-1</sup> y el FUR inh  $8,4E-02$  (µg/m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup>.

#### 9.2.5. Hierro

El hierro es el cuarto elemento más abundante en la naturaleza. Es un elemento que participa en los procesos de respiración de casi todos los organismos aeróbicos, y también está involucrado en la formación de radicales que pueden dañar células y tejidos. El hierro es un elemento esencial y la derivación de un valor para la estimación de riesgo presenta el problema especial que la curva de dosis-adversidad tiene la forma de una U. Así, el valor del riesgo debe ser protector contra una deficiencia como también de la toxicidad. La exposición a un exceso de hierro puede llevar a numerosas consecuencias patológicas, y una deficiencia severa puede tener serias consecuencias en la salud.

En el organismo existen procesos de adquisición, transporte y depósito (como ferritina) de hierro soluble no tóxico. Aunque hay numerosos mecanismos homeostáticos para el hierro, los organismos están sujetos a los riesgos de una deficiencia o una sobrecarga de hierro. El organismo tiene una capacidad limitada para excretar exceso de hierro, y una administración excesiva de hierro parenteral (tal como transfusiones sanguíneas) puede llevar a una sobrecarga de hierro. Existe una muy rara predisposición genética a la acumulación por ingesta de hierro. Por otra parte, la hemocromatosis hereditaria es una enfermedad autosomal-



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

recesiva del metabolismo del hierro que es común (1:300) en descendientes de Nord-Europeos, aunque es una enfermedad tratable.

Una sobrecarga aguda de hierro resultado de sobredosis intencional o no intencional es potencialmente una amenaza a la vida. Una sobreexposición crónica lleva lentamente a un daño (hasta letal) a órganos tales como el hígado (cirrosis, hepatoma, hemocromatosis primaria), corazón (acumulación de hierro en el epicardio y falla cardíaca secundaria a la hemocromatosis), y células pancreáticas beta (desarrollo de diabetes). La siderosis, resultado de exposición ocupacional por inhalación, es una condición benigna diagnosticable por rayos X.

Inhalación de óxidos de hierro puede llevar a depósitos en los pulmones, que se parece a una neumoconiosis similar a la silicosis, pero que no lleva a fibrosis y es una condición benigna.

Una deficiencia de hierro es una deficiencia nutricional común, que en niños causa atraso del desarrollo, disturbios conductuales, anemia, aumento en la susceptibilidad a la toxicidad del plomo. En la mujer embarazada aumenta el riesgo de un parto temprano y bajo peso del recién nacido.

Los síntomas de sobrecarga de hierro (una dosis de 10-20 mg/kg) más frecuentemente observados incluyen dolor epigástrico, náusea, vómito, constipación, y diarrea, los cuales parecen estar asociados con efectos irritantes del hierro libre en la mucosa gástrica. Los efectos sistémicos consisten en daño tisular



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

y disfunción de los órganos, con dosis de por lo menos 40 mg/kg pero típicamente  $\square$ 60 mg/kg de hierro elemental. La dosis letal se estima en 200-250 mg/kg, sin embargo han ocurrido muertes con dosis tan bajas como 75-125 mg/kg. La toxicidad es consecuencia de los radicales libres generados por la catálisis férrica. Está acompañada por necrosis y hemorragia, estenosis pilórica, y toxicidad del corazón e hígado (hipertransaminasemia).

La dosis de referencia crónica provisional para el hierro por la vía oral fue estimada en 0.7 mg/kg·día. No hay evidencia apropiada para la derivación de una dosis de referencia por inhalación de hierro.

Clasificación cancerígena: no hay evidencia que el hierro tenga propiedades cancerígenas.

#### **9.2.6. Manganeso**

Ciertos individuos expuestos a niveles de manganeso muy altos por largo tiempo en el trabajo sufrieron perturbaciones mentales y emocionales y exhibieron movimientos lentos y faltos de coordinación. Esta combinación de síntomas constituye una enfermedad llamada “manganismo”. Los trabajadores generalmente no exhiben síntomas de manganismo a menos que hayan estado expuestos a manganeso por meses o años. El manganismo ocurre debido a que demasiado manganeso daña una parte del cerebro que ayuda a controlar los movimientos. La exposición a altos niveles de manganeso en el aire, como puede ocurrir en una fundición de manganeso o una planta de baterías, puede afectar la habilidad motora



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

tal como mantener una mano inmóvil, la ejecución de rápidos movimientos manuales, y mantener el equilibrio. La exposición a altos niveles del metal también puede causar problemas respiratorios y alteración en la función sexual.

Exposición ocupacional a altos niveles de manganeso por largo tiempo llevó a perturbaciones mentales y emocionales y movimientos lentos y faltos de coordinación, síntomas de la enfermedad llamada "manganismo". Los trabajadores generalmente no exhiben síntomas de manganismo a menos que hayan estado expuestos a manganeso por meses o años. El manganismo ocurre debido a que demasiado manganeso daña una parte del cerebro que ayuda a controlar los movimientos. La exposición a altos niveles de manganeso en el aire, como puede ocurrir en una fundición de manganeso o una planta de baterías, puede afectar la habilidad motora tal como mantener una mano inmóvil, la ejecución de rápidos movimientos manuales, y mantener el equilibrio. La exposición a altos niveles del metal también puede causar problemas respiratorios y alteración en la función sexual.

La EPA ha establecido una norma voluntaria para el nivel de manganeso en agua potable de 0.05 miligramos por litro (0.05 mg/L). OSHA ha establecido un límite de 5 miligramos de manganeso por metro cúbico de aire (5 mg/m<sup>3</sup>) en el aire del trabajo como promedio durante una jornada de 8 horas diarias, 40 horas semanales. NRC ha recomendado una ingesta diaria segura y adecuada de manganeso que fluctúa de 0.3 a 1 mg al día para niños de hasta 1 año, 1 a 2 mg al día para niños de hasta 10 años, y 2 a 5 mg al día para niños de 10 años y mayores.



**Clasificación cancerígena:** No hay información disponible acerca del manganeso y cáncer en seres humanos. La exposición a altos niveles de manganeso en los alimentos produjo un pequeño aumento en la tasa de tumores del páncreas en ratas machos y de tumores de la tiroides en ratones machos y hembras. La EPA ha determinado que el manganeso no es clasificable en cuanto a carcinogenicidad en seres humanos.

#### 9.2.7. Mercurio

El sistema nervioso es muy susceptible a todas formas de mercurio. El metilmercurio y los vapores de mercurio metálico son más nocivos que otras formas, ya que una mayor cantidad de estas formas de mercurio llega al cerebro. La exposición a altos niveles de mercurio metálico, inorgánico, u orgánico puede dañar en forma permanente a los riñones, el cerebro, y al feto. Los efectos sobre la función cerebral pueden manifestarse como irritabilidad, timidez, temblores, alteraciones a la vista o la audición y problemas de la memoria. La exposición por corto tiempo a altos niveles de vapores de mercurio metálico puede causar lesiones al pulmón, náusea, vómitos, diarrea, aumento de la presión sanguínea o del pulso, salpullidos e irritación a los ojos.

El mercurio en el cuerpo de la madre puede traspasar las barreras cerebrales y de la placenta, pudiendo acumularse en el feto y en el cerebro. También puede pasar al niño a través de la leche materna. No obstante, los beneficios de amamantar pueden ser mayores que los posibles efectos nocivos del mercurio en la leche materna.



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

Efectos nocivos del mercurio que puede pasar de la madre al feto incluyen daño cerebral, retardo mental, incoordinación, ceguera, convulsiones e incapacidad para hablar. Niños con envenenamiento de mercurio pueden desarrollar problemas al sistema nervioso y sistema digestivo y lesiones al riñón.

EPA ha establecido un límite de 2 partes de mercurio por mil millones de partes de agua potable (2 ppm). La FDA ha establecido un nivel permisible máximo de 1 parte de metilmercurio por cada millón de partes de mariscos (1 ppm). OSHA ha establecido límites de 0.1 miligramos de mercurio orgánico por metro cúbico de aire (0.1 mg/m<sup>3</sup>) en el aire del trabajo y 0.05 mg/m<sup>3</sup> para vapor de mercurio metálico en jornadas de 8 horas diarias y 40 horas semanales.

**Clasificación cancerígena:** Hay datos disponibles, aunque inadecuados, acerca de todas las formas del mercurio y cáncer en seres humanos. El cloruro mercúrico produjo un aumento en varios tipos de tumores en ratas y ratones, y el metilmercurio produjo tumores del riñón en ratones machos. La EPA ha determinado que el cloruro mercúrico y el metilmercurio son posiblemente carcinogénicos en seres humanos. Clasificación es C; posible cancerígeno para humanos.

El mercurio puede causar severo daño neurológico, congénito, retardo sicomotor del niño, problemas gastrointestinales, problemas de la piel, nefritis glomerular, problemas inmunitarios, efectos tóxicos en el sistema cardiovascular e hígado. La DRf oral es 3.0E-04 (mg/kg-día), la CRf inh = 3.0E-05 mg/m<sup>3</sup>. No tiene FPC ya que no es un cancerígeno.



### 9.2.8. Plomo

Exposición al plomo puede resultar en diversos efectos adversos en humanos. Exposición crónica a bajos niveles es de mayor preocupación en niños de corta edad que en adolescentes o adultos. El plomo puede causar daño neurológico, hematológico, cardiovascular, renal y testicular, dependiendo de la cantidad que ingresa a diario al organismo (dosis), y de la duración de la exposición. Hay evidencia que exposición al plomo también causa déficit intelectual y daño cognitivo. Niños que ingieren de manera repetida (“pica”) pedazos de pinturas con plomo a veces pueden padecer de adultos de una enfermedad renal (enfermedad renal túbulointersticial crónica). No hay evidencia de que el plomo sea un cancerígeno. El plomo no tiene un criterio de toxicidad, sino que se evalúa mediante el modelo PBTK.

Los niveles de plomo sanguíneo reflejan una combinación de exposición durante los últimos meses y durante los últimos años. Los efectos negativos en el metabolismo humano se observan cuando los niveles de plomo están alrededor por sobre los 10  $\mu\text{g}/\text{dL}$ . Alrededor de un nivel crónico de 10  $\mu\text{g}/\text{dL}$  se han observado efectos negativos tales como inhibición de la síntesis del grupo hem en la hemoglobina de la deshidratasa  $\delta$ -aminolevulínica (del inglés  $\delta$ -aminolevulinic acid dehydratase, ALA-D), inhibición de la actividad de la pirimidina-5'-nucleotidasa, cambios en potenciales evocados en un electroencefalograma del sistema nervioso central, interferencia en el metabolismo de la vitamina D, y un desarrollo postnatal y desarrollo neurológico más lento. También tiene efectos negativos en el embarazo y desarrollo fetal.



### 9.2.9. Zinc

La inhalación de grandes cantidades de zinc (como polvo de zinc o humos de fundición o soldaduras) puede causar una enfermedad de corto plazo llamada fiebre por humos metálicos. Sin embargo poco se sabe acerca de los efectos de largo plazo resultado de respirar polvo o humos de zinc. Una ingesta muy alta de zinc en los alimentos, agua, o suplementos dietarios también puede afectar la salud. Los niveles de zinc que producen efectos adversos en la salud son mucho más altos que la

La National Academy of Sciences (NAS) ha estimado una Dosis Diaria Recomendada (Recommended Daily Allowance, en inglés RDA) de 11 mg/día en hombres, equivalente a 0.16 mg/kg·día para un hombre adulto promedio (70 kg), y 8 mg/día, equivalente a 0.13 mg/kg·día para una mujer adulta promedio (60 kg). Las dosis de zinc que producen efectos adversos en la salud son mucho mayores que la RDA. De acuerdo con USEPA, el agua potable no debe contener más de 5 mg/L de zinc debido al sabor.

Para niños pequeños NAS recomienda 2–3 mg/día, y para niños preadolescentes 5–9 mg/día. El RDA provee un nivel de estado nutricional para la gran parte de la población. Se recomiendan niveles dietarios extra en mujeres durante el embarazo y la lactancia. Para mujeres durante el embarazo se recomienda un RDA de 11–12 mg/día, y durante la lactancia se recomienda 12–13 mg/día.

Los efectos severos a la salud normalmente comienzan a niveles 10-15 veces mayores que la cantidad necesaria para una buena salud. Grandes dosis por





INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

ingesta en un corto tiempo puede causar vómitos y náuseas. Grandes dosis por tiempos mayores pueden causar anemia. No se tienen evidencias de efectos de largo tiempo asociados a la inhalación de altas cantidades de zinc. Experimentos con conejos, conejillos de Indias y ratones con bajos niveles de acetato de zinc y cloruro de zinc en la piel causa irritación dérmica. Experimentos con ratas ha mostrado problemas de fertilidad.

Ingestión de dosis de zinc 10-15 veces más que la RDA en un tiempo breve, pueden producir calambres estomacales, náusea y vómitos. Ingestión de altos niveles de zinc por varios meses puede causar anemia, daño al páncreas, y disminución de lipoproteínas de alta densidad colesterol. Consumo de alimentos conteniendo cantidades muy altas de zinc (1.000 veces más que el RDA) por varios meses ha mostrado efectos en ratas, ratón, y hurones, incluyendo anemia y daño hepático y renal. Consumo de cantidades muy altas de zinc en ratas produce infertilidad, y exposición durante preñez produjo crías más pequeñas. Aplicación de dosis pequeñas de ciertos compuestos de zinc, tal como acetato de zinc y cloruro de zinc en la piel de conejos, conejillos de India, y ratones causa irritación de la piel. La irritación por exposición a estos compuestos podría ocurrir en humanos.

Para proteger a los obreros, la U.S. Occupational Safety and Health Administration (OSHA) ha establecido un límite promedio legal de 1 mg/m<sup>3</sup> para humos de cloruro de zinc y 5 mg/m<sup>3</sup> para polvos y humos de óxido de zinc en el lugar de trabajo durante una jornada de trabajo de 8 horas diarias y 40-horas por semana. Esta reglamentación significa que el aire en el ambiente de trabajo debe contener un promedio de no más de 1 mg/m<sup>3</sup> cloruro de zinc durante un turno laboral de 8-



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

horas en una semana e trabajo de 40 horas. El National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) similarmente recomienda que el nivel de óxido de zinc en el aire ocupacional no debe exceder un promedio de 1 mg/m<sup>3</sup> en un período de 10-hour de una semana de 40-horas de trabajo.

Un consumo de cantidades insuficientes de zinc es un problema de salud tan importante como consumir en exceso. Sin suficiente zinc en la dieta, la gente puede experimentar pérdida de apetito, disminución del sentido de sabor y olor, disminución de las funciones inmunitarias, retardo en la cicatrización de heridas, y ulceraciones dérmicas. Déficit también puede causar un pobre desarrollo de los órganos sexuales y crecimiento retardado en hombres jóvenes. En la mujer embarazada, el déficit puede producir defectos de nacimiento.

**Clasificación cancerígena:** La USEPA ha determinado que no hay suficiente información para concluir un potencial cancerígeno del zinc.

### 5.3 Interacción entre metales pesados

Existe evidencia de que el arsénico, cadmio, cromo y plomo, interactúan entre ellos para producir toxicidad combinada. Un número de órganos son blancos de acción de dos o más metales. El efecto crítico para el plomo es neurológico, en particular en niños y criaturas menores. El efecto crítico para el arsénico es el dérmico, y para el cadmio es el renal. El efecto crítico del cromo VI es incierto. Los efectos



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

más sensibles en común para dos o más metales incluyen neurológico, renal, cardiovascular, y efectos hematológicos. Aunque menos sensibles, se han observado efectos sinérgicos entre plomo y cadmio por efectos testiculares, en el cual el cromo VI también tiene efectos.

Los efectos más documentados son el resultado de la interacción plomo-arsénico, y plomo-cadmio, relevantes con la contaminación en Andacollo. El cadmio exagera los efectos neurológicos y testiculares del plomo, pero son menores para los efectos renales y hematológicos y cardiovasculares.

- Efectos neurológicos. La evidencia es mejor para los efectos aditivos del plomo sobre el arsénico, y arsénico sobre el plomo, que para las otras combinaciones de metales. De manera que el Índice de Peligrosidad (IP) puede ser algo mayor que el estimado para el efecto crítico, en particular para sitios contaminados con relativamente altos Cocientes de Peligrosidad (CP) para plomo y arsénico. Esta evidencia es particularmente importante para las tortas de relave en Andacollo, que se caracterizan por ser altos en arsénico y plomo. Los riesgos actuales pueden ser mayores a los estimados.
- Efectos renales. La evidencia sugiere que las interacciones son menos que aditivos.
- Efectos cardiovasculares. Los efectos del cadmio y plomo son aditivos, pero no hay evidencia sólida respecto de los otros metales.
- Efectos hematológicos. Los efectos parecen ser menores que aditivos.



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

- Efectos testiculares. Los efectos cadmio-plomo son mayores que aditivos.
- Efectos dérmicos. Evidencia no es conclusiva.
- Efectos carcinogénicos. No hay evidencia acerca de los efectos de los otros metales sobre las propiedades cancerígenas del arsénico.

En resumen, hay evidencia de que los efectos para la combinación plomo-arsénico son mayores que aditivos para los efectos neurológicos, y los efectos testiculares parecen ser mayores que aditivos para la combinación cadmio-plomo. Esto debe ser considerado para las tortas de relave con plomo, arsénico, y cadmio.

### 9.3. Criterios de toxicidad de los contaminantes de riesgo potencial

El Criterio de Toxicidad de cada contaminante debe corresponder con la ruta de exposición, la duración de la exposición (crónico, subcrónico), y la bioavaiabilidad del contaminante en la matriz en estudio. Los valores de criterios de toxicidad se encuentran tabulados en esta base de datos IRIS de la U.S. EPA, los que se pueden consultar en: [www.epa.gov/iris/](http://www.epa.gov/iris/)

#### 9.3.1. Criterios de toxicidad de contaminantes crónicos (con umbral de dosis-respuesta)

Valores de toxicidad crónica no cancerígena se muestran en Tabla N° 9.1, y se definen a continuación.

**Dosis de Referencia:** Una estimación (con una incertidumbre asociada que puede llegar a un orden de magnitud) de la exposición diaria a la población humana



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

(incluyendo a subgrupos sensibles) que es probable esté libre de riesgo apreciable de efectos dañinos durante toda la vida.

- **Dosis de referencia oral (DR<sub>f0</sub>):** Una estimación (con una incertidumbre que puede llegar a un orden de magnitud) de la exposición diaria oral en la población humana (*incluyendo subgrupos susceptibles*) que es probable estén libres de riesgos apreciables de efectos dañinos durante toda la vida. Las unidades son [mg/kg·día]
- **Dosis de referencia dérmica.** Se usa la oral corregida por absorción dérmica.
- **Concentración de referencia (CR<sub>f1</sub>):** Una estimación (con una incertidumbre que puede llegar a un orden de magnitud) de la exposición por inhalación continua en la población humana (*incluyendo subgrupos susceptibles*) que es probable estén libres de riesgos apreciables de efectos dañinos crónicos de salud durante toda la vida. Las unidades son [mg/m<sup>3</sup>].

Para el manganeso, USEPA IRIS muestra un valor de CR<sub>f1</sub> = 5E-05 mg/m<sup>3</sup>, el cual puede ser convertido a DR<sub>f1</sub> multiplicando por 20m<sup>3</sup>/día y dividiendo por 70 kg peso corporal, para dar 1.40E-05 mg/kg.día, valor que se muestra en Tabla N° 9.1.



### 9.3.2 Criterios de toxicidad de contaminantes cancerígenos (sin umbral de dosis-respuesta)

Valores de toxicidad cancerígena se muestran en Tabla N° 9.1, y se definen a continuación.

- **Factor de Potencia (ó Pendiente) Cancerígena Oral (FPC<sub>O</sub>):** Pendiente del 95% límite de confianza superior de la regresión lineal de la respuesta cancerígena ( $\Delta R$ ) a dosis bajas ( $\Delta D$ ). Las unidades son  $[\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{día}]^{-1}$
- **Factor de Potencia Cancerígena Dérmica (FPC<sub>D</sub>):** Se usa la oral corregida por absorción dérmica.
- **Factor de Unidad de Riesgo (FUR<sub>I</sub>):** Riesgo asociado con exposición por la vía respiratoria a una unidad de masa de contaminante cancerígeno por unidad de volumen. Unidades en  $[\text{mg}/\text{m}^3]^{-1}$ .

### 9.3.3. Criterios de toxicidad sustitutos

Ocasionalmente hay contaminantes para los cuales no hay disponible un criterio de toxicidad, ó hay que extrapolar de una ruta de exposición a otra ruta de exposición, y es necesario desarrollar un criterio de toxicidad sustituto. En el caso del presente proyecto, no hubo necesidad de desarrollar ó identificar un criterio sustituto.



Universidad de Chile

INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

---

**9.4 Inclusión de sustancias cancerígenas con “peso de evidencia” categorías A y B.**

La U.S.EPA recomienda la inclusión en el análisis de riesgo de toda sustancia con clasificación de cáncer A y B. En el caso presente, esto significa que arsénico (oral, inhalación), berilio (inhalación), cadmio (inhalación), y cromo VI (inhalación), deben ser incluidos. Si bien plomo también ha sido clasificado como B2, en la actualidad USEPA recomienda considerar el plomo sólo como un cancerígeno en animales. La USEPA no ha desarrollado dosis de referencia para el cobalto, y tampoco considera al cobalto como un cancerígeno.

La clasificación de cáncer de la USEPA para cada contaminante cancerígeno se indica en la Tabla N° 9.1.

Tabla N° 9.1: Criterios de toxicidad asociados con los contaminantes identificados en los relaves mineros de Andacollo

| Elemento       | Efectos cancerígenos |                     |                                      | Efectos crónicos  |                   |
|----------------|----------------------|---------------------|--------------------------------------|-------------------|-------------------|
|                | FPCo<br>1/(mg/kg.d)  | FPCi<br>1/(mg/kg.d) | Clasificación<br>evidencia<br>cáncer | DRfo<br>(mg/kd.d) | DRfi<br>(mg/kg.d) |
| Arsénico       | 1.50E+00             | 1.50E+01            | <b>A</b>                             | 3.00E-04          | ---               |
| Cadmio         | ---                  | 6.30E+00            | <b>B1</b>                            | 5.00E-04          | ---               |
| Cobre          | ---                  | ---                 | ---                                  | 4.00E-02          | ---               |
| Cromo VI       | ---                  | 4.20E+01            | <b>A</b>                             | ---               | ---               |
| Cromo III      | ---                  | ---                 | D                                    | 3.00E-03          | ---               |
| Hierro         | ---                  | ---                 | ---                                  | 3.00E-01          | ---               |
| Manganeso      | ---                  | ---                 | D                                    | 1.40E-01          | 1.40E-05          |
| Mercurio inorg | ---                  | ---                 | D                                    | 3.00E-04          | ---               |
| Mercurio elem. | ---                  | ---                 | ---                                  | 3.00E-04          | 3.00E-05          |
| Plomo          | ---                  | ---                 | <b>B2</b>                            | (b)               | (b)               |
| Zinc           | ---                  | ---                 | ---                                  | 3.00E-01          | ---               |

Ref: USEPA IRIS (2006)

(b) USEPA recomienda evaluar el plomo usando un modelo tóxico-cinético (ver texto)





INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

---

## CAPITULO X: CARACTERIZACIÓN DE LOS RIESGOS A LA SALUD HUMANA

### 10.1. Aspectos generales

#### 10.1.1. Nivel de complejidad del análisis de riesgo

Típicamente un análisis de riesgo comienza con una *evaluación inicial* (“screening”) con el fin de tener una aproximación de los estimados de exposición y riesgo. En este caso se seleccionan sólo algunos contaminantes representativos, se usan valores supuestos y genéricos, se usan concentraciones máximas, y solo se consideran dos o tres vías de exposición. Esto se hace cuando existe falta o limitación de la evidencia respecto a la caracterización de los contaminantes.

En un *análisis detallado* el nivel de complejidad del análisis aumenta significativamente, y la información que se usa es más específica a la situación en estudio. En este caso se usa un mayor número de contaminantes, las vías de exposición son más específicos al problema, pero el enfoque matemático es determinístico.

En el tercer nivel de complejidad, el más complejo, se usa un *análisis probabilístico*. Aquí se analiza la incertidumbre asociada a la variabilidad natural de los factores de exposición humana, ó la incertidumbre real asociada con el modelo matemático, ú otra información considerada limitada.

Para el estudio de los metales pesados en Andacollo, se seleccionó un modelo detallado de análisis de riesgo. La decisión se basó en la cantidad y calidad de la evidencia disponible en relación al problema, incluyendo la disponibilidad de análisis químico de muestras ambientales, y los receptores hipotéticos específicos para el problema del derrame. Por otra parte se estimó que no hay una justificación



inmediata para un análisis probabilístico, ya que la nueva información no aportaría a un mayor conocimiento del problema y sus posibles soluciones.

### **10.2. Índice de Peligrosidad asociado con contaminantes crónicos no cancerígenos**

El riesgo asociado con contaminantes crónicos no cancerígenos, también conocidos como contaminantes con umbral tóxico, se lleva a cabo usando los procedimientos descritos en las secciones siguientes.

La Dosis Diaria Promedio Anual (DDPA) se divide por la Dosis de Referencia oral del contaminante para la ruta oral o dérmica. Esto se hace para determinar si la dosis “inocua” de referencia DRf es excedida por la dosis de contaminante DDPA. El resultado es el Cociente de Peligrosidad (CP) para el contaminante en particular y para la vía de exposición respectiva:

$$\text{Cociente de Peligrosidad (CP)} = \text{DDPA} / \text{DRf}$$

(para las rutas oral y dérmica)

Luego los CPs de los diferentes contaminantes se suman dentro de cada vía de exposición, para generar el Índice de Peligrosidad de la Vía de Exposición:

$$\text{Índice de Peligrosidad}_{\text{VÍA DE EXPOSICIÓN V}} = \text{CP}_{\text{CONT A}} + \text{CP}_{\text{CONT B}} + \text{CP}_{\text{CONT C}} + \text{etc.....}$$



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

Por otra parte los CP de las diferentes vías de exposición se suman dentro de cada contaminante, para generar un Índice de Peligro para cada Contaminante:

**Índice de Peligrosidad** CONTAMINANTE  $C = CP_{VIA\ 1} + CP_{VIA\ 2} + CP_{VIA\ 3} + \text{etc.....}$

Finalmente el índice de Peligrosidad Total (IPT) para el problema de contaminación en estudio se obtiene sumando todos los CP para todos los contaminantes y vías de exposición.

El proceso se resume en la siguiente Tabla:

| Índice de Peligrosidad para Niños |                          |                          |                          |                          |                                    |             |
|-----------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------------------|-------------|
| Contaminante                      | Vía de exposición 1      | Vía de exposición 2      | Vía de exposición 3      | Vía de exposición 4      | $\sum$ IP por contaminante         | %           |
| Contam. a                         | CPa1                     | CPa2                     | CPa3                     | CPa4...                  | $IP_{c1} = \sum CP_{CA}$           | % Contam. a |
| Contam. b                         | CPb1                     | CPb2                     | CPb3                     | ...                      | $IP_{c1} = \sum CP_{CB}$           | % Contam. b |
| Contam. c                         | CPc1                     | CPC2                     | ...                      | ...                      | $IP_{c1} = \sum CP_{CC}$           | % Contam. c |
| ...                               | ...                      | ...                      | ...                      | ...                      |                                    |             |
| ...                               | ...                      | ...                      | ...                      | ...                      |                                    |             |
| ...                               | ...                      | ...                      | ...                      | ...                      |                                    |             |
| ...                               | ...                      | ...                      | ...                      | ...                      |                                    |             |
| ...                               | ...                      | ...                      | ...                      | ...                      |                                    |             |
| ...                               | ...                      | ...                      | ...                      | ...                      |                                    |             |
| ...                               | ...                      | ...                      | ...                      | ...                      |                                    |             |
| $\sum$ IP por via                 | $IP_{V1} = \sum CP_{V1}$ | $IP_{V2} = \sum CP_{V2}$ | $IP_{V3} = \sum CP_{V3}$ | $IP_{V4} = \sum CP_{V4}$ | $IPT_{C+V} = \sum \sum (CP)_{C,V}$ |             |
| %                                 | % vía 1                  | % vía 2                  | % vía 3                  | % vía 4                  |                                    |             |



Donde el total es:

$$\text{Índice de Peligrosidad Total (IPT)}_{c+v} = \sum_{\text{cont}} \sum_{\text{vías}} (\text{CP})_{c,v}$$

Un Índice de Peligrosidad Total (IP) es la suma de más de un cociente de peligrosidad (CPT) para múltiple sustancias y/o múltiple vías de exposición. El CP es el cociente del nivel de exposición de una sola sustancia por un período de tiempo especificado (por ejemplo, crónico), y la dosis de referencia para la misma sustancia derivada de un período de exposición similar.

Este IPT es una estimación del índice de peligro para contaminantes crónicos no cancerígenos en las personas expuestas asociadas con el problema de contaminación en estudio.

### 10.2.1. Significado e Interpretación del Índice de Peligrosidad

Un Índice de Peligrosidad Total (IPT) se interpreta como la probabilidad aditiva de efectos crónicos no cancerígenos en la salud de todos los receptores humanos, incluyendo individuos hipersusceptibles, expuestos por un tiempo largo (un año o más) a una concentración promedio de contaminantes específicos de un sitio según definido en el escenario de exposición.

Cuando una DDPA es similar a la DRf (ver Sección previa), entonces el cociente CP se aproxima a la unidad. Si la suma de varios CPs también se aproximan a la unidad, entonces un índice de peligro IP por debajo de 1 no tiene significado



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

biológico; la probabilidad de contraer efectos en la salud de tipo crónico, nó cancerígenos aumenta con la magnitud del IP.

Diferentes contaminantes pueden causar efectos adversos similares en la salud, y es apropiado combinar los cocientes asociados con diferentes contaminantes. Un IPT es una suma de los CPs para todos los contaminantes que afectan todos los órganos ó sistemas blancos a los cuales el receptor está expuesto. Idealmente, los CPs deben ser combinados para contaminantes que causan efectos adversos por el mismo mecanismo, pero se prefiere la suma de CPs para los contaminantes que afectan el mismo órgano o sistema blanco.

Exposiciones acumuladas que resulten en un  $IP > 1$  sugiere la posibilidad de efectos adversos, pero nó necesariamente significa que los efectos adversos van a ocurrir. Un  $IP \leq 1$  ó menos significa que no se espera que ocurran efectos adversos (nó cancerígenos) en la salud como resultado de la exposición. El IP no se puede traducir como probabilidad de ocurrencia de un efecto adverso, ya que el índice de peligro no es proporcional al riesgo, dado que el CP es un cociente entre la exposición al contaminante y el nivel al cual no se esperan efectos adversos.

### 10.3. Estimación del Riesgo Extra de Cáncer de por Vida

La estimación del riesgo asociado con contaminantes cancerígenos, también conocidos como contaminantes sin umbral tóxico, se lleva a cabo usando los procedimientos descritos en las secciones siguientes.

El Riesgo Extra de Cáncer de por Vida se estima usando la Dosis Diaria Promedio de por Vida (DDPV) estimada para cada contaminante cancerígeno y por cada vía de exposición, y multiplicada por el respectivo criterio de toxicidad:



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

- Para sustancias cancerígenas por la vía oral ó dérmica se usa el Factor de Potencia Cancerígena (FPC), también denominado Factor de Pendiente.
- Para sustancias cancerígenas por la vía de inhalación la USEPA recientemente ha recomendado que para estimar el riesgo se use la concentración aérea del cancerígeno, y el Factor de Riesgo Unitario (FRU).

Es decir,

$$\begin{aligned} \text{Riesgo Extra de Cáncer de por Vida (RECV)} &= \text{DDPV} \times \text{FPC} \\ &= C_{\text{AIR}} \times \text{FRU} \end{aligned}$$

Los riesgos de cáncer se estiman para cada contaminante, los cuales luego se suman para obtener la contribución total del contaminante a través de las vías de exposición. Por otra parte, los riesgos de cáncer también se estiman para cada vía de exposición a través de todos los contaminantes. Las siguientes expresiones resumen el proceso:

$$\text{RECV}_{\text{VIA DE EXPOSICIÓN}} = \Sigma (\text{todos los RECV}_C \text{ para cada vía de exposición})$$

$$\text{RECV}_{\text{CONTAMINANTE}} = \Sigma (\text{todos los RECV}_V \text{ para cada contaminante})$$

Finalmente la suma de todos los RECV para todos los contaminantes y vías de exposición resulta en el Riesgo Extra Total de Cáncer de por Vida (RETCV) para el problema de contaminación en estudio.



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

El proceso se resume en una tabla como sigue:

| Riesgo Extra Total de Cáncer de por Vida |                        |                        |                        |                        |  |             |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--|-------------|
| Contaminante                             | Vía de exposición<br>1 | Vía de exposición<br>2 | Vía de exposición<br>3 | Vía de exposición<br>4 | $\Sigma$ IP por contaminante                                 | %           |
| Contam. a                                | RECVa,v1               | RECVa,v2               | RECVa,v3               | RECVa,v4               | $\Sigma=RECV_{c1}$   | % Contam. a |
| Contam. b                                | RECVb,v1               |                        |                        | ...                    | $\Sigma=RECV_{c2}$   | % Contam. b |
| Contam. c                                | RECVc,v1               |                        |                        | ...                    | $\Sigma=RECV_{c3}$   | % Contam. c |
| ...                                      | ...                    | ...                    | ...                    | ...                    |  |             |
| ...                                      | ...                    | ...                    | ...                    | ...                    |  |             |
| ...                                      | ...                    | ...                    | ...                    | ...                    |  |             |
| ...                                      | ...                    | ...                    | ...                    | ...                    |  |             |
| ...                                      | ...                    | ...                    | ...                    | ...                    |  |             |
| ...                                      | ...                    | ...                    | ...                    | ...                    |  |             |
| ...                                      | ...                    | ...                    | ...                    | ...                    |  |             |
| <b><math>\Sigma</math> IP por vía</b>    | $\Sigma=RECV_{v1}$     | $\Sigma=RECV_{v2}$     | $\Sigma=RECV_{v3}$     | $\Sigma=RECV_{v4}$     | <b><math>RETCV_{c+v} = \Sigma \Sigma (RECV)_{c,v}</math></b> |             |
| <b>%</b>                                 | % vía 1                | % vía 2                | % vía 3                | % vía 4                |  |             |

Donde el total es:

$$\text{Riesgo Extra Total de Cáncer de por Vida } (RETCV)_{c+v} = \sum_{\text{cont}} \sum_{\text{vías}} (RECV)_{c,v}$$

Este RETCV describe la magnitud de los riesgos cancerígenos en las personas asociadas con el problema de contaminación en estudio.



### 10.3.1. Significado e Interpretación del riesgo de cáncer

El significado e interpretación del riesgo de cáncer es diferente al del Índice de Peligro, y obedece a los conceptos descritos a continuación.

**Riesgo basal (ó background) de cáncer.** Es aquel que se atribuye a una serie de *causas acumulativas indeterminadas* (radiación, genéticas, ambientales, etc.). Por ejemplo, en la población de los EE.UU. se estima que aproximadamente una de cada cuatro personas contrae algún tipo de cáncer en su vida, incluyendo que sea cáncer tratable, reversible, o letal. Es decir, Riesgo *normal* sitá alrededor del observado en los EE.UU., pero podría ser levemente superior.

**Riesgo Extra de Cáncer de por Vida (RECV).** También llamado *riesgo adicional* de cáncer, en inglés corresponde a la expresión “*lifetime extra cancer risk.*” El Riesgo Extra de Cáncer de por Vida (RECV) es el límite superior de la probabilidad de que una persona va a contraer cáncer (ya sea tratable ó letal) durante su vida entera, entre todas las personas expuestas de por vida a una concentración promedia del contaminante, y por encima de la probabilidad basal normal de contraer cáncer. El riesgo extra se atribuye a una causa específica. Se denomina riesgo “extra” de cáncer porque es un riesgo asociado al problema de contaminación, y por lo tanto es “extra” ó “adicional” al riesgo normal basal de cáncer que tiene cada persona determinada o específica.

Debido a las precauciones incluidas en el proceso de estimación, el riesgo verdadero de cáncer puede ser inferior al calculado, pero no hay evidencia científica para esperar que sea mayor.

Para los propósitos de reglamentación ambiental y su cumplimiento, como también para consideraciones políticas generales, en los EE.UU. un RECV de uno en un





INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

millón ( $1:1.000.000 = 1E-6$ ) ó menos es en general considerado estar por debajo de un nivel de riesgo significativo (“*de minimis*”), y un nivel de RECV de uno en diez mil ( $1:10,000 = 1E-04 = 1 \times 10^{-4}$ ) o más es en general considerado un riesgo inaceptable.

El rango de riesgo entre  $1E-06$  y  $1E-04$  ha sido definido como el “rango de toma de decisiones de riesgo” para remediaciones de sitios con desechos peligrosos (U.S.A. National Oil and Hazardous Substances Pollution Contingency Plan, 40 CFR 300.430).

**Riesgo de *minimis*.** Un riesgo *de minimis* es aquel que se juzga como demasiado pequeño para ser de preocupación social, ó como para justificar el uso de recursos de gestión de riesgo para su control. Es el *riesgo de cáncer considerado sin significado biológico ó sin significado estadístico, y tiene un valor de uno en un millón, ó  $1 \times 10^{-6}$  ó menos.*

El nivel de riesgo *de minimis* frecuentemente usado por las agencias de gobierno en los EE.UU. (EPA, FDA) es de 1 en 1.000.000 ó “1 en un millón” aumento de riesgo de un efecto adverso que ocurra durante un período de por vida de 70 años en una población extensa. El nivel de riesgo de 1 en un millón que es usado para reglamentar un gran número de riesgos, es muy inferior a los riesgos que el público en general enfrenta cada día. El riesgo *de minimis* está basado en el principio *De minimis non curat lex* – la ley no se preocupa de bagatelas. Este es el concepto de ignorar los peligros demasiado pequeños, y es el nivel bajo el cual una agencia del gobierno de EE.UU. no se espera que reglamente, ya que no todos los riesgos se pueden eliminar por ley.



**Riesgo residual.** Es el riesgo que queda después de que se hayan completado las medidas protectoras ó de remediación de un sitio contaminado. El riesgo residual debe ser igual a un riesgo considerado no significativo.

#### **10.3.2. Interacción entre efectos de contaminantes identificados**

Como se discutió en sección 5.3, no hay evidencia de una interacción entre los efectos de los contaminantes identificados en altas concentraciones, principalmente arsénico y hierro.

#### **10.4. Interacción entre efectos de contaminantes identificados**

Como se discutió en sección 5.4, no hay evidencia de una interacción entre los efectos de los contaminantes identificados en altas concentraciones, principalmente arsénico y hierro.

#### **10.5. Resultados del análisis de riesgo para receptores hipotéticos**

Los índices de peligrosidad total (IP) y los riesgos extra total de cáncer de por vida (RC) estimados para niños y adultos residentes expuestos a suelos superficiales y potencialmente a subsuelos de tortas de relave en Andacollo, se muestran en tablas N° 10.1 y 10.2. Los IPs y RCs fueron estimados en forma independiente



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

para cada torta de relave, dada la distancia y las probables diferencias en la composición química entre éstas.

En cada tabla se muestran los contaminantes en las filas, y las vías de exposición en las columnas. La intersección entre estas representan la contribución específica al IP total o RC total de cada combinación contaminante/vía de exposición. También se muestran las contribuciones relativas (%) totales por contaminante y por vía de exposición.

#### **10.5.1. Análisis de resultados para los Índices de Peligrosidad**

De las 13 tortas de relave analizadas en superficie o en subsuelo, 9 presentaron valores de riesgos crónicos no cancerígenos en el rango de significancia estadística.

El arsénico, hierro y cobre fueron los contaminantes que ocasionalmente exceden el valor unitario de riesgo crónico no cancerígeno. Los resultados indican que niños expuestos a suelos superficiales de ciertas tortas de relave exceden el valor unitario, tales como torta 13 (IP=5.6), 4 (IP=5.9), 2 (IP=4.1), 10 (IP=3.2), 3 (IP=3.0), 6 (IP=3.4), 7 (IP=3.3), 18 (IP=2.8), y 11 (IP=2.1). El IP para niños expuestos a suelos superficiales de referencia fue 1.9. Para los adultos expuestos a suelos de superficie o subsuelo, los IPs están alrededor o por debajo de la unidad, sin significado biológico, y para el suelo de referencia el IP fue 0.3.



## Discusión

Cuando los *IPs exceden el valor unitario*, la USEPA recomienda segregar los *IPs* contribuyentes por efecto crítico y mecanismo de acción, con el fin de determinar si el valor aumentado pueda tener bases de mecanismos de acción en común. Los efectos críticos incluyen neurotoxicidad, toxicidad del desarrollo, toxicidad reproductiva, inmunotoxicidad, y efectos adversos por órgano blanco (tal como hepático, renal, respiratorio, cardiovascular, gastrointestinal, hematológico, músculo-esquelético, y efectos dérmicos y oculares). Los efectos asociados con los *RfDs* sirven como pauta de análisis.

Los *IPs* en exceso sin embargo reflejan las contribuciones aditivas de arsénico, hierro y cobre. Como se explicó anteriormente, *estos contaminantes no tienen efecto aditivo, ni tienen efectos tóxicos ni mecanismos de acción comunes*, y por lo tanto al analizar cada uno por separado los *IPs* excedidos se pueden explicar por las suposiciones conservadoras utilizadas.



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

Tabla N° 10.1: Resumen de Índices de Peligrosidad (riesgo crónico) estimados para los contaminantes en superficie y bajo suelo de cada torta de relave, estimados en niños y adultos.

| <b>Índice de peligrosidad</b> |                   |         |                 |         |
|-------------------------------|-------------------|---------|-----------------|---------|
| Sitio evaluado                | Nivel superficial |         | 2 m profundidad |         |
|                               | Niños             | Adultos | Niños           | Adultos |
| Sitio 1                       | 1,35              | 0,36    | 2,40            | 0,56    |
| Sitio 2                       | 4,06              | 1,07    | 3,39            | 0,98    |
| Sitio 3                       | 3,01              | 0,64    | 1,50            | 0,28    |
| Sitio 4                       | 5,93              | 0,99    | 2,34            | 0,40    |
| Sitio 5                       | 1,55              | 0,23    | 1,84            | 0,25    |
| Sitio 6                       | 3,43              | 0,75    | 5,19            | 1,11    |
| Sitio 7                       | 3,29              | 0,74    | 2,18            | 0,43    |
| Sitio 8                       | 1,39              | 0,28    | 3,64            | 0,79    |
| Sitio 9                       | 1,88              | 0,24    | 1,10            | 0,17    |
| Sitio 10                      | 3,24              | 0,80    | 3,60            | 0,88    |
| Sitio 11                      | 2,13              | 0,69    | 2,17            | 0,41    |
| Sitio 13                      | 5,63              | 1,23    | 4,75            | 1,03    |
| Sitio 18                      | 2,82              | 0,55    | 2,87            | 0,58    |
| Valor base                    | 1,90              | 0,31    | 1,50            | 0,22    |

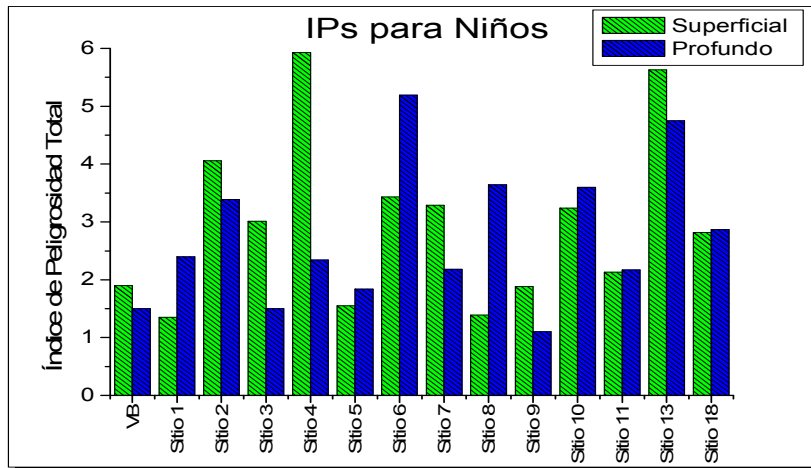


Figura N° 10.1: Índices de Peligrosidad para Niños estimados para los contaminantes en superficie y bajo suelo de cada torta de relave.

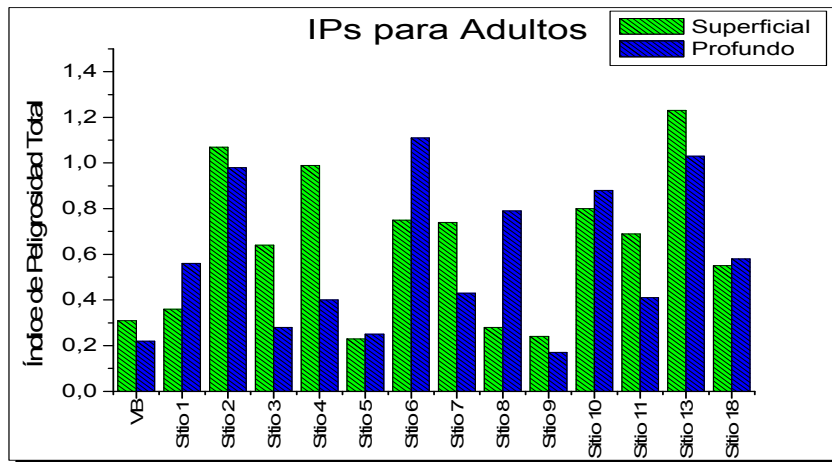


Figura N° 10.2: Índices de Peligrosidad para Adultos estimados para los contaminantes en superficie y bajo suelo de cada torta de relave.



#### 10.5.1.1. Segregación del Índice de Peligrosidad total

La adición de dosis se aplica a contaminantes que tienen el mismo efecto tóxico por el mismo mecanismo de acción. Por lo tanto un IP total que incluye contaminantes que no inducen el mismo tipo de efecto o mecanismo puede sobreestimar el potencial de efectos. Cuando el IP total excede el valor unitario, la USEPA recomienda segregar las contribuciones de cada contaminante por efecto y mecanismo de acción. Se comienza identificando los efectos críticos identificados en el desarrollo del RfD.

**Arsénico.** Los efectos críticos no cancerígenos para la toxicidad del arsénico incluyen hiperpigmentación, queratosis, y posibles complicaciones vasculares.

**Hierro.** Los efectos gastrointestinales observados con una dosis oral excesiva de hierro no son considerados efectos serios, son reversibles, y no están asociados con ingesta de niveles similares de hierro. Excepto por individuos con desórdenes del metabolismo del hierro, se dispone de poca información acerca de la toxicidad sistémica de largo plazo de hierro ingerido oralmente. Existe una larga controversia de si una sobrecarga crónica debido a ingesta oral es posible en individuos con habilidad normal para controlar absorción de hierro.



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

**Cobre.** El cobre es un elemento traza esencial pero tóxico para el metabolismo humano. Sin embargo la ingestión de grandes cantidades de sales de cobre causan problemas gastrointestinales, donde el primer síntoma de náusea ocurre a alrededor de 4 mg/L en agua potable. La absorción gastrointestinal de cobre se estima en alrededor de 62-79%, aunque en el estudio presente se usó un valor estimado de 100%, lo que da cuenta de una *sobreestimación de la absorción de Cu en el organismo*. Los casos clínicos con el cobre están más relacionados con *deficiencias nutricionales* en vez de dosis excesivas. Ingestión de alimentos o bebidas contaminadas con cobre de las vasijas de cobre, géiseres de aguas termales, o agua de bebida, pueden producir náuseas, vómitos o diarrea. En adultos estos síntomas se presentan alrededor de 4 mg/L, con la frecuencia de vómitos aumentando alrededor de 6 mg/L. La dosis máxima estimada de Cu en niños accidentalmente ingiriendo suelo contaminado en Andacollo es de 2,90 mg/d, dosis que es inferior a las reportadas con efectos negativos. La mayor causa de intoxicación por cobre es la enfermedad de Wilson (acumulación de cobre hepático causada por excreción biliar defectuosa del cobre que lleva a una patología severa del hígado y destrucción de las células) y la enfermedad de Menkes (severa deficiencia de cobre cerebral). Un exceso de ingestión de cobre puede llevar a una toxicosis por cobre en niños, causando acumulación de cobre en hígado en niñez temprana.

#### **10.5.1.2. Conclusión de efectos crónicos no cancerígenos**

Los IPs para niños residentes aledaños a las tortas de relave no indican efectos crónicos potenciales en la salud. Los valores de IP que exceden la unidad se explican por las contribuciones parciales del hierro, arsénico y cobre. Sin embargo





INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

no hay evidencia de efectos negativos en la salud a los niveles de exposición por los contaminantes antes mencionados observados en Andacollo.

**Efectos en la salud en adultos.** Los IPs para adultos estimados con suelos superficiales o con suelos profundos no son biológicamente significativos.

No hay evidencia de mecanismos de acción en común, en tejidos o sistemas target comunes al arsénico, hierro y cobre. Las contribuciones parciales del hierro, arsénico y cobre a los IPs totales no deben ser consideradas aditivas, y cada una por separado no tienen significado biológico. Los niveles de cobre ingeridos no se espera resulten en efectos negativos en la salud.

#### **10.5.2. Análisis de resultados del Riesgo Extra Cancerígeno de por Vida.**

De las 13 tortas de relave analizadas en superficie o en subsuelo, 9 presentan riesgos cancerígenos que exceden el riesgo *de minimis*  $1E-05$  usado como referencia en este estudio. En todos los casos el arsénico fue el único contaminante que consistentemente contribuyó al riesgo cancerígeno (Tabla N° 10.2).

Las concentraciones más altas de As fueron detectadas en torta de relaves #13, que se refleja en los valores máximos de RC observados,  $1.5E-04$  en niños y adultos, que fueron estimados en suelos superficiales y en profundidad, y cuyos valores están alrededor del nivel considerado significativo ( $1E-04$ ). Además esta misma torta contiene Cr en niveles que podrían representar un riesgo marginal.



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

Esto indica que torta de relaves #13 presenta propiedades un tanto diferentes que las restantes. Similares pero en menor magnitud los presentan torta de relaves 2, 6, y 10. Para suelos descritos como basales de referencia, el RC más alto estimado fue de  $3.4E-5$  en adultos expuestos a suelos superficiales.

Las vías de exposición que contribuyen al RC fueron la ingestión accidental de arenas de relave, y el contacto directo de la piel con las arenas conteniendo As. En las tortas de relave 10 y 13, los niveles de Cr por contacto con la vía dérmica contribuyen significativamente al RC. Estas contribuciones se atribuyen al supuesto de considerar que del total de Cr identificado, 50% se encontraría como Cr VI (cancerígeno) y 50% como Cr III (no cancerígeno). Esto se hizo porque el método de análisis usado sólo permite medir el contenido total de cromo, sin identificar los contenidos de Cr III y Cr VI, y de esta manera no se subestima un posible riesgo cancerígeno (el Cr VI es cancerígeno, pero el Cr III a bajas dosis es un nutriente esencial).

Tabla N° 10.2: Riesgo Extra de Cáncer de por Vida estimados para los contaminantes en superficie y bajo suelo de cada torta de relave, estimados en niños y adultos.

| <b>Riesgo de Cáncer</b> |                   |         |                 |         |
|-------------------------|-------------------|---------|-----------------|---------|
| Sitio evaluado          | Nivel superficial |         | 2 m profundidad |         |
|                         | Niños             | Adultos | Niños           | Adultos |
| Sitio 1                 | 1,2E-05           | 1,3E-05 | 3,2E-05         | 3,3E-05 |
| Sitio 2                 | 7,2E-05           | 7,2E-05 | 5,0E-05         | 5,2E-05 |
| Sitio 3                 | 5,0E-05           | 5,4E-05 | 7,3E-06         | 8,8E-06 |
| Sitio 4                 | 8,8E-05           | 9,4E-05 | 1,3E-05         | 1,5E-05 |
| Sitio 5                 | 8,2E-06           | 1,1E-05 | 8,0E-06         | 1,0E-05 |
| Sitio 6                 | 4,6E-05           | 4,6E-05 | 1,2E-04         | 1,2E-04 |
| Sitio 7                 | 4,4E-05           | 4,4E-05 | 2,5E-05         | 2,7E-05 |
| Sitio 8                 | 7,3E-06           | 8,8E-06 | 6,1E-05         | 6,1E-05 |
| Sitio 9                 | 7,3E-06           | 8,8E-06 | 7,3E-06         | 8,8E-06 |
| Sitio 10                | 5,1E-05           | 5,5E-05 | 6,4E-05         | 7,1E-05 |
| Sitio 11                | 1,0E-05           | 1,2E-05 | 9,5E-06         | 1,1E-05 |
| Sitio 13                | 1,5E-04           | 1,5E-04 | 9,3E-05         | 1,0E-04 |
| Sitio 18                | 3,9E-05           | 4,4E-05 | 4,7E-05         | 5,2E-05 |
| Valor base              | 2,9E-05           | 3,4E-05 | 1,5E-05         | 2,4E-05 |

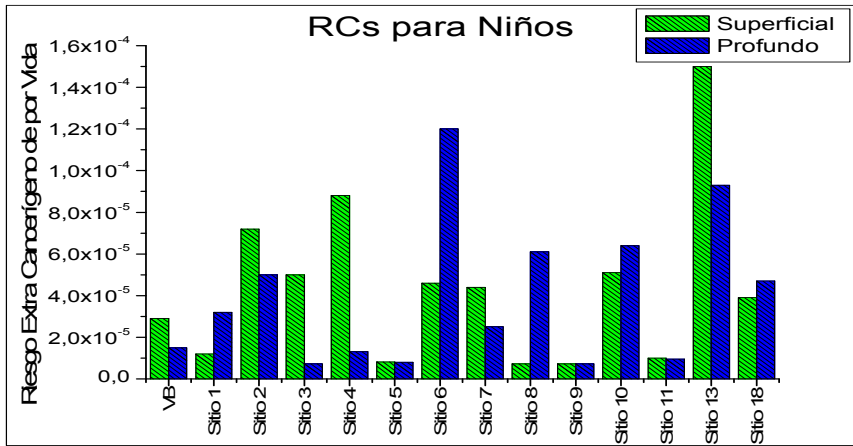


Figura N° 10.3: Riesgo extra de cáncer de por vida para Niños estimados para los contaminantes en superficie y bajo suelo de cada torta de relave.

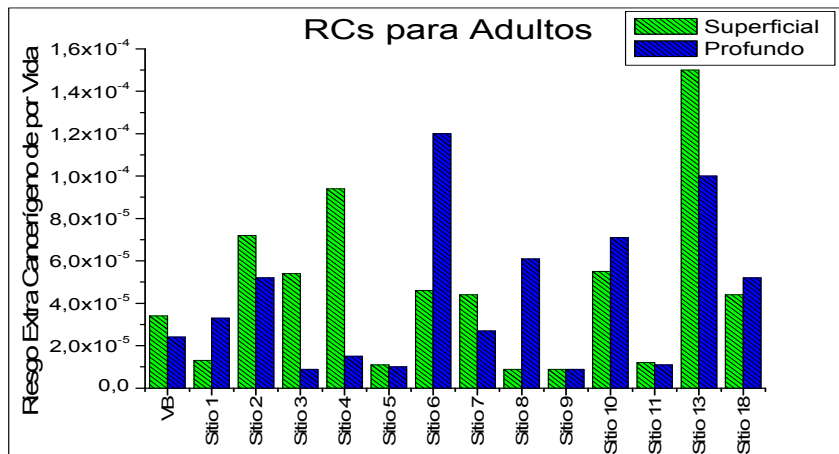


Figura N° 10.4: Riesgo extra de cáncer de por vida para Adultos estimados para los contaminantes en superficie y bajo suelo de cada torta de relave.



#### 10.5.2.1. Conclusión para Riesgos Cancerígenos

Los riesgos cancerígenos estimados para niños expuestos a suelos superficiales están en el rango  $7.3E-06$  a  $1.5E-04$ , es decir dentro de la zona del riesgo *de minimis* y hasta un nivel de riesgo que es numéricamente significativo. Un riesgo de  $1.0E-04$  es equivalente a 1/10.000, es decir, un niño que contraería cáncer por cada 10.000 habitantes asociado principalmente por exposición al arsénico, y el riesgo más alto estimado es de  $1.5E-04$  (1/6.666). Este valor es consistente con la población de Andacollo y por lo tanto dado el nivel conservador de la metodología usada, está dentro de un valor estadísticamente aceptable, en particular, dado el enfoque altamente conservador utilizado.

En cuanto a los RCs en adultos, la gran mayoría de las tortas presentan riesgos que están en la zona de gestión de riesgos,  $1E-05$  a  $1E-04$ . La ingestión accidental de arenas de relave y el contacto directo de la piel con arenas conteniendo As son las vías primordiales de exposición en los niños.

#### 10.6 Niveles sanguíneos de plomo en receptores hipotéticos

La caracterización del riesgo por exposición al plomo se llevó a cabo separadamente a los otros contaminantes, donde el riesgo se estimó como nivel de plomo en la sangre asociado con una exposición total al plomo que ingresa al organismo simultáneamente por las vía oral, inhalación y dérmica.

Existen varios modelos tóxico-cinéticos que permiten estimar la concentración de plomo sanguíneo asociada con exposición al plomo. Estos modelos consisten en predicciones de niveles de plomo sanguíneo en niños expuestos a plomo desde



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

varias fuentes ambientales y por diversas rutas de exposición, predicciones que se basan en estimaciones del movimiento del plomo absorbido y distribuido en el organismo durante el tiempo y por procesos fisiológicos o bioquímicos.

El modelo seleccionado, **Modelo Biocinético Integrado de Exposición y Distribución para el Plomo en Niños** (del inglés Integrated Exposure Uptake Biokinetic Model for Lead in Children, IEUBKwin, v.1.1, 2010).

Este fue desarrollado por la U.S.EPA y se presta especialmente para las necesidades y requerimientos del presente proyecto. El modelo consiste en un gran número de ecuaciones extremadamente complejas que forman cuatro módulos interrelacionados (exposición, ingreso, biocinético, y distribución de probabilidad) para estimar los niveles de plomo sanguíneo en niños expuestos a plomo medio ambiental. El modelo permite estimar el riesgo que un niño o una población de niños pueden exceder al nivel de preocupación de 10 µg/dl. El modelo IEUBKwin no tiene por objetivo reemplazar las mediciones de Pb sanguíneo y la evaluación médica de un niño específico en riesgo.

IEUBKwin requiere de datos de concentración de Pb en suelos, aire, agua, y dieta.

En la aplicación del modelo IEUBKwin se tomaron en cuenta consideraciones tales como:



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

1. Se supone que la concentración de plomo en el suelo es constante en el tiempo, e igual a la concentración mayor observada en torta #13, igual a 124.3 µg/kg (Figura N° 10.1).
2. El modelo supone una concentración promedio constante de plomo en aire ambiental. Este Pb en aire se estimó a partir del nivel máximo de Pb en suelos superficiales observados en torta de relaves #13 y resuspendidos en el aire por acción del viento.

$$\begin{aligned} \text{Caire Pb} &= C_{\text{Pb}} \times (1 / \text{PEF}) = 124.3 \text{ mg/kg} \times (1/1.4\text{E}+09 \text{ m}^3/\text{kg}) \\ &= 124.3 \text{ mg/kg} \times 7.14\text{E}-10 \text{ kg/m}^3 \\ &= 8.87\text{E}-8 \text{ mg/m}^3 \\ \text{Caire Pb} &= 8.87\text{E}-5 \text{ µg/m}^3 \end{aligned}$$

Donde:

CPb = concentración más alta de Pb en las tortas de relave (torta #13).

PEF = Factor de emisión de partículas (recomendado por USEPA (2011))

La concentración aérea estimada corresponde al *punto de emisión de las partículas*, sin considerar la dispersión atmosférica a distancia, lo cual significaría una importante dilución en función de la distancia hasta el punto de contacto con los receptores. Además, la concentración de Pb más alta fue seleccionada como parte de un enfoque conservador, con el fin de evitar subestimar exposición y riesgos en



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

la salud. De acuerdo con este enfoque, los niveles de Pb en el aire para todas las restantes fuentes de emisión (tortas de relave) son significativamente menores que los valores estimados.

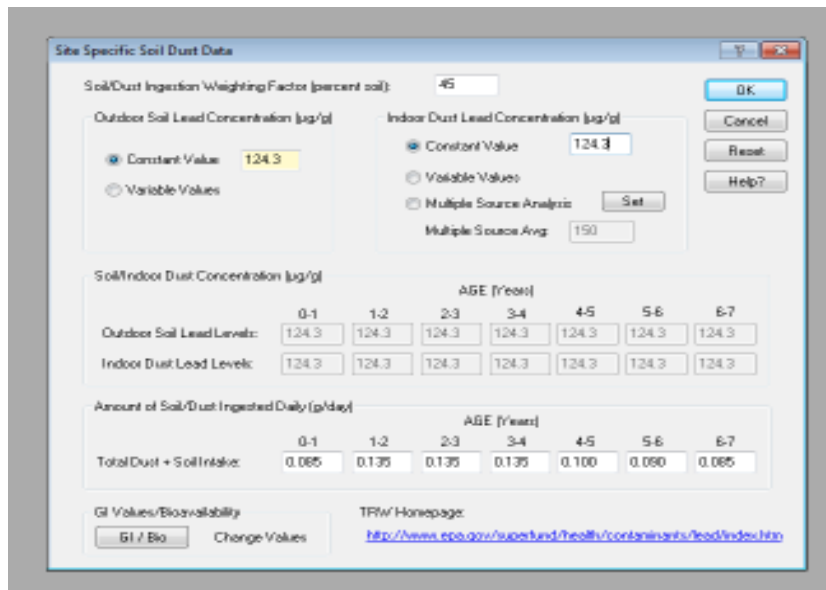
En el aporte de plomo dietario, se supone que las frutas, verduras, pescado, y carne animal, como también el agua de consumo humano, no están contaminadas con plomo. De esta manera se estiman los niveles de Pb sanguíneos exclusivamente atribuidos al Pb en suelos (Figuras 10.1 y 10.2 más abajo). En el sector de los relaves no se cultivan productos agrícolas, y sólo se observan esporádicamente árboles frutales.

Se supone que la concentración del Pb en los polvos resuspendidos en el aire exterior son iguales en el aire al exterior de las viviendas. Esta suposición es más conservadora que la recomendación de la USEPA, que recomienda un 30% de concentración al interior de una vivienda (Figura N° 10.1).

El tiempo de exposición al exterior de las viviendas fue modificado ligeramente en IEUBKwin, para reflejar mejor el tiempo que los niños están al exterior de las viviendas en Andacollo. USEPA establece siete rangos de edad bajo estudio, 0-1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6, y 6-7 años de edad, para los que recomienda 1-2-3-4-4-4-4 h/día ocupados fuera de casa, los cuales fueron incrementados a 1-2-3-4-6-6-8 h/día, respectivamente.



La ingestión incidental de suelos (arenas de relave) corresponde a ingestiones promedios recomendados por la USEPA para cada año de edad desde el nacimiento hasta los 7 años, y no consideran la ingesta pica (Geofagia, consumo excesivo de tierra y otros materiales). Los valores de ingestión son consistentes con los valores recomendados por la USEPA Exposure Factors Handbook (1997), que recomienda 100 mg/día como promedio y 200 mg/día como valor conservador de la ingesta promedio de suelo en niños. Debe dejarse claro que la ingesta de suelo y polvo está afectada por factores específicos de cada escenario de exposición, tales como presencia de pasto en el suelo, clima (en particular precipitación), actividad física en los niños, y diferencias conductuales (presencia de geofagia).



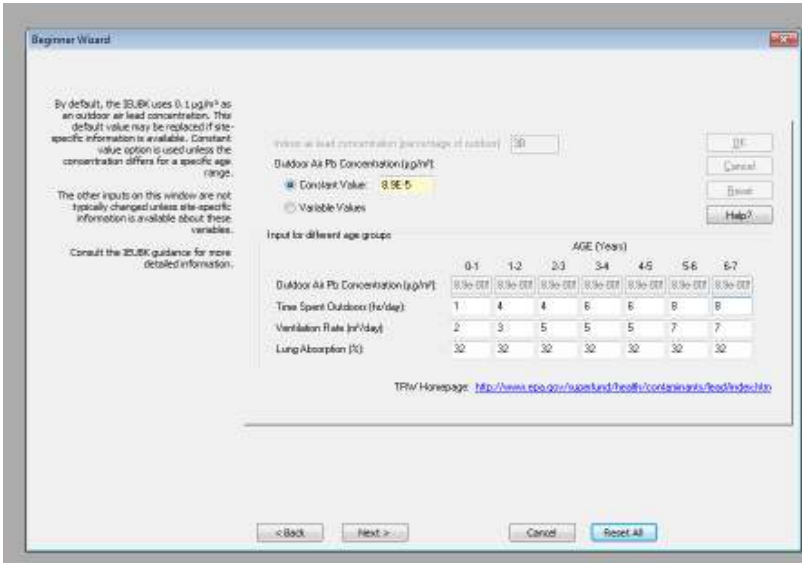
|                           | AGE [Years] |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                           | 0-1         | 1-2   | 2-3   | 3-4   | 4-5   | 5-6   | 6-7   |
| Outdoor Soil Lead Levels: | 124.3       | 124.3 | 124.3 | 124.3 | 124.3 | 124.3 | 124.3 |
| Indoor Dust Lead Levels:  | 124.3       | 124.3 | 124.3 | 124.3 | 124.3 | 124.3 | 124.3 |

|                           | AGE [Years] |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                           | 0-1         | 1-2   | 2-3   | 3-4   | 4-5   | 5-6   | 6-7   |
| Total Dust + Soil Intake: | 0.085       | 0.135 | 0.135 | 0.135 | 0.100 | 0.090 | 0.085 |

Figura N° 10.1: Datos específicos del sitio para Pb en relaves. La concentración del Pb en suelo =124.3 µg/g se supone constante y fue la

concentración máxima observada en suelo superficial en torta de relaves #13.



By default, the IRLK uses 0.1 µg/m<sup>3</sup> as an outdoor air lead concentration. This default value may be replaced if site-specific information is available. Constant value option is used unless the concentration differs for a specific age range.

The other inputs on this window are not typically changed unless site-specific information is available about these variables.

Consult the IRLK guidance for more detailed information.

Initial air lead concentration (percentage of outdoor)

Outdoor Air Pb Concentration (µg/m<sup>3</sup>)

Constant Value: 8.9E-5

Variable Values

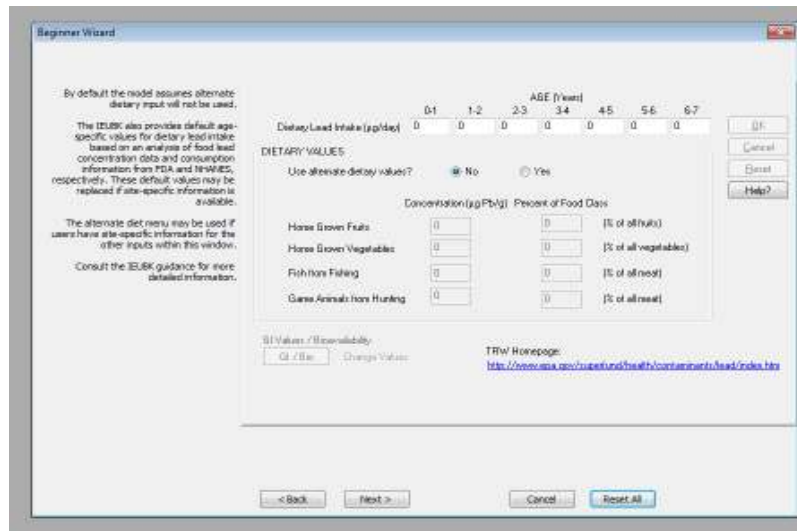
Input for different age groups:

|   | AGE (Years) |         |         |         |         |         |         |
|---|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|   | 0-1         | 1-2     | 2-3     | 3-4     | 4-5     | 5-6     | 6-7     |
| Outdoor Air Pb Concentration (µg/m <sup>3</sup> ) | 8.9E-05     | 8.9E-05 | 8.9E-05 | 8.9E-05 | 8.9E-05 | 8.9E-05 | 8.9E-05 |
| Time Spent Outdoors (hr/day)                      | 1           | 4       | 4       | 6       | 6       | 8       | 8       |
| Ventilation Rate (m <sup>3</sup> /day)            | 2           | 3       | 5       | 5       | 5       | 7       | 7       |
| Lung Absorption (%)                               | 32          | 32      | 32      | 32      | 32      | 32      | 32      |

TRW Homepage: <http://www.epa.gov/supfund/lead/contaminants/lead/index.htm>

< Back   Next >   Cancel   Reset All

Figura 10.2: Factores de exposición usados para la inhalación de polvos de relaves al exterior e interior de las viviendas. La concentración de Pb en aire exterior se supone constante y se estimó a partir de la concentración máxima observada en las arenas de relave.



By default the model assumes alternate dietary input will not be used.

The IEUBK also provides default age-specific values for dietary lead intake based on an analysis of food lead concentration data and consumption information from PDA and NHANES, respectively. These default values may be replaced if site-specific information is available.

The alternate diet menu may be used if users have site-specific information for the other inputs within this window.

Consult the IEUBK guidance for more detailed information.

|                              | 0-1 | 1-2 | 2-3 | 3-4 | 4-5 | 5-6 | 6-7 |
|------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Dietary Lead Intake (µg/day) | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |

DIETARY VALUES

Use alternate dietary values?  No  Yes

|                           | Concentration (µg Pb/g) | Percent of Food Days    |
|---------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Home Grown Fruits         | 0                       | 0 (% of all fruit)      |
| Home Grown Vegetables     | 0                       | 0 (% of all vegetables) |
| Fish from Fishing         | 0                       | 0 (% of all meat)       |
| Game Animals from Hunting | 0                       | 0 (% of all meat)       |

SI Values / Invalidability:  SI  Invalid Change Values

TRW Homepage: <http://www.cenma.gov/consultad/health/contaminants/lead/index.htm>

<< Back Next >> Cancel Reset All

Figura N° 10.3: Contribución de Pb en diversas fuentes en la dieta. En todos los casos se supuso ausencia de Pb, con el fin de determinar el riesgo exclusivo del Pb proveniente de las tortas de relave.



Universidad de Chile

# INFORME FINAL EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA DE ANDACOLLO

The screenshot shows a 'Register Wizard' window with the following sections:

- Water Consumption (L/day)**: A table with columns for AGE (Years) and rows for consumption values.
- Use alternate water values?**: Radio buttons for 'No' (selected) and 'Yes'.
- LEAD CONCENTRATION IN DRINKING WATER**: Input fields for 'Percent of Total Consumed as First Draw', 'Concentration of Lead in First Draw (µg/L)', 'Concentration of Lead in Flushed (µg/L)', 'Percentage of Total Consumed from Fountains', and 'Concentration of Lead in Fountain Water (µg/L)'.
- GI Values / Bioavailability**: A 'GI / Bio' field and a 'Change Values' button.
- TRVW Homepage**: A URL: <http://www.epa.gov/superfund/health/contaminants/lead/index.htm>

| AGE (Years)               | 0-1 | 1-2 | 2-3  | 3-4  | 4-5  | 5-6  | 6-7  |
|---------------------------|-----|-----|------|------|------|------|------|
| Water Consumption (L/day) | 0.2 | 0.5 | 0.52 | 0.53 | 0.55 | 0.58 | 0.59 |

Figura N° 10. 4: Ingesta de agua potable por rangos de edad. Se supone que el agua potable no está contaminada con Pb, con el fin de determinar el riesgo exclusivo del Pb proveniente de las tortas de relave.



Universidad de Chile

# INFORME FINAL EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA DE ANDACOLLO



Figura N° 10.5: Biodisponibilidad (fracción absorbible) de Pb desde distintos medios ambientales. Solo la absorción desde suelo y polvos ha sido considerada en el presente estudio.



Universidad de Chile

INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

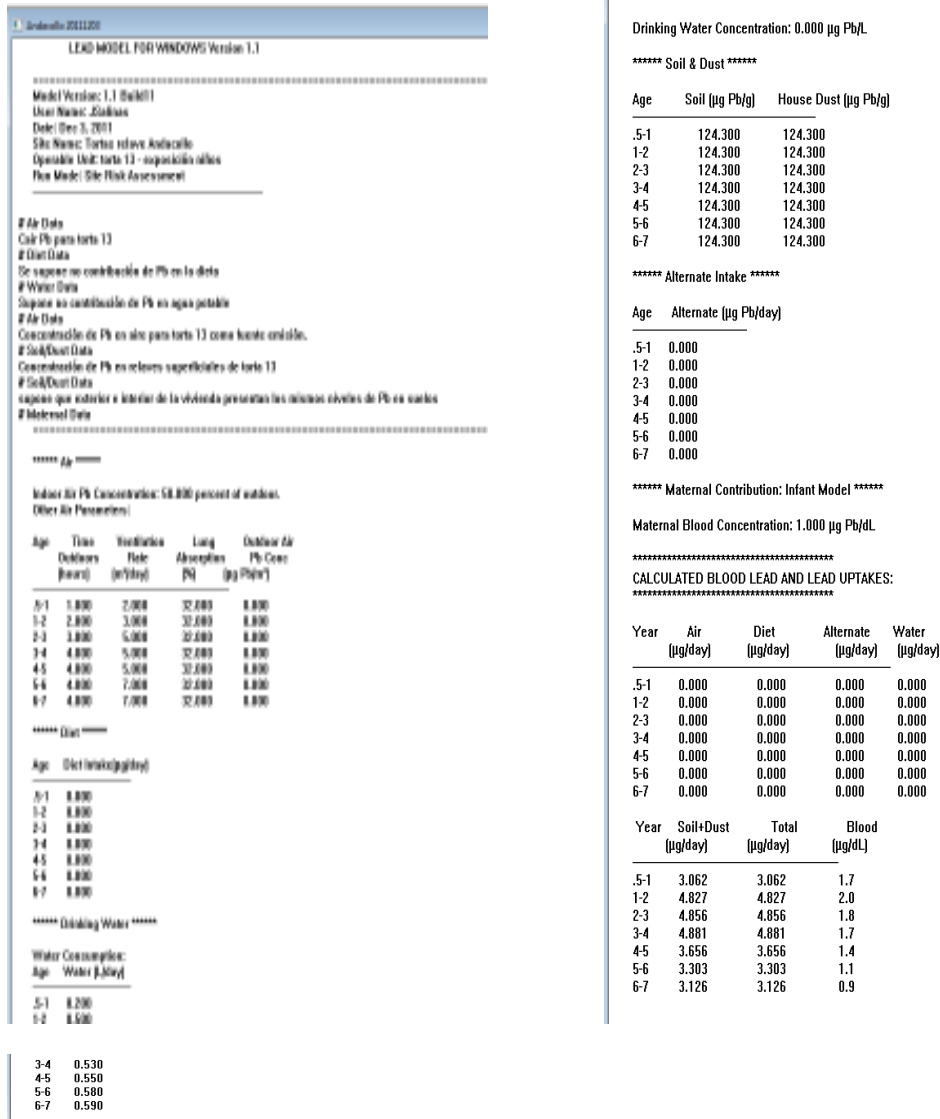


Figura N° 10.6: Resumen de datos incorporados al modelo IEUBKwin y estimaciones de Pb sanguíneo asociado con Pb absorbido.

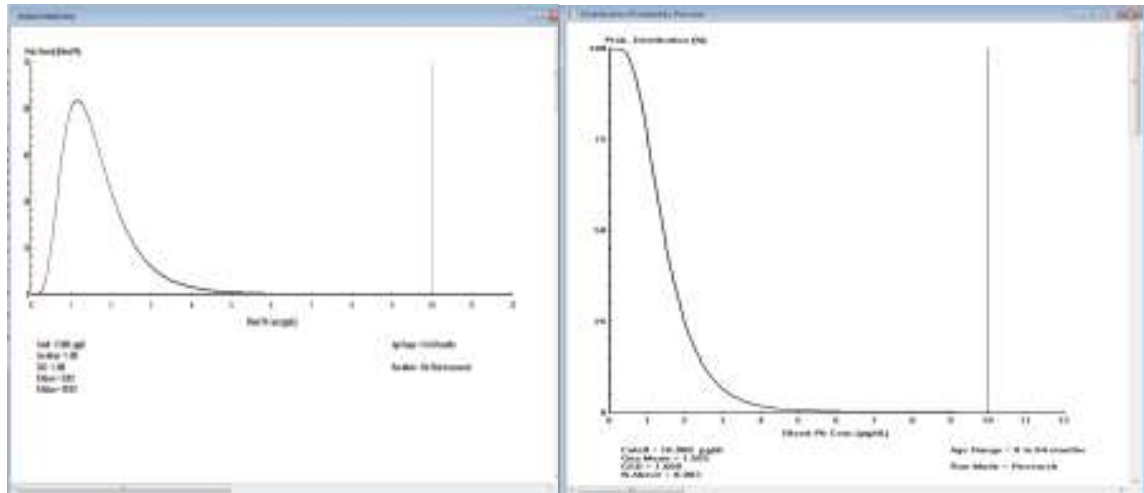


Figura N° 10.7: Niveles sanguíneos de plomo expresados como función de densidad probabilística (izq.) y como densidad probabilística acumulativa (der.). El nivel más probable es el GM=1.5 µg/dL, que es muy inferior al valor 10 µg/dL usado como referencia. Sólo un 0.003% de los niños podría exceder el valor de referencia de Pb sanguíneo.

### 10.6.1. Conclusiones de efectos del Pb en la salud

Los niveles de plomo estimados en niños entre 0 y 7 años de edad se encuentran por debajo de 5 µg/dL y se distribuyen de tal forma que sólo el 0.003 % de los niños (es decir 1/33.333 niños) exceden el nivel de referencia de 10 µg/dL. Los niveles sanguíneos se muestran como curva de densidad probabilística, y los de densidad acumulativa (Figura N° 10.7) con un promedio geométrico de 1.5 µg/dL. De acuerdo con IEUBKwin, la mayor parte del área bajo la curva está muy por



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

debajo del nivel de referencia igual a 10 µg/dL, y solo un 0.003% excede el nivel de referencia.

Efectos negativos se han observado a niveles de plomo sanguíneo por sobre 10 µg/dL.

Debe dejarse en claro que las estimaciones en el estudio presente sólo consideran la exposición de plomo por inhalación, ingestión accidental, y contacto dérmico directo con las arenas de las tortas de relaves. Se supuso que el agua potable, alimentos, y otras fuentes alternativas no se encuentran contaminadas, y por lo tanto no contribuyen a la exposición total de Pb en los niños. Es probable que esta suposición subestime algo la exposición real total de plomo, pero permite tener evidencia del peligro a la salud que presentan las tortas de relaves por sí solas. Para la población de Andacollo de poco más de 10.000 habitantes, el riesgo del 0,003% es estadísticamente aceptable.

#### **10.7. Resumen de estimaciones de Índice de Peligro y Riesgos de Cáncer**

Los índices de peligrosidad crónica no cancerígenos están alrededor del valor de referencia aceptable. Tal como se explicó anteriormente, los valores de IP que exceden la unidad no son biológicamente significativos.

Los riesgos cancerígenos estimados en niños están dentro de la zona del riesgo de *minimis* y hasta un nivel de riesgo considerado significativo. El riesgo más alto





Universidad de Chile

INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

---

estimado fue de  $1.5E-04$  (1/6.666), principalmente resultado de exposición al arsénico. Este valor es consistente con la población de Andacollo y por lo tanto dado el nivel conservador de la metodología usada, está dentro de un valor estadísticamente aceptable.

En adultos, la gran mayoría de las tortas presentan riesgos que están en la zona de gestión de riesgos,  $1E-05$  a  $1E-04$ .

La ingestión accidental de arenas de relave y el contacto directo de la piel con arenas conteniendo As son las vías primordiales de exposición en los niños.



---

## CAPITULO XI: ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE

Inevitablemente, existe una considerable incertidumbre inherente en el proceso de análisis de riesgo. Estas comienzan con el uso de suposiciones e inferencias necesarias para llevar a cabo la estimación de riesgo.

Esta fase del estudio trata de responder a preguntas tales como:

- Cuáles son las fuentes de incertidumbre que pueden influir en la calidad de las conclusiones y resultados?
- Cómo afecta la variabilidad de los factores de exposición a los resultados de riesgo final?

### 11.1. Fuentes de incertidumbre en análisis de riesgo

Fuentes de incertidumbre asociadas con el muestreo y análisis químico de los medios ambientales contaminados:

- En las variables del origen (p.ej., muestreo del contaminante inicial y datos de monitoreo)
- Posible muestreo que no logró captar el o los puntos de máxima concentración de contaminantes peligrosos.
- Posibles errores en la medición de los contaminantes.



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

Fuentes de incertidumbre en las mediciones o cálculo de la concentración en el punto de contacto:

- Al modelar el transporte de una concentración desde la fuente del contaminante hasta el punto de contacto. En el proyecto presente, no se llevó a cabo modelaciones matemáticas, sino se usó el punto de origen como concentración aérea.
- Las concentraciones de mercurio volátil o de contaminantes en partículas en resuspensión por el viento se calcularon en el punto de emisión. Es decir se calculó que el contaminante una vez en el aire, llega al punto de contacto en forma inmediata, sin dilución atmosférica por transporte aéreo. Este enfoque altamente conservador sobreestima las dosis aéreas, pero no pueden haberse subestimado.
- En suposiciones usadas para el modelo matemático ó consideraciones estadísticas relacionadas con la concentración en el punto de contacto.

a. Fuentes de incertidumbre genéricas al proceso de análisis de riesgo, e independientes de la evidencia específica del problema de contaminación. Esta incertidumbre está asociada con la información de toxicidad y efectos en la salud tales como:

Al extrapolar de dosis altas a dosis bajas cuando se conducen estudios de ensayos para cáncer y es necesario estimar dosis a muy bajos niveles de riesgo.

- Al extrapolar de animales experimentales a humanos



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

- Debida a diferencias entre individuos (susceptibilidad) asociados intrínsecamente con los criterios de toxicidad. Por ejemplo, en las dosis de referencia, la incertidumbre depende de los factores de incertidumbre aplicados en la derivación de las dosis de referencia.
  - Similar es el caso de los factores de potencia cancerígena, ya que la pendiente de la dosis-respuesta corresponde a un límite de confianza superior para una regresión lineal de respuesta.
- b.** Fuentes de incertidumbre en el cálculo de la dosis de exposición. En este caso se debe tener en mente que las dosis estimadas son promedios a lo largo del tiempo
- Al estimar dosis de exposición usando modelos matemáticos
  - Al suponer que los factores de exposición humanos son valores discretos (puntuales) en vez de funciones distribucionales.
  - La biodisponibilidad y por consiguiente la absorción gastrointestinal del arsénico en suelos o relaves ingerida accidentalmente se supuso como 100%. Existe evidencia de absorción gastrointestinal en humanos que apoya este valor. Sin embargo la absorción en el tracto gastrointestinal de los compuestos de arsénico depende de la forma química en que se encuentran. Así, compuestos tales como el pentasulfuro de arsénico ( $As_2S_5$ ) y selenuro arsenioso ( $As_2Se_3$ ) son insolubles en agua y por lo tanto la absorción es mínima en el tracto gastrointestinal, pero el arsenito sódico ( $NaAsO_2$ ) es absorbido hasta un 74%. Por lo tanto, sería importante



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

establecer en qué forma química se encuentra el arsénico en los relaves mineros.

c. La falta de un conocimiento completo y detallado de las consideraciones mencionadas aquí se “compensan” al introducir supuestos conservadores en ciertas etapas del análisis de riesgo. Así por ejemplo, la posibilidad de haber cometido errores técnicos durante el muestreo y análisis químico de las muestras ambientales se compensa con estimaciones estadísticas de lo que pueden ser las concentraciones representativas (95%NSC) de cada contaminante en cada matriz ambiental.

#### **11.2. Conclusiones del análisis de incertidumbre**

En el presente análisis de riesgo se debe suponer que hay aspectos que están afectados por incertidumbre. Errores, supuestos, y modelos pueden resultar en subestimaciones de concentraciones de contaminantes, niveles de exposición, y por ende, de riesgo en la salud. Practicantes de análisis de riesgo, como también agencias de gobierno tales como la USEPA han establecido principios y prácticas para controlar incertidumbre adicional en el proceso. Es más, prácticas tales como el uso del 95% NSC del promedio se usa en vez del promedio con el fin de compensar por errores normales tales como factores espaciales (lugar del muestreo) y temporales (cambios en concentración ambiental en función del tiempo).



Universidad de Chile

INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

---

Este tipo de incertidumbre también se encuentra en el presente estudio. Por ejemplo, las concentraciones de contaminantes en los suelos superficiales y subsuelos, mostraron una alta variabilidad. La variabilidad se atribuyó a error experimental normal para éste tipo de actividades. Los valores de tendencia central corresponden a los 95% NSC seleccionados como concentraciones representativas.

En conclusión, la incertidumbre identificada en el presente estudio es considerada típica para este tipo de problemas ambientales, y fue razonablemente controlada, sin haber recurrido a la necesidad de hacer uso de sobreestimaciones y valores exagerados en forma no razonable.



---

## CAPITULO XII: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DE RIESGO

### 12.1. Conclusiones del estudio

El análisis de riesgos en la salud permite concluir que las tortas de relave no presentan un riesgo inminente a la salud de la comunidad de Andacollo. Los índices de peligrosidad estimados indican que no hay efectos crónicos significativos en la salud asociados con exposición a las arenas de relaves, y los valores en exceso estimados se explican por la metodología conservadora usada.

Los IPs para niños residentes hipotéticos aledaños a las tortas de relave no indican efectos crónicos potenciales en la salud. Los valores de IP que exceden la unidad se explican por las contribuciones parciales del hierro, arsénico y cobre. Sin embargo no hay sustento para esperar efectos negativos en la salud a los niveles de exposición por estos contaminantes observados en Andacollo. Los IPs para adultos estimados con suelos superficiales o con suelos profundos no son biológicamente significativos.

Los riesgos cancerígenos estimados para niños expuestos a suelos superficiales están en el rango  $7.3E-06$  a  $1.5E-04$ , es decir dentro de la zona del riesgo *de minimis* y hasta el nivel de riesgo considerado significativo. Un riesgo de  $1.0E-04$  es equivalente a 1/10.000, es decir, un niño que podría contraer cáncer por cada 10.000 habitantes, en este caso asociado principalmente por exposición al arsénico. El riesgo más alto estimado es de  $1.5E-04$  (1/6.666), el que es consistente con la población de Andacollo y por lo tanto dado el nivel conservador de la metodología



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

usada, está dentro de un valor estadísticamente aceptable. En adultos, la gran mayoría de las tortas presentan riesgos cancerígenos que están en la zona de gestión de riesgos,  $1E-05$  a  $1E-04$ . La ingestión accidental de arenas de relave y el contacto directo de la piel con arenas conteniendo As son las vías primordiales de exposición en los niños.

En este estudio se propone el uso de un riesgo *de minimis* de  $1E-05$ , que es mayor al usado en los EE.UU., pero que refleja un valor de referencia razonable para Chile.

La metodología usada y las suposiciones incorporadas hacen que el enfoque usado en general sea conservador, y por lo tanto los riesgos reales pueden ser mucho menores que los reportados. Los efectos potenciales en la salud fueron estimados usando métodos y procedimientos estándar en análisis de riesgos, y un cambio en los terrenos, movimientos de tierra u otros procedimientos, pueden alterar las condiciones de la exposición, y por lo tanto es posible que los riesgos en la salud sean mayores que los reportados.

## 12.2 Verificación de los objetivos del análisis de riesgo

Los objetivos del estudio descritos en los Términos de Referencia establecen que:





INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

---

**Objetivo General:**

- Es efectuar investigaciones confirmatorias y una evaluación de riesgo a la salud, como herramientas de apoyo a la gestión pública de los asentamientos humanos de Andacollo, próximos a sitios de minería metálica, histórica y actual, con presencia de contaminantes.

**Objetivos Específicos:**

- Culminar las Investigaciones Confirmatorias iniciadas en asentamientos humanos de Andacollo y efectuar una Evaluación de Riesgos a la Salud en las áreas en las que se determine la presencia de contaminantes.
- Planificar el manejo de los principales riesgos que resulten de la evaluación de riesgosa la salud de grupos poblados presentes en la ciudad de Andacollo y sus alrededores.

El presente informe cumple y excede con la totalidad de los objetivos solicitados por MMA para el estudio.



### **CAPITULO XIII: GESTIÓN DE RIESGOS**

El estudio permite concluir que sobre la base de la evidencia y los resultados, no hay riesgos inminentes en la salud que sean biológica y estadísticamente significativos en la salud de los habitantes aledaños a las tortas de relave en Andacollo. Esto significa que no es necesario proceder con una toma de decisiones para disminuir los riesgos en la salud.

El arsénico es el contaminante que por sus propiedades cancerígenas y las concentraciones identificadas, puede significar riesgos mayores que los reportados, en aquellos receptores que exceden los niveles de exposición estudiados. Tal puede ser el caso de niños o adolescentes que ingresan frecuentemente a las zonas de las tortas de relave, a jugar o beber cerveza (se observó una gran cantidad de botellas vacías y quebradas en el área).

Los riesgos en la salud estimados para niños y adultos expuestos por largo tiempo a arenas de tortas de relaves provenientes de actividades mineras en Andacollo, no requieren gestión de riesgos.

Sin embargo se recomienda aplicar ciertas recomendaciones básicas para las áreas de los desechos de relaves. La instalación de carteles con advertencia de no ingreso a las áreas de las tortas de relave “debido a presencia de sustancias que pueden tener efectos negativos en la salud”. Asimismo los carteles debieran mencionar que estas áreas no son botaderos de desechos municipales, en particular dado el carácter de terrenos privados. Por otra parte, se puede llevar a



Universidad de Chile

INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

---

cabo actividades de mejoramiento de los aspectos estéticos de estas tortas de relave, ya que en su estado actual, desmejoran la calidad ambiental de esta comunidad y sus monumentos históricos.

Es necesario considerar que si bien se llevó a cabo un extenso muestreo y análisis de los suelos y relaves, es muy probable que hayan áreas que escaparon al muestreo y que presenten contaminantes peligrosos no identificados o que presenten concentraciones mucho más altas que las identificadas. Estos relaves son desechos mineros y pueden presentar una alta variabilidad en la naturaleza, extensión y severidad de la contaminación. Con el fin de prevenir una eventualidad negativa a la salud, incluyendo accidentes, se sugiere colocar advertencia a los usuarios del lugar.



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

---

## CAPITULO XIV: REFERENCIAS

- Álvarez, R., Ordóñez, A., Loredó, J., (2005). Anomalías de mercurio en suelos de Asturias. Comparación con los niveles de fondo. IX Congreso Ibérico de geoquímica, Soria, Septiembre.
- APHA. AWWA. WEF. (2005). Standard Methods for the Examination of water and wastewater.. 21th edition.
- Asante-Duah, D. Kofi 1996. Management of Contaminated Site Problems.
- ASTM D6009-96. (1996). American Society for Testing Material, Standard Guide for Sampling Waste Piles.
- ATSDR, 1999 Toxicological profile for mercury (update). Atlanta, GA, US Department of Health and Human Services, Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, March, 1999
- Baeyens, W., Ebinghaus, R., Vasiliev, O. (Eds.), 1996. Global and Regional Mercury Cycles: Sources, Fluxes and Mass Balances. NATO ASI Series. Kluwer Academic Press, Dordrecht.
- Betancourt O, Narva'ez A, Roulet M., Small-scale gold mining in the Puyango River Basin, Southern Ecuador: a study of environmental impacts and human exposures". EcoHealth 2005;2:323–32.
- Bethell, L., 1984. Mining in colonial Spanish America. In: Bethell, L. (Ed.), The Cambridge History of Latin America. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 105–151.



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

- Bose-O'Reilly S, Lettmeier B, Gothe RM, Beinhoff C, Siebertt U, Drash G. Mercury as a serious health hazard for children in gold mining areas. *Environmental Research* 2008; 107:89-97.
- Brading, D.A., Cross, H.E., 1972. Colonial silver mining: Mexico and Peru. *Hispanic Am. Hist. Rev.* 52, 545–579.
- Bullock, O.R., 2000. Modeling assessment of transport and deposition patterns of anthropogenic mercury air emissions in the United States and Canada. *Sci. Total Environ.* 259, 145–157.
- Carpi, A., 1997. Mercury from combustion sources: a review of the chemical species emitted and their transport in the atmosphere. *Water Air Soil Pollut.* 98, 241–254.
- Castilhos ZC, Rodrigues-Filho S, Rodrigues AP, Villas-Boas RC, Siegel S, Veiga MM, et al. Mercury contamination in fish from gold mining areas in Indonesia and human health risk assessment. *Science of the Total Environment* 2006;68:320–5.
- CENMA (2004) ILTMS-001. Instructivo de laboratorio de toma de muestras sólidas – 001, “Muestreo de residuos sólidos”.
- CENMA (2009) PL-016. Procedimiento de laboratorio-016 “Validación de métodos analíticos”.
- 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



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo – 2005, em substituição aos Valores Orientadores de 2001, e dá outras providências.

- Cuadra, W., Dunkerley, P.M., 1991. A history of gold in Chile. *Econ. Geol.* 86, 1155–1173.
- D'Itri, F.M., 1991. Mercury contamination: what we have learned since Minamata. *Environ. Monit. Assess.* 19, 165– 182.
- Department of Environment and Conservation, Australia (2010). Contaminated Sites Management Series. Assessment levels for Soil, Sediment and Water.
- Drasch G, Bose-O'Reilly S, Beinhoff C, Roeder G, Maydl 2001, The Mt. S. Diwata study on the Philippines: assessing mercury intoxication of the population by small scale gold mining. *Science of the Total Environment*; 267:151–68
- Environment Agency. Soil Guideline for Mercury in Soil, March 2009.
- Environment Canadá (2000). Situación del mercurio en Canadá. Informe de referencia para la Comisión para la Cooperación Ambiental. Equipo de Tarea de América del Norte sobre Mercurio.
- Environment Canadá (2002). Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health (2002).
- EURACHEM/CITAC, 1998 The Fitness for Purpose of Analytical Methods, A Laboratory Guide to Method Validation and Related Topics, first edition, 1998



Universidad de Chile

INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

- EURACHEM/CITAC, 2000 Guide CG4 Quantifying Uncertainty in Analytical Measurements, Second Edition.
- Fundación Chile (2009): INFORME FINAL PROYECTO No 15588-155-LE09 “Manejo de Desechos de y con contenido de Mercurio”.
- Gobierno de Andacollo (2008). Propuesta de Plan Regulador. Comuna de Andacollo.
- Gobierno de Chile (1994) Ley No 19.300 Sobre Bases Generales del Medio Ambiente.
- Gobierno de Chile (2008) Ley N° 20.417, que “Crea el Ministerio, el Servicio de Evaluación Ambiental y la Superintendencia del Medio Ambiente”.
- Gunson AJ, Veiga MM. Mercury and artisanal gold mines in China. *Environmental Practice* 2004;6(2):109–20.
- Higuera P., Oyarzún R., Lillo J., Oyarzún J., Maturana H., Atmospheric Mercury data for the Coquimbo region, Chile: influence of mineral deposits and metal recovery practices, *Atmospheric Environment* 39 (2005) 7587-7596
- Higuera P., Oyarzún R., Maturana H., Lillo J., Morata D., 2004, Environmental assessment of copper-gold-mercury mining in the Andacollo and Punitaqui districts, northern Chile, *Applied Geochemistry* 19 (2004) 1855-1864



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

- Hilson, G., 2000. Barriers to implementing cleaner technologies and cleaner production (CP) practices in the mining industry: a case study of the americas. *Min. Eng.* 13, 699–717.
- Hladdíková, V., Petrík, J., Jursa, S., Ursínyová, M., Kocan, A., 2001. Atmospheric mercury levels in the Slovak Republic. *Chemosphere* 45, 801–806.
- I.Cortes, (2011): “Evaluación de la calidad de los suelos en el sector Jesús de Nazaret en Bajos de Mena, comuna de Puente Alto”. Informe Técnico. Agosto 2011.
- Innanen, S., 1998. The ratio of anthropogenic to natural mercury release in Ontario:three emission scenarios. *Sci. Total Environ.* 213, 25–32.
- IUPAC (2005). *Compendium of Chemical Terminology*.
- Limbong D, Kumampung J, Rimper J, Arai T, Miyazaki N. Emissions and environmental implications of mercury from artisanal gold mining in north Sulawesi, Indonesia. *Science of the Total Environment* 2003;302:227–36.
- Lindqvist, O., Johansson, K., Aastrup, M., Andersson, A., Bringmark, L., Hovsenius, G., Hakanson, L., Iverfeldt, A., Meili, M., Timm, B., 1991. Mercury in the Swedish environment:recent research on causes, consequences and corrective methods. *Water Air Soil Pollut* 55, 1–261.
- Lockhart, W.L., Macdonald, R.W., Outridge, P.M., Wilkinson, P., DeLaronde, J.B., Rudd, J.W.M., 2000. Tests of the fidelity of lake sediment core records





INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

of mercury deposition to known histories of mercury contamination. *Sci. Total Environ.* 260, 171–180.

- Lockhart, W.L., Wilkinson, P., Billeck, B.N., Hunt, R.V., Wagemann, R., Brunskill, G.J., 1995. Current and historical inputs of mercury to high-latitude lakes in Canada and Hudson bay. *Water Air Soil Pollut.* 80, 603–610.
- Louchouart, P., Lucotte, M., 1998. A historical reconstruction of organic and inorganic contamination events in the Saguenay Fjord/St. Lawrence system from preindustrial times to the present. *Sci. Total Environ.* 213, 139–150.
- Malm O. Gold mining as a source of mercury exposure in the Brazilian Amazon. *Environmental Research* 1998;77:73–8.
- Ministerio de Salud, Chile (1996). Reglamento Sanitario de Los Alimentos (DTO. N° 977/96).
- Ministerio de Salud, Chile (1999). Reglamento sobre Condiciones Sanitarias y Ambientales Básicas en los Lugares de Trabajo (DTO N°594/99 actualizado al 10-11-2003).
- Ministerio de Salud, Gobierno de Chile. Decreto Supremo 148/2003. Aprueba Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos.
- Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment, Netherlands (2000). Target Value for soil remediation. The circular on target values and intervention values for soil remediation; <http://international.vrom.nl/37604> (revision 03-nov-2009)



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

- NCh 2746, 2003; Suelos y Residuos - Determinación de movilidad de analitos orgánicos e inorgánicos – Procedimiento de lixiviación por precipitación (lluvia) sintética; Instituto Nacional de Normalización, primera edición.
- NCh 409/1. (2005) Agua potable. Parte 1. Requisitos de calidad.
- NCh 409/2. (2004) Agua potable. Parte 2: Muestreo.
- Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.
- Nriagu, J.O., 1990. Global metal pollution. *Environment* 32, 7–33.
- Nriagu, J.O., Pacyna, J.M., 1988. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soil by trace metals. *Nature* 333, 134–139.
- País Vasco, España. Ley 1/2005, de 4 de febrero, para la prevención y corrección de la contaminación del suelo.
- Poulin J, Gibb H., 2008, Mercury: Assessing the environmental burden of disease at national and local levels. Editor, Prus-Ustun A. World Health Organization, Geneva, (WHO Environmental Burden of Disease Series N° 16)
- Puche, O., Mazadiego, L.F., Martín, M., 1996. Los procesos de amalgamación a través de los tiempos. *Boletín Geológico Minero* 107, 90–100.



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

- Risher, J.F (2003): Elemental mercury and inorganic mercury compounds: human health aspects, World Health Organization, Geneva.
- Rognerud, S., Fjeld, E., 1993. Regional survey of heavy metals in lake sediments in Norway. *AMBIO* 22, 206–212.
- Sadiq, M., 1992. *Toxic Metal Chemistry in Marine Environment*. Marcel Dekker, New York.
- Sloss, L.L., 1995. *Mercury Emissions and Effects: The Role of Coal*. IEA Coal Research Publications, London.
- Spiegel S.J., Veiga M.M., 2009, International guidelines on mercury management in small-scale gold mining, *J Clean Prod* (2009), doi: 10.1016/j.jclepro.2009.10.020
- Spiegel S.J., Yassi A., Spiegel J., Veiga M.M., Reducing mercury and responding to the global gold rush. *The Lancet* 2005;366:2070–2
- Swain, E.B., Engstrom, D.R., Brigham, M.E., Henning, T.A., Brezonik, P.L., 1992. Increasing rates of atmospheric mercury deposition in midcontinental North America. *Science* 257, 784–787.
- Taylor H, Appleton JD, Lister R, Environmental assessment of mercury contamination from the Rwamagasa artisanal gold mining centre, Geita District, Tanzania. *Science of the Total Environment* 2005;343:111–33.
- Telmer K, Veiga MM., 2008, World emissions of mercury from small scale artisanal gold mining and the knowledge gaps about them. In: Pirrone N, Mason R, editors. *Mercury fate and transport in the global atmosphere:*



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

measurements, models and policy implications. UNEP-United Nations Environment Programme; p. 96–129. Chapter 6.

- Tomiyasu, T. 2006, “Spatial variations of mercury in sediment of Minamata Bay, Japan”; Takashi Tomiyasu, Akito Matsuyama, Tomomi Eguchi, Yoko Fuchigami, Kimihiko Oki, Milena Horvat, Rudi Rajar, Hirokatsu Akagi; Science of the Total Environment 386 (2006) 283 – 290
- USA-BLM5 (2004): “Risk Management Criteria for Metals AT BLM Mining Sites”, United States Department of the Interior Bureau of Land Management, Denver, CO.
- U.S.EPA (2011) USEPA. Regional Screening Level (SRL) Soil to Groundwater Supporting Table June 2011.
- U.S.EPA (1991). Risk Assessment Guidance for Superfund (RAGS). Volume I: Human Health Evaluation manual, Supplemental Guidance “Standard Default Exposure Factors.
- U.S.EPA (2002). Supplemental Guidance for Developing Soil Screening Levels for Superfund Sites, Region 6.
- U.S.EPA (2006). Provisional Peer reviewed Toxicity Values for Iron and Compounds (CASRN 7439-89-6). Derivation of Subchronic and Chronic Oral RfDs. NCEA, ORD, USEPA Cincinnati.
- U.S.EPA (2011). Regional Screening Levels, Resident Soil Table, June 2011.



INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

- U.S.EPA (1988), revisada en 2009. *Exposure Factors Handbook, Volume 1: General Factors, Volume II: Food Ingestion Factors, y Volume III: Activity Factors.*
- U.S.EPA (2010). Modelo Biocinético Integrado de Exposición y Distribución para el Plomo en Niños (del inglés *Integrated Exposure Uptake Biokinetic Model for Lead in Children, IEUBKwin, v.1.1.*
- U.S.EPA. Method 1312. Synthetic Precipitation Leaching Procedure. In: United States Environmental Protection Agency. Test methods for evaluating solid wastes. Physical/chemical methods. SW-846 on-line.
- U.S.EPA. 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.
- U.S.EPA. Method 7471B. Mercury in solid or semisolid waste (manual cold-vapor technique. In: United States Environmental Protection Agency. Test methods for evaluating solid wastes. Physical/chemical methods. SW-846 on-line.
- U.S.EPA. 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.



Universidad de Chile

INFORME FINAL  
EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD EN LA COMUNA  
DE ANDACOLLO

---

- Van Straaten P., 2000, Human exposure to mercury due to small- scale gold mining in northern Tanzania. *Science of the Total Environment*;259:45–53.
- Velga, M.M., Meech, J.A., Onate, N., 1994. Mercury pollution from deforestation. *Nature* 368, 816–817.
- Verta, M., Tolonen, K., Simola, H., 1989. History of heavy metal pollution in Finland as recorded by lake sediments. *Sci. Total Environ.* 88, 1–18.
- Wagemann, R., Trebacz, E., Boila, G., Lockhart, W.L., 2000. Mercury species in the liver of ringed seals. *Sci. Total Environ.* 261, 21–32.
- Young, D.R., Johnson, J.N., Soutar, A., Isaacs, J.D., 1973. Mercury concentrations in dated varied marine sediments collected off southern California. *Nature* 244, 273–274.