

# Investigando temas minero-ambientales en el norte de Chile: más allá de los megaproyectos, la investigación formateada y la retórica ambientalista

El mundo moderno de la investigación está plagado de proyectos con curiosos acrónimos; cada proyecto con ingentes números de investigadores de diferentes universidades u organismos de investigación (nacionales o internacionales) y objetivos a veces más destinados a “encajar” en las “grandes” líneas de investigación que cualquiera otra cosa. Hay que estar “en el ajo”, porque el que se mueve “no sale en la foto”, léase: no obtiene fondos de investigación, que tal como están las cosas hoy en día, son “la sal” de la vida de los organismos de investigación. ¿Pero es esto así sin más? ¿Existen caminos alternativos al (burocráticamente) estricto control ejercido por el sistema? ¿Puede la investigación y los investigadores escapar de los formatos impuestos? A continuación contamos una historia sobre cómo se puede realizar ciencia aplicada de calidad mediante procedimientos “alternativos”; cómo se pueden abordar seriamente temas de interés científico y social y, sobre todo, por qué hay que huir de las hipótesis de trabajo rígidas.

**TEXTO** | Roberto Oyarzun, geólogo, Facultad de Ciencias Geológicas (UCM); Pablo Higuera, geólogo, Escuela de Minas de Almadén (UCLM); Javier Lillo, geólogo, Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología (URJC); Jorge Oyarzún, geólogo, Departamento de Minas (ULS, Chile); Hugo Maturana, químico, Departamento de Minas (ULS, Chile)

**FOTOS** | Roberto Oyarzun y Paloma Cubas (UCM)

Palabras clave  
**Minería, Chile, Grupo de Estudios en Minería y Medio Ambiente, proyectos de investigación**

Lejos de la retórica de la colaboración España-Iberoamérica y, más aún, del complejo entramado de los grandes proyectos de investigación, a comienzos de la primera década de 2000, un grupo de geólogos de las universidades de Castilla-La Mancha (UCLM), Complutense (UCM), La Serena (ULS, Chile) y Rey Juan Carlos (URJC) comenzó a desarrollar una serie de trabajos de investigación en temas minero-ambientales en el norte de Chile. Como resultado de estos contactos y trabajos iniciales que mostramos a continuación, se creó el GEMM (Grupo de Estudios en Minería y Medio Ambiente), grupo virtual a través de Internet, de acceso libre ([www.aulados.net/GEMM/GEMM.html](http://www.aulados.net/GEMM/GEMM.html)), que, en la actualidad, sirve como plataforma docente y de investigación a través de los numerosos cursos y publicaciones *online* allí presentes. En la actualidad, las labores de geólogos, pero también de químicos y biólogos del GEMM, se extienden a través de diversas regiones de España (Almería, Asturias, Castilla-La Mancha, Murcia) y más países de Iberoamérica, incluyendo Bolivia y Venezuela.

A lo largo de estos años, los profesionales del GEMM han desarrollado un amplio abanico de investigaciones, que pasan por el estudio de la dispersión de metales

pesados y metaloides en cuencas fluviales y el estudio de fases minerales nocivas para la salud humana, tanto en España como en Chile, y ahora, en otros países iberoamericanos: Bolivia y Venezuela.

En este trabajo nos centraremos en parte de las investigaciones llevadas a cabo en Chile, describiendo cómo, con escasos recursos económicos, se pueden alcanzar metas importantes en el terreno de la investigación minero-ambiental. Explicaremos además cómo ocurren “de verdad” las cosas durante el curso de una investigación o sobre cómo el viejo dicho de “donde dije *digo*, digo *Diego*”, se transformó a veces en toda una realidad y, sobre todo, cómo y por qué “hay” que tener ideas, pero no ideas “fijas”. A continuación se esbozan los antecedentes del tema, el marco geológico, fisiográfico y climático, y se reseñan tres “paradojas ambientales” que surgieron durante el curso de las investigaciones. Estas últimas están planteadas en tres apartados que podríamos denominar:

- 1) La contaminación milenaria.
- 2) Contaminación en ausencia de actividades mineras.
- 3) En lo que se refiere a contaminación, el tamaño del yacimiento no importa.

## La región de Coquimbo (Chile): el estudio geoquímico de grandes cuencas fluviales en una región agrícola-minera

### Antecedentes del tema

Nadie decidió de la noche a la mañana que se iba a estudiar un vasto territorio en el norte de Chile. Por el contrario, los orígenes de estos trabajos fueron modestos y casi fortuitos en más de un sentido. Todo comienza en 2002, con el desplazamiento a Chile de tres geólogos de universidades españolas para estudiar temas de dispersión de metales pesados en el entorno de yacimientos minerales. De hecho, la cuenca del río Elqui (*figura 1*) era un blanco secundario, más bien en la categoría de un “Plan B” que un objetivo prioritario. Sin embargo, problemas de permisos de acceso a determinados sectores mineros acabaron transformando esta cuenca en nuestro objetivo principal.

Si bien todos los implicados en estas investigaciones conocían la presencia de importantes labores mineras en la alta cordillera (nacientes del río Elqui), en el sector de la mina El Indio (Au-Cu-As)

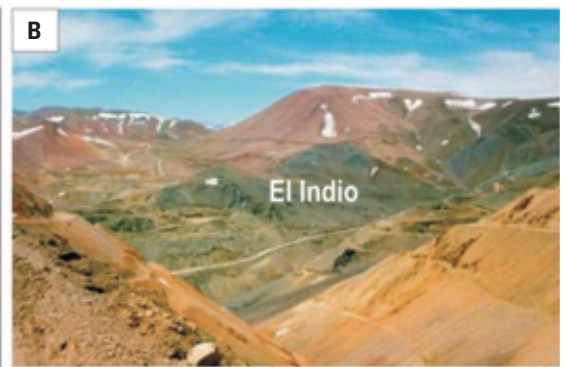


Figura 1. A: El ámbito de trabajo 2002-2006 (región de Coquimbo, Chile). Cuencas hidrográficas, red de toma de muestras y principales yacimientos, minas y prospectos mineros (modificada de Oyarzun et al., 2007b). B: La mina de El Indio, epitermal aurífero rico en cobre. C: El prospecto minero Coipita, en la faja metalogénica de El Indio. D: El pórfido cuprífero de Los Pelambres.

(figura 1B), nadie estaba preparado en 2002 para lo que iba a ocurrir después, cuando los primeros resultados de la campaña de muestreo de sedimentos fluviales estuvieron disponibles. Estos datos iban a cambiar radicalmente el enfoque de la investigación e incentivar el disponer de un conocimiento más amplio sobre una región con importantes mineralizaciones epitermales de metales preciosos y pórfidos cupríferos en la alta cordillera. Así, en el curso de los años 2002 a 2006, los estudios de geoquímica ambiental se trasladaron progresivamente más al sur en la región, hacia las grandes cuencas de los ríos Limarí y Choapa (figura 1), donde las "sorpresas" geoquímicas continuarían apareciendo.

Los trabajos ambientales se centraron en las tres principales cuencas hidrográficas de la región de Coquimbo (de norte a sur) (figura 1): Elqui (9.800 km<sup>2</sup>), Limarí (11.760 km<sup>2</sup>) y Choapa (8.124 km<sup>2</sup>). Las cuencas se estudiaron en este orden durante el curso de tres sucesivas campañas de campo en los años 2002, 2004 y 2006. El soporte económico básico lo proporcionó la Agencia Española de Cooperación Internacional (AECI, actualmente denominada AECID), la Oficina de Cooperación Internacional de la Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM) y la Dirección de Investigación de la Universidad de La Serena (ULS). Los fondos de la AECI cubrieron principalmente los costes de desplazamiento España-Chile, mientras que la logística interna en Chile fue

cubierta por la ULS. La UCLM y ULS se hicieron cargo, además, de los gastos analíticos de preparación de muestras y analítica de laboratorio. Los análisis se realizaron en Chile en la empresa Geoanalítica Ltda. ([www.geoanalitica.cl](http://www.geoanalitica.cl)), con una excelente relación calidad/precio. Parte del trabajo mineralógico (microscopía electrónica de barrido y difracción de rayos X) se realizó en el CAT de la Universidad Rey Juan Carlos.

Se analizaron un total de 75 muestras de sedimentos fluviales para definir anomalías geoquímicas en las cuencas de los ríos Elqui, Limarí y Choapa (figuras 1 y 2). Los trabajos (estudio de las tres cuencas) se realizaron por una suma de dinero mínima



Figura 2. Trabajos de campo en las cuencas hidrográficas. A: Sistema portátil para la medición de oxígeno disuelto en las aguas de río y pH. B y C: Toma de muestras en las cuencas de los ríos Elqui y Limarí (respectivamente).

comparada con las otorgadas a los grandes proyectos. No obstante, a efectos de lo que actualmente llaman “productividad científica”, de estas investigaciones se derivaron siete importantes publicaciones internacionales en revistas de las llamadas “de prestigio” incluidas en el *Science Citation Index*, así como numerosos trabajos presentados a reuniones científicas y seminarios. Esto no obstante es casi anecdótico; tan sólo una estadística de éstas que tanto gustan en determinados círculos. Lo auténticamente importante de estos trabajos es que permitieron entender “cómo y por qué” se produce la dispersión de metales pesados en una región andina, donde agricultura y minería están sujetas a una difícil convivencia (figuras 1 y 3). Estos trabajos permitieron entender además que no siempre la actividad minera es culpable de “todos” los males de una región, ya que existe además una contaminación natural por metales pesados y, por último, que no es igual la “huella geoquímica” dejada por un tipo de yacimiento mineral que por otro.

### Marco geológico, fisiográfico y climático

Para poder entender adecuadamente un problema de contaminación por metales pesados y metaloides, no basta con realizar una campaña de toma de muestras



Figura 3. El embalse de Puclaro (río Elqui). A: Aguas arriba. B: Aguas abajo donde se desarrolla una intensa agricultura.

para su estudio geoquímico, además se debe contar con información sobre el clima, el marco geológico y fisiográfico y, por supuesto, sobre la actividad minera que se realiza en la zona bajo estudio. Algunas de las labores mineras en la región de Coquimbo se localizan a más de 4.000 m sobre el nivel del mar, y se encuentran sólo a poco más de 100 km de la costa (figura 1), lo que genera un gradiente de altitud muy pronunciado. Las precipitaciones en esta zona de altura (nieve más lluvia) son de unos 180 mm.

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. Un año importante de El Niño suele tener consecuencias catastróficas para la región, como aquéllas de 1997, cuando carreteras y puentes fueron cortados por aluviones, aislando literalmente la región del resto del país. Estas lluvias tienen gran capacidad de arrastre de sedimentos y pueden tener efectos catastróficos en la remoción de escombreras de minerales, balsas, etc.

La geología de la IV Región de Chile incluye una gran variedad de unidades geológicas que van desde el Paleozoico al Terciario. De importancia metalogénica son dos:

- La faja del Cretácico inferior, que incluye unidades volcánicas, volcanosedimentarias y sedimentarias marinas, intruidas por un batolito granítico del Cretácico medio, dispuestas en una posición centro-occidental dentro de la región. Estas formaciones albergan, entre otros, importantes yacimientos de hierro tipo Kiruna, como el del Romeral, cobre-plata del tipo estratoligado (Talcuna), cobre-oro-mercurio, del tipo pórfido cuprífero, y epitermal (Andacollo), cobre-oro-mercurio del tipo epitermal (Punitaqui), manganeso del tipo estratoligado (Corral Quemado) y de plata epitermal (Arqueros) (Oyarzun *et al.*, 1996, 1998 y 2003) (figura 1).
- Una serie de secuencias volcánicas del Terciario, en el sector de la cordillera de los Andes, entre las cuales dos son particularmente relevantes bajo el punto de vista metalogénico (Maksaev *et al.*, 1984; Oyarzun *et al.*, 2007a): la formación Doña Ana (Oligoceno superior-Mioceno inferior), con riolitas, tobas riolíticas, andesitas y andesitas basálticas, y la llamada Unidad Infiernillo. Esta última intruye la formación Doña Ana y consiste en 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 de gran altitud como El Indio (Cu-Au-As) (Araneda, 1985; Bissig *et al.*, 2002) (figura 1B). Las zonas de alteración hidrotermal 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. Un poco más al sur de la faja de epitermales se encuentra un pórfido cuprífero del Mioceno superior de grandes dimensiones: Los Pelambres

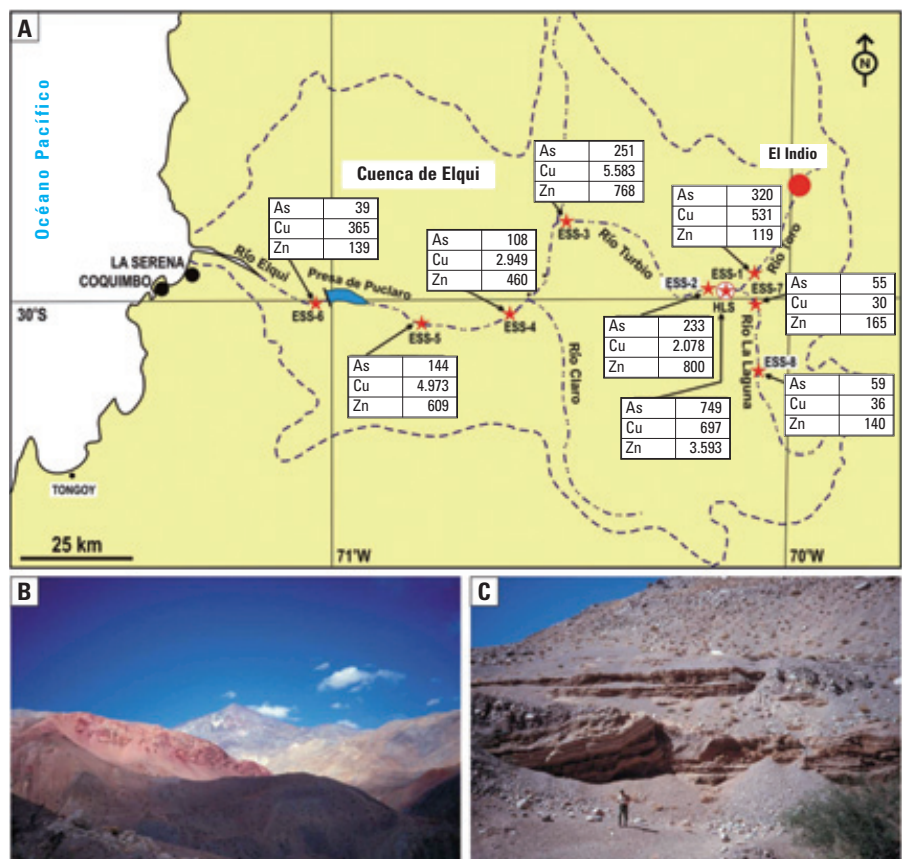


Figura 4. A: Muestreo de sedimentos fluviales del río Elqui y tributarios; los valores de Cu, Zn y As están expresados en  $\mu\text{g g}^{-1}$  (ppm); HLS: muestra de la secuencia lacustre de comienzos del Holoceno (modificada de Oyarzun *et al.*, 2004). B: Zonas de alteración en el sector cordillerano de El Indio, al fondo el cerro Tórtolas (6.155 msnm). C: Secuencia lacustre del Holoceno temprano.

(figura 1D). Éste (Guzmán, 1986) está albergado por un complejo intrusivo emplazado en una secuencia de rocas andesíticas del Cretácico superior. El complejo intrusivo comprende un *stock* principal tonalítico, pequeños pórfidos y algunos diques postmineralización de andesita y aplita. Las rocas fueron hidrotermalmente alteradas a facies potásica, propílica y fílica. Un aspecto destacado del pórfido de Los Pelambres es la escasa importancia de minerales ricos en arsénico (enargita, tennantita).

*Cuando crees tener respuestas y lo que se presentan son preguntas: contaminación milenaria en la cuenca del Elqui*

La campaña de muestreo de 2002 en la cuenca del Elqui mostró lo "esperable" en cuanto a la contaminación de los sedimentos fluviales. Los sedimentos estaban fuertemente enriquecidos en arsénico, cobre y zinc (figura 4). Comparados con valores de sedimentos de referencia

(Rössler y Lange, 1972), el cobre y el zinc se encontraban enriquecidos por factores de entre 119 y 184 veces. Comparadas a valores de referencia para arsénico, las muestras de este estudio estaban enriquecidas hasta factores de 90 a 470 veces (Oyarzun *et al.*, 2004).

Sin embargo, un hecho cambiaría radicalmente nuestra visión previa sobre las causas de la contaminación. Durante el recorrido a lo largo del río Turbio llamó la atención una secuencia de sedimentos colgados en las paredes del valle. Sólo por curiosidad se tomó una muestra de dichos sedimentos de aspecto lacustre (muestra HLS) (figura 4). La sorpresa fue grande, cuando esa muestra entregó los más altos niveles de arsénico de toda la cuenca. Eso llevó a un nuevo muestreo, esta vez específico para la secuencia, incluyendo la obtención de una muestra rica en carbono orgánico para su datación. Los resultados confirmaron el carácter rico en arsénico de la secuencia, y una segunda sorpