

## **Caso de Estudio**

### **Sedimentos ricos en arsénico en la cuenca hidrográfica del río Elqui (norte de Chile): ¿ Contaminación industrial o natural ?**

**R. Oyarzun<sup>1</sup>, J. Lillo<sup>2</sup>, P. Higuera<sup>3</sup>, J. Oyarzún<sup>4</sup>, H. Maturana<sup>5</sup>**



**Rocas alteradas en las inmediaciones del río Toro, cuenca hidrográfica del río Elqui.**

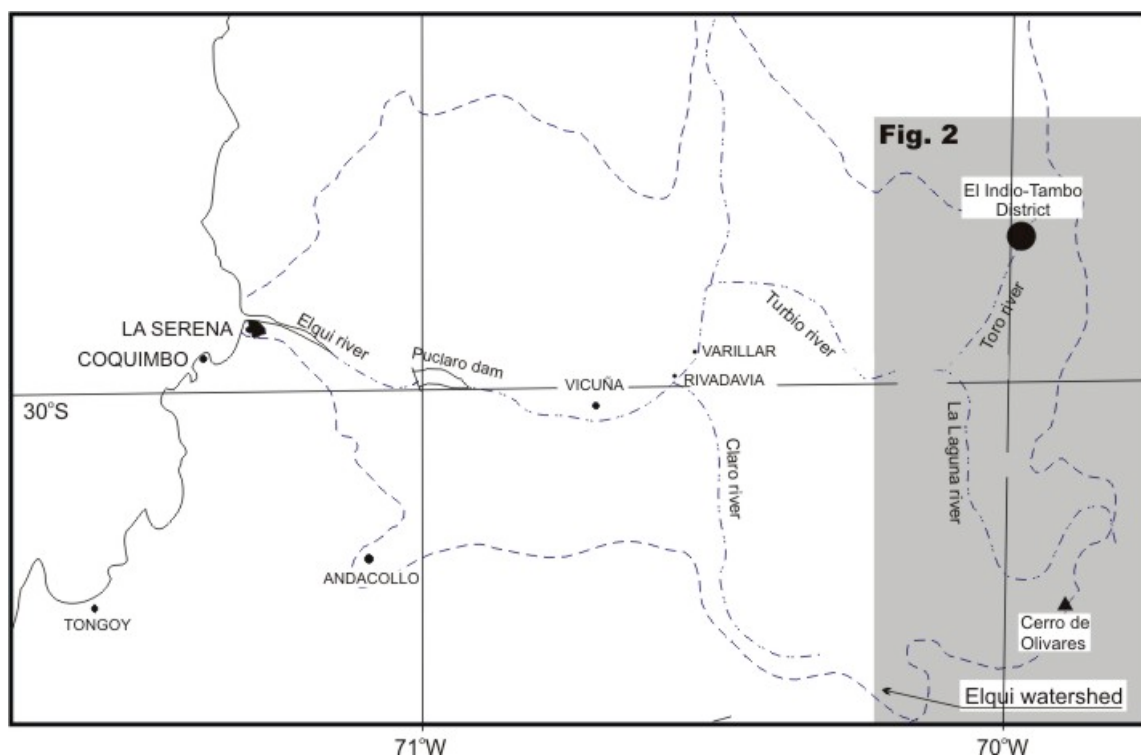
### **Introducción**

El arsénico es uno de los elementos más tóxicos encontrados en la naturaleza, constituyendo así uno de los peligros ambientales más importantes para la salud humana. Una de las zonas a nivel mundial donde este elemento se encuentra en elevadas concentraciones es en la cuenca del río Elqui, Región de Coquimbo, Chile. El año 2002 un equipo integrado por investigadores de las Universidades Complutense y Rey Juan Carlos de Madrid, Universidad de Castilla – La Mancha (Almadén), y de la Universidad de La Serena (Chile) realizó una campaña de campo en la cuenca del Elqui con el fin de estudiar la extensión y origen del problema.

---

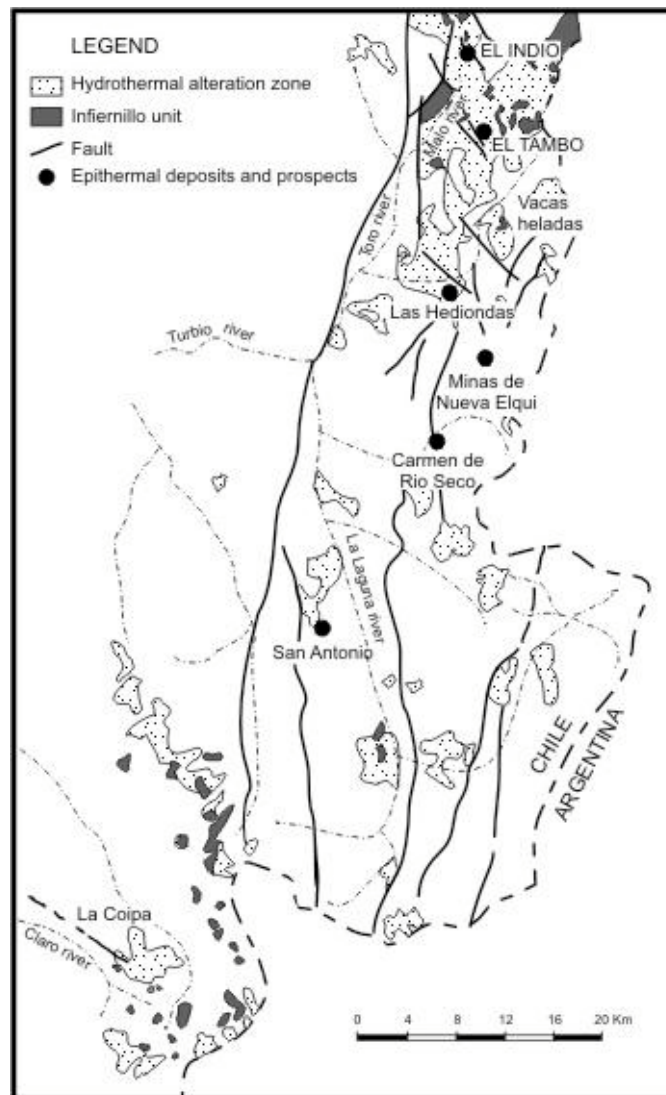
<sup>1</sup>Departamento de Cristalografía y Mineralogía, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense, 28040 Madrid, España; <sup>2</sup>Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología, Universidad Rey Juan Carlos, Tulipán s/n, 28933 Móstoles (Madrid), España; <sup>3</sup>Departamento de Ingeniería Geológica y Minera, Escuela Universitaria Politécnica de Almadén, Universidad de Castilla-La Mancha, Plaza M. Meca 1, 13400 Almadén, España; <sup>4</sup>Departamento de Minas, Facultad de Ingeniería and CEAZA, Universidad de La Serena, Casilla 554, La Serena, Chile; <sup>5</sup>Departamento de Minas, Facultad de Ingeniería, Universidad de La Serena, Casilla 554, La Serena, Chile.

La cuenca hidrográfica del río Elqui tiene unos 9800 km<sup>2</sup> (Fig. 1), incluye numerosos ríos, y alberga un alto número de yacimientos minerales (parte de ellos en explotación) y zonas de alteración hidrotermal. Para cubrir esta zona se decidió realizar un estudio combinado, de geoquímica y mineralogía ambiental, centrado en los sedimentos fluviales del río principal y sus tributarios de gran altitud.



**Fig. 1. La cuenca hidrográfica del río Elqui (línea de segmento). En color gris: área cubierta por la figura 2.**

Se ha pensado que la contaminación por arsénico en el río Elqui es debida a las labores mineras realizadas aguas arriba en el distrito de El Indio – Tambo (Fig. 1), desde donde se extraían menas auríferas con importantes contenidos arsenicales. Sin embargo, como se ha podido comprobar en otros distritos mineros, el origen de la contaminación no es siempre lo que parece, y los procesos industriales suelen mezclarse con los de origen natural (distrito de mercurio de Almadén, España; Higuera et al., 2003). Tomando en cuenta la actividad minera y la geología de la zona, había dos posibles fuentes para el arsénico: 1) las actividades mineras y metalúrgicas llevadas a cabo en el distrito de El Indio – Tambo; y 2) la importante faja de zonas de alteración hidrotermal desarrolladas en la alta cordillera durante el Mioceno (Fig. 1, 2).



**Fig. 2. Zonas de alteración hidrotermal, yacimientos epitermales de Au-Ag, y prospectos. Basada en Maksaev et al. (1984).**

### **Marco climático y fisiográfico de la zona de estudio**

Para poder entender adecuadamente un problema de contaminación no basta con realizar una campaña de toma de muestras para su estudio geoquímico, además deberemos contar con información sobre el clima, el marco geológico, y por supuesto, sobre la actividad industrial que se realiza en la zona bajo estudio.

Los yacimientos de El Indio – Tambo y las principales zonas de alteración (Fig. 2) se encuentran localizados en el corazón de la cadena andina, un área que incluye montañas tales como Doña Ana (5690 m) o el cerro Tórtolas (6330 m) (Fig. 3).



**Fig. 3. Marco fisiográfico de las zonas de alteración; note los intensos colores rojizo y amarillento de las montañas debido a los procesos de alteración hidrotermal. Al fondo el cerro Tórtolas (6330 m).**

Algunas de las labores mineras de El Indio se localizan a 4400 m sobre el nivel del mar, y se encuentran solo a 125 km de la costa, lo que genera un gradiente de altitud muy pronunciado. Las precipitaciones en esta zona de altura (nieve + lluvia) son de unos 180 mm (media últimos 20 años), con un mínimo de 27 mm en 1981 y un máximo de 740 mm en 1987 (Maturana et al., 2001). Sin embargo, bajo una perspectiva geológica, más amplia en el tiempo, toda la región del denominado “Norte Chico” de Chile (27°-33° S) ha estado sujeta a importantes cambios climáticos durante el Holoceno. Estos cambios han sido el resultado de la fuerte variabilidad de los vientos del Oeste (*Westerlies*) (Veit, 1996). Un incremento en la actividad de estos vientos, con actividad de frentes, se correlaciona bien con los años de El Niño. Se han observado por lo menos ocho eventos El Niño con inundaciones asociadas en los últimos 50 años (Jenny et al., 2002). Se ha sugerido un incremento en la actividad de los vientos del Oeste en el Norte Chico durante los siguientes períodos en el Holoceno: 1) antes de hace 7300 años; 2) entre 5000-3700 años atrás; 3) entre 3000-1800 años atrás; y 4) hace cerca de 200 años (Veit, 1996). Estos períodos hay que entenderlos solo como grandes ciclos lluviosos, cada uno de los cuales comprende a su vez series de lluvia-sequía. Un año importante de El Niño suele tener consecuencias catastróficas en la cuenca del Elqui, como aquellas de 1997, cuando carreteras y puentes fueron cortados por aluviones, literalmente aislando la región del resto del país.

El sector de la mina de El Indio está cortado por el río Malo (Fig. 2), el cual a su vez es uno de los tributarios orientales del Elqui. El río Malo es parte de un sistema fluvial de gran altitud (SFGA) de ríos tributarios, que comprende entre otros al río Toro,

el que junto al río La Laguna converge al río Turbio (Fig. 1, 2). El SFGA es particularmente relevante al marco ambiental de la cuenca, ya que estos ríos drenan la faja de zonas de alteración hidrotermal e importantes depósitos minerales y prospectos como El Indio o Vacas Heladas (Fig. 2). En otras palabras, el SFGA drena una zona rica en metales pesados.

### **Marco geológico y metalogénico**

La geología de la cuenca del Elqui incluye una gran variedad de unidades geológicas que van desde el Terciario al Paleozoico. A una escala de mayor detalle el dominio de gran altitud de la región incluye una serie de secuencias volcánicas del Terciario, entre las cuales dos son particularmente relevantes bajo el punto de vista metalogénico (Maksaev et al., 1984): la Formación Doña Ana (Oligoceno Superior – Mioceno Inferior), con riolitas, tobas riolíticas, andesitas, y andesitas basálticas, y la llamada Unidad Infiernillo (Mioceno Inferior). Esta última unidad intruye a la Formación Doña Ana, y consiste de pequeños cuerpos de granito, granodiorita, monzodiorita, y pórfidos andesíticos. Estas intrusiones indujeron fenómenos de alteración hidrotermal generalizados que entre otros, dieron lugar a la formación de depósitos minerales como El Indio. Las zonas de alteración hidrotermal (Fig. 2) incluyen asociaciones minerales típicas de la alteración argílica avanzada, con caolinita, alunita, y jaspes silíceos. El desarrollo de estos minerales, junto a otros típicos de la alteración supergénica (limonitas: goethita, jarosita), le da a la zona brillantes colores que van desde el violáceo, al rojo hasta los colores amarillentos (Fig. 3).

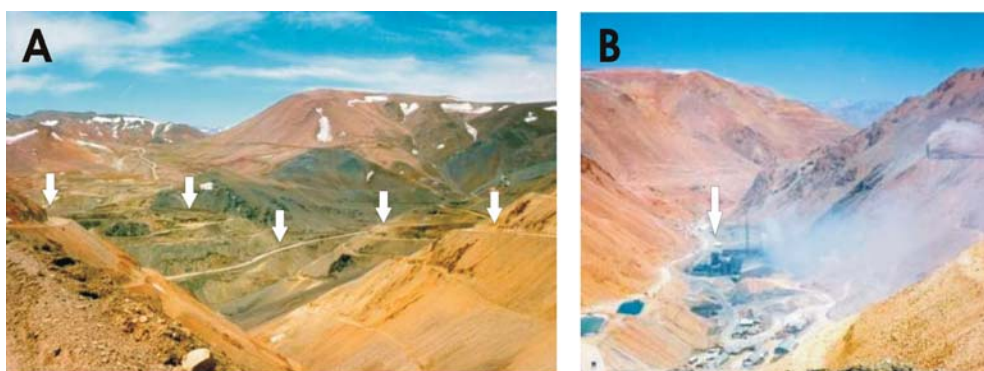
Otra unidad geológica destacable en la zona de estudio es una secuencia de sedimentos lacustres de unos 10 m de potencia, que se presenta como afloramientos colgados en las pendientes de los montes. Su edad  $C^{14}$  es de  $9640 \pm 40$  años, esto es, Holoceno Inferior. La secuencia puede representar los remanentes de un antiguo lago que probablemente se formó en respuesta a períodos muy lluviosos, con desarrollo de avalanchas de roca que habría represado el paleo sistema fluvial del Elqui. Fenómenos equivalentes de represado han sido observados en otros sectores de la cadena andina (Trauth et al., 2000).



**Fig. 4. Secuencia lacustre del Holoceno Inferior, en la zona del Río Toro.**

### **Marco Industrial**

Los yacimientos de El Indio – Tambo tienen una historia minera (Lagos y Velasco, 1998) que se inicia en los años 1960's. Sin embargo los primeros trabajos fueron de escasa envergadura, y no es hasta 1975 (cuando la propiedad es adquirida por la compañía St Joe Gold Corporation) que empieza una minería de cierta envergadura. Estos yacimientos cambiaron de mano varias veces durante los años 1980's, siendo primero adquiridos por Fluor Company (1981), luego por Alan Bond Group (1987), y finalmente por Lac Minerals (Barrick Gold Corporation). La mina El Indio ha sido explotada a cielo abierto y en subterráneo (Fig. 5a), mientras que Tambo es una operación a cielo abierto. Ambas minas estaban cerrando sus operaciones el año 2003.



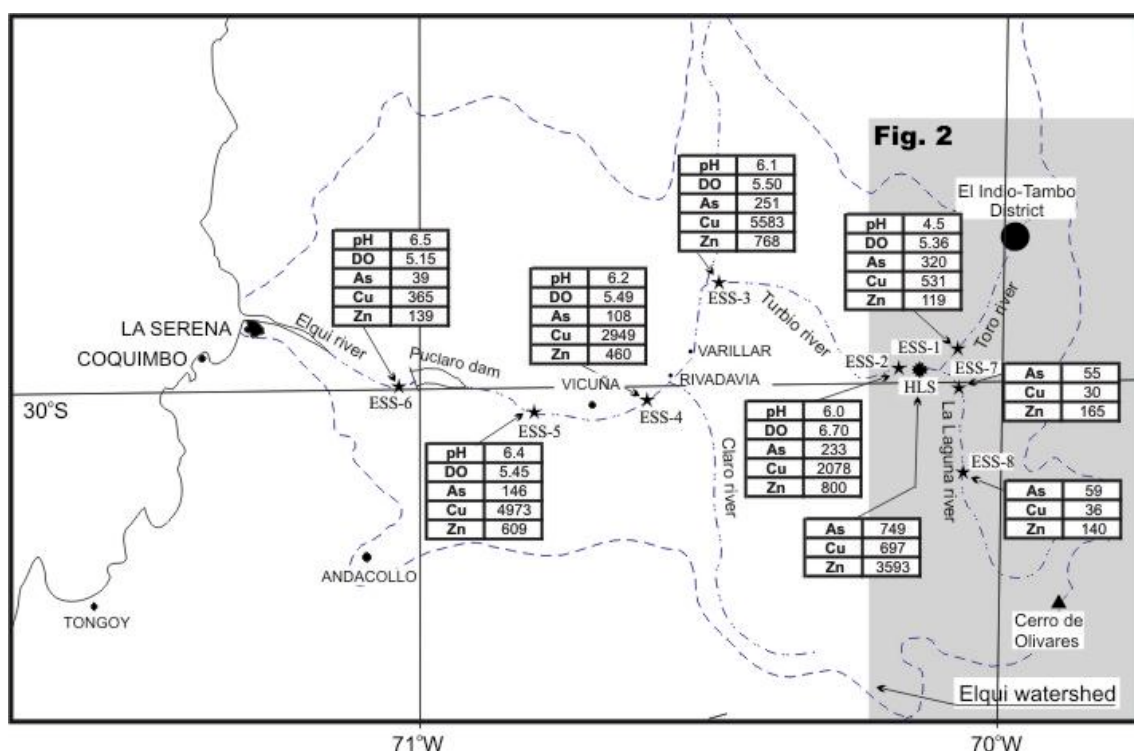
**Fig. 5. La mina del El Indio (A; las flechas indican importante remoción de materiales) y su complejo metalúrgico (B; flecha).**

La mena seca extraída de El Indio era enviada a una planta con capacidad de 2600 t/d. Ahí el mineral era cianurado y flotado. El concentrado de cobre

(principalmente de la flotación de la enargita) contenía 20 % Cu, 50 g/t Au, 300 g/t Ag, y 8 % As. Dicho concentrado era luego tratado en un tostador para remover el arsénico (Fig. 5b), donde después de varios pasos era precipitado como trióxido ( $As_2O_3$ ).

### Geoquímica de los sedimentos fluviales

Los trabajos de toma de muestras de sedimentos fluviales se realizaron en sectores de acceso posible. Los ríos, Toro, La Laguna, Turbio y Elqui entregan una información más que adecuada como para poder evaluar el comportamiento de los elementos traza en el sistema. Se tomaron 14 muestras de sedimentos de río (muestras ESS) y 14 de la secuencia lacustre del Holoceno (muestras HLS) (Fig. 6).



**Fig. 6. Situación de las estaciones de toma de muestras de sedimentos, indicándose además los valores medios de As, Cu, y Zn (en ppm), y el pH y contenidos en oxígeno disuelto (DO) en las aguas (en mg/l).**

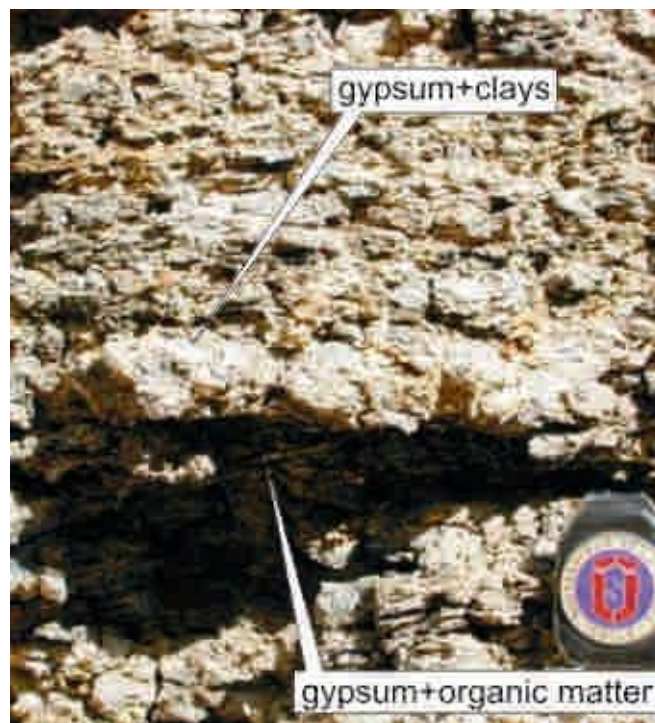
Las muestras ESS fueron tomadas en los bordes de los ríos, centrándose en la fracción de tamaño limo. Las muestras HLS fueron tomadas con objeto de estudiar las posibles variaciones geoquímicas en la vertical y horizontal de la secuencia. Las muestras fueron secadas y tamizadas, seleccionándose la fracción inferior a 60  $\mu m$ , digeridas en agua regia y ácido clohídrico, y analizadas por absorción atómica, con límites de detección de 2 ppm para As, 1 ppm para Cu y Zn, y 0.01 % para Fe. La

mineralogía de los sedimentos fue estudiada mediante difracción de rayos X (DRX) y los análisis microquímicos de los minerales se realizaron mediante SEM-EDX.

## Resultados y discusión

### 1. Los sedimentos: caracterización mineralógica y geoquímica

Los estudios de DRX muestran que los sedimentos presentan tres constituyentes principales: 1) una fracción de silicatos, con cuarzo, plagioclasa, y filosilicatos que incluyen montmorillonita, caolinita, y moscovita, estos últimos en una proporción de ~ 2:2:1 (intensidad relativa); 2) una fracción oxidada de hierro de baja respuesta en los difractogramas, que sugiere la presencia de goethita de baja cristalinidad; y 3) sales, con halita, yeso, y bloedita ( $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ). El yeso es particularmente abundante en la secuencia lacustre del Holoceno (Fig. 4), donde se puede encontrar tanto en capas ricas en materia orgánica como en arcillas (Fig. 7).

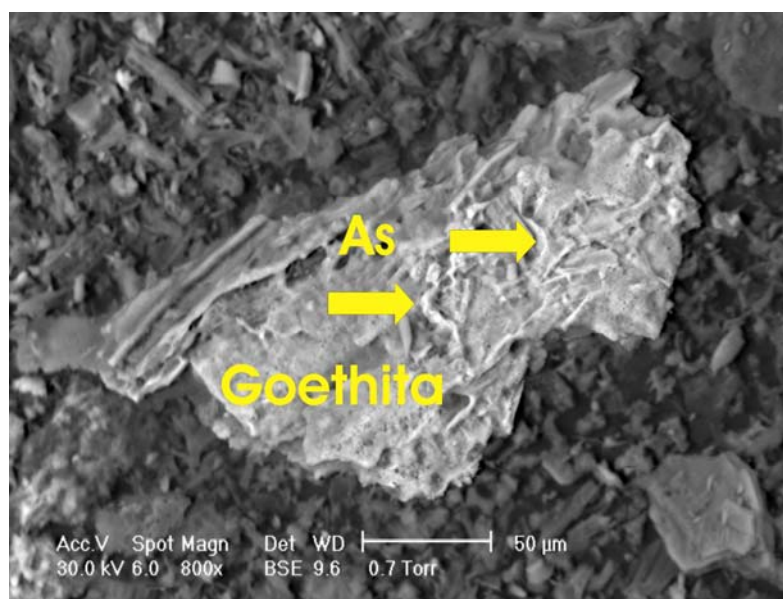


**Fig. 7. Yeso (*gypsum*) en horizontes ricos en arcillas (*clays*) o materia orgánica de la secuencia lacustre del Holoceno Inferior.**

Los análisis SEM-EDX muestran una notable asociación entre la fase oxidada de hierro y el arsénico (Fig. 8). Por ejemplo, los análisis de las partículas de óxidos de hierro presentan contenidos de: As (1.53-2.35 %), Cu (trazas – 0.89 %), Zn (trazas-0.44 %), Fe (35.2-52.2 %), con muy poco azufre (1.45-4.36 %), lo que sugiere que la fase



oxidada se derivó de la oxidación prácticamente total de minerales sulfurados. Cabe destacar que no se detectaron contenidos de As en otras fases minerales.



**Fig. 8. Imagen SEM-EDX, BSE de un grano de goethita. Los sectores más claros marcan la presencia de arsénico (flechas).**

Los sedimentos están fuertemente enriquecidos en arsénico, cobre y zinc. Comparados con valores de sedimentos de referencia (Rössler and Lange, 1972), cobre y zinc se encuentran enriquecidos por un factor de 119 y 184 veces. Comparadas a valores de referencia para arsénico (FE1, FE2), las muestras de este estudio (Tabla 1) se encuentran enriquecidas por factores de 1.4-89.4 (ESS) y 4.2-468 (HLS) veces (Tabla 1). Esto muestra la importancia de la contaminación en los sedimentos, y llama la atención sobre la secuencia lacustre, que debe ser considerada como un depósito secundario de arsénico muy importante.

Aunque en esta investigación no se estudió la distribución de arsénico en las aguas, datos para el año 1995 indican valores de  $1.514 \text{ mg l}^{-1}$  en el río Toro,  $0.227 \text{ mg l}^{-1}$  en Varillar, y  $0.008 \text{ mg l}^{-1}$  en La Serena (ver figura 1 para la localización), lo cual muestra un notable decrecimiento de los valores de arsénico aguas abajo.

## **2. Comportamiento geoquímico del arsénico: fuentes potenciales y transporte**

El comportamiento geoquímico del arsénico en las aguas naturales difiere al de otros cationes (Smedley y Kinniburgh, 2002). Por ejemplo, el arsénico es móvil bajo un

amplio rango de valores de Eh y pH, ya sea como oxianiones de arsenito ( $\text{As}^{3+}$ ) o arsenato ( $\text{As}^{5+}$ ).

Muestra	As(ppm)	As(FE1)	As(FE2)	Cu(ppm)	Zn(ppm)	Fe(%)
ESS-1(a)	327	11.5	65.4	550	98	4.5
ESS-1(b)	485	17.1	97.0	405	129	9.4
ESS-1(d)	150	5.3	30.0	638	129	4.9
ESS-2(a)	231	8.1	46.2	4293	558	4.8
ESS-2(b)	122	4.3	24.4	1281	331	4.0
ESS-2(c)	347	12.2	69.4	660	1511	5.4
ESS-3(a)	138	4.9	27.6	3832	491	3.6
ESS-3(b)	168	5.9	33.6	6129	647	4.7
ESS-3(c)	447	15.7	89.4	6789	1166	4.8
ESS-4(a)	108	3.8	21.6	2949	460	2.9
ESS-5	146	5.1	29.2	4973	609	3.4
ESS-6	39	1.4	7.8	365	139	4.7
ESS-7(II)	55	1.9	11.0	30	165	6.5
ESS-8(II)	59	2.1	11.8	36	140	4.9
Mean	202	7.1	40.3	2352	470	4.9
SD	145	5.1	28.9	2415	423	1.6
HLS-1(25)	647	22.8	129.4	524	1770	4.2
HLS-4	354	12.5	70.8	253	728	3.8
HLS-5	909	32.0	181.8	599	1427	4.9
HLS-7	1122	39.5	224.4	1390	4066	9.1
HLS-9	455	16.0	91.0	312	951	3.9
HLS-10	119	4.2	23.8	111	518	3.1
HLS-11	2344	82.5	468.8	685	1810	11.0
HLS-12	487	17.1	97.4	583	8143	6.7
HLS-13	557	19.6	111.4	889	3868	1.1
HLS-14	577	20.3	115.4	1590	14765	4.8
HLS-15	302	10.6	60.4	401	2285	4.0
HLS-16	597	21.0	119.4	742	8907	4.6
HLS-16(a)	629	22.1	125.8	214	650	6.2
HLS-17	1393	49.0	278.6	1462	412	5.5
Media	749	26.4	149.9	697	3593	5.2
DS	544	19.9	112.9	460	4056	2.4

**Tabla 1: Resultados químicos para las muestras ESS (sedimentos fluviales) y HLS (sedimentos lacustres del Holoceno). FE: (factor de enriquecimiento en arsénico) = muestra/valor de referencia; FE1: 28.4 ppm As, *North American Shale Composite* (NASC) (Gromett et al., 1984); FE2: 5 ppm As, promedio mundial para sedimentos de río (Smedley and Kinniburgh, 2002). DS: desviación estándar.**

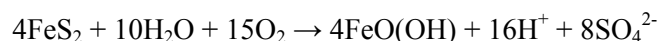
Si las condiciones son oxidantes las especies de arsenato (e.g.,  $\text{HAsO}_4^{2-}$ ) dominan sobre las de arsenito (e.g.,  $\text{H}_2\text{AsO}_3^-$ ). Las fuentes naturales de arsénico son variadas, aunque las principales son las zonas geotérmicas y los yacimientos minerales, mientras que las de origen antrópico se encuentran relacionadas entre otros con la

industria minera que trata menas con arsénico. Por otra parte, no solo los minerales arsenicales (arsenopirita:  $\text{FeAsS}$ ; enargita:  $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ ; o tennantita:  $(\text{Cu},\text{Fe})_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$ ) deben ser considerados como fuentes potenciales de arsénico, ya que la pirita también puede ser muy rica en este elemento, con contenidos de hasta 7.7 % As (Smedley y Kinniburgh, 2002). Aunque las rocas ígneas suelen ser pobres en arsénico, las tobas volcánicas pueden dar lugar a aguas ricas en el elemento (Smedley et al., 2002). Estos datos son particularmente importantes para el análisis de la cuenca del Elqui, debido a la presencia de importantes afloramientos de tobas (Formación Doña Ana) y el carácter geotérmico que tiene el origen de las zonas de alteración del Mioceno (Fig. 2). Por otra parte, la mineralización de El Indio es particularmente rica en arsénico, reconociéndose dos tipos de filones (Siddeley y Araneda, 1986): 1) sulfuros masivos (enargita-pirita); y 2) cuarzo-oro. Los filones del primer tipo antes de su explotación tenían hasta 200 m de largo y 0.5-12 m de potencia, con leyes de 6-12 % Cu, 4-10 g/t Au, 60-120 g/t Ag. Los filones de cuarzo-oro tenían hasta 200 m de largo y 0.5-6 m de potencia. Estos filones poseían sectores extremadamente ricos en oro, como muestra un análisis inicial de 3500 g/t Au, el que luego dio nombre a uno de los cuerpos mineralizados (veta 3500). Estas venas tenían también arsénico y azufre, con valores de 1.7 % As y 7.4 % S.

La oxidación y lixiviación de las menas arsenicales en el ambiente de superficie lleva a la formación de  $\text{H}_3\text{AsO}_4$  (e.g., Escobar et al., 1997):



Sin embargo, a medida que el pH aumenta el  $\text{H}_3\text{AsO}_4$  se hace inestable y la especie acuosa de arsénico dominante es  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  (pH > 2; Smedley and Kinniburgh, 2002). Por otra parte, la oxidación de la pirita produce goethita:



La goethita coloidal posee una carga positiva neta (e.g., Seaman et al., 1997) en ambientes ácidos, lo cual le permite ligar iones complejos de arsénico por adsorción. Estos iones adsorbidos pueden permanecer como tales hasta pHs altos, del orden de 8.0-8.5 (Smith, 1999; Smedley and Kinniburgh, 2002). La desorción de arsénico de la goethita puede ocurrir por: 1) la competición entre cargas negativas por el coloide positivo; 2) una reducción de la fase de hierro oxidada (Meng et al., 2002); o 3) por valores altos de pH (> 8.5). Dadas las características de Eh-pH del ambiente superficial donde se verifica la oxidación de las menas sulfuradas y arsenicales (alteración supergénica), esto es, una de las fuentes potenciales de As, podemos descartar las alternativas 2 y 3. Aquellos iones complejos de As que no sean adsorbidos por la

goethita migrarán en solución ya sea como  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  a  $\text{pH} = 2-7$  o como  $\text{HAsO}_4^{2-}$  a  $\text{pH} \geq 7$  (Smedley and Kinniburgh, 2002). Ya que los pHs medidos en las estaciones ESS varía de 4.5 a 6.5 (Fig. 6) podemos inferir que la especie acuosa dominante de arsénico es  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ .

Dado el carácter montañoso de la potencial zona fuente, la gran altitud, y el desarrollo periódico de episodios de El Niño (en promedio cada 3-4 años), podemos asumir que el regolito rico en As que cubre las montañas alteradas es fácilmente lavado y transportado a los ríos de la zona. A estos procesos naturales tenemos que sumar los derivados de la actividad minera en la zona en el distrito minero de El Indio – Tambo durante los últimos 25 años, los que incluyen aperturas de cortas (*open pits*) y la construcción de carreteras (entre otros) (Fig. 5a).

Así, podemos inferir al menos dos mecanismos de incorporación del arsénico al sistema fluvial en la zona de estudio: 1) como iones complejos no adsorbidos, del tipo  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ ; y 2) como especies de As adsorbidas a goethita que es removida de las montañas por erosión y trabajos mineros.

Mientras los ambientes reductores llevan a la desorción del arsénico de la fase oxidada de hierro (Smedley and Kinniburgh, 2002), el ambiente oxidante de la cuenca del Elqui provee de condiciones oxidantes ( $5.15-6.70 \text{ mg l}^{-1}$  de  $\text{O}_2$  disuelto; estaciones 1-6) (Fig. 6), permitiendo la estabilidad de la goethita, y por lo tanto, de las especies de arsénico ligadas a ésta.

### **3. Procesos industriales versus procesos geológicos**

Esta investigación entrega importantes enseñanzas en lo que se refiere al estudio de zonas contaminadas por metales pesados. Dada la naturaleza de los trabajos mineros en el distrito minero de El Indio – Tambo era relativamente fácil, a primera vista, encontrar un claro culpable en lo que respecta a la contaminación por arsénico en la cuenca del Elqui. Sin embargo, para analizar correctamente el tema del Elqui es muy importante tomar en cuenta otro factor: una vez que comienzan los procesos erosivos de un yacimiento, los metales son lixiviados y transportados, dando lugar a lo que podríamos llamar un proceso de ‘contaminación natural’ de los ríos. Mientras más prolongado el proceso, más grande serán los efectos. Ahora bien, si tomamos en cuenta que la secuencia lacustre de Holoceno también presenta altos valores de arsénico (Tabla 1), tendremos que concluir que el problema de la contaminación en esta zona data desde hace unos 10.000 años. ¿Significa esto que las actividades mineras en la zona no tienen

nada que ver con el problema de la contaminación? Difícilmente, sería poco razonable pensar que la preparación de las áreas mineras, la extracción de minerales, y la metalurgia no han contribuido al menos con cierto arsénico al sistema. Sin embargo, es importante que sepamos que en el caso del Elqui no basta con cerrar la mina de El Indio o su operación metalúrgica para que la contaminación cese de existir. Dado que se trata de un problema milenario, es importante que las autoridades tomen este dato en consideración para cualquier análisis futuro de riesgos ambientales en la zona y su eventual remediación.

## Conclusiones

En ausencia de la secuencia lacustre de edad Holocena habría sido difícil evaluar la importancia relativa de los procesos naturales. Es más, es posible que toda la culpa de la contaminación hubiera recaído en la actividad industrial. Sin embargo, como muestran los datos geoquímicos, esta secuencia presenta altísimos valores de arsénico, y dada su edad, podemos deducir que el proceso se inició hace miles años atrás.

Sin embargo ¿cómo y por qué se inició el proceso de contaminación natural en la cuenca del Elqui? La edad de la secuencia Holocena ( $9640 \pm 40$  años) puede ofrecernos algunas pistas. La sedimentación lacustre podría haber empezado inmediatamente después del abrupto fin de la denominada *Younger Dryas*, último periodo global de condiciones climáticas frías y secas. Este momento coincide a su vez con el comienzo de las condiciones más suaves y lluviosas que dieron inicio al denominado ‘Óptimo del Holoceno’. Bajo estas nuevas condiciones climáticas la lluvia y las temperaturas se incrementaron y los glaciares comenzaron a fundirse. En el caso de la zona de estudio, esto también coincide con una influencia mayor de los vientos del Oeste (*Westerlies*) (Veit, 1996), los que traen actividad frontal y lluvias a Chile central y Sur (e.g., Jenny et al., 2002). Este escenario climático puede explicar adecuadamente la aparición de las facies lacustres ricas en arsénico en el sistema del ‘paleo-Elqui’. Intensas lluvias y nevadas, sumadas a rápidos deshielos y terremotos (la región es muy activa sísmicamente; Pardo et al., 2002) explicarían dos puntos principales: 1) un incremento de la erosión en las zonas de altura (donde se localizan los yacimientos de Au-Cu-As), y por lo tanto, un mayor transporte de As a los ríos; y 2) fenómenos de represado natural en los ríos que habrían llevado a la formación de lagos de altura, donde se habrían depositado los sedimentos ricos en arsénico.

## Bibliografía

- Bissig, T., Clark, A.H., Lee, J.K.W., Hodgson, C.J., 2002a. Miocene landscape evolution and geomorphologic controls on epithermal processes in the El Indio-Pascua Au-Ag-Cu belt, Chile and Argentina. *Econ. Geol.*, 97: 971-996.
- Bissig, T., Clark, A.H., Lee, J.K.W., 2002b. Cerro del Vidrio rhyolitic dome: evidence for Late Pliocene volcanism in the central Andean flat-slab region, Lama-Veladero district, 29°20'S, San Juan province, Argentina. *J. S. Am. Earth Sci.*, 15: 571-576.
- Escobar, B., Huenupi, E., Wiertz, J.V., 1997. Chemical and biological leaching of enargite. *Biotech. Lett.*, 19: 719-722.
- Gromet, L.P., Dymek, R.F., Haskin, L.A., Korotev, R.L., 1984. The North American Shale Composite: its compilation, major and trace element characteristics. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 48: 2469-2482.
- Guevara, S., 2003. Distribución y comportamiento de metales pesados en las aguas del río Elqui y sus tributarios. Graduation Project, Universidad de La Serena, La Serena, Chile.
- Higueras, P., Oyarzun, R., Biester, H., Lillo, J., Lorenzo, S., 2003. A first insight into mercury distribution and speciation in soils from the Almadén mining district, Spain. *J. Geochem. Explor.*, 80: 95-104.
- Jenny, B., Valero-Garcés, B.L., Urrutia, R., Kelts, K., Veit, H., Appleby, P.G., Geyh, M., 2002. Moisture changes and fluctuations of the Westerlies in mediterranean Central Chile during the last 2000 years: the Laguna Aculeo record (33°50'S). *Quaternary Int.*, 87: 3-18.
- Lagos, G., Velasco, P., 1998. Environmental policies and practices in Chilean Mining. In: A. Warhurst (Editors), *Mining and the Environment (on-line version)*, IDRC, Ottawa, <http://www.idrc.ca/books/focus/828/chapter3.html>.
- Maksaev, V., Moscoso, R., Mpodozis, C., Nasi, C., 1984. Las unidades volcánicas y plutónicas del Cenozoico Superior en la alta cordillera del Norte Chico (29°-31°S): geología, alteración hidrotermal y mineralización. *Rev. Geol. Chile*, 21: 11-51.
- Maturana, H., Oyarzún, J., Pasieczna, A., Paulo, A., 2001. Geoquímica de los sedimentos del río Elqui (Coquimbo, Chile): manejo de relaves y cierre de

- minas. Final Proc 7<sup>th</sup> Argentinian Congr. Econ. Geol. Salta, Argentina, pp. 155-161.
- Meng, X., Korfiatis, G.P., Bang, S., Bang, K.W., 2002. Combined effects of anions on arsenic removal by iron hydroxides. *Toxicol. Lett.*, 133: 103-111.
- Pardo, M., Comte, D., Monfret, T., Boroshek, R., Astroza, M., 2002 The October 15, 1997 Punitaqui earthquake (Mw = 7.1): a destructive event within the subducting Nazca plate in central Chile. *Tectonophysics*, 345: 199-210.
- Seaman, J.C., Bertsch, P.M., Strom, R.N., 1997. Characterization of colloids mobilized from southeastern coastal plains sediments. *Environ. Sci. Technol.* 31: 2782-2790.
- Siddeley, G., Araneda, R., 1986. The El Indio-Tambo gold deposits. In: A.J. Macdonald (Editor), *Gold' 86, International Symposium on the Geology of Gold*. Balkema, Amsterdam, pp. 3-22.
- Smedley, P.L., Kinniburgh, D.G., 2002. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Appl. Geochem.*, 17: 517-568.
- Smedley, P.L., Nicolli, H.B., Macdonald, D.M.J., Barros, A.J., Tullio, J.O., 2002. Hydrogeochemistry of arsenic and other inorganic constituents in groundwaters from La Pampa, Argentina. *Appl. Geochem.*, 17: 259-284.
- Smith, K.S., 1999. Metal sorption on mineral surfaces: an overview with examples relating to mineral deposits. In: G.S. Plumlee and M.J. Logsdon (Editors), *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits. Reviews in Economic Geology*, volume 6A, Society of Economic Geologists, Chelsea, Michigan, pp. 161-182.
- Stipp, S.L.S., Hansen, M., Kristensen, R., Hochella, M.F., Bennedsen, L., Dideriksen, K., Balic-Zunic, T., Léonard, D., Mathieu, H.J., 2002. Behaviour of Fe-oxides relevant to contaminant uptake in the environment. *Chem. Geol.*, 190: 321-337.
- Trauth, M.H., Alonso, R.A., Haselton, K.R., Hermanns, R.L., Strecker, M.R., 2000. Climate change and mass movement in the NW Argentine Andes. *Earth Plan. Sci. Lett.*, 179: 243-256.
- Veit, H., 1996. Southern Westerlies during Holocene deduced from geomorphological and pedological studies in Norte Chico, northern Chile. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 123: 107-119.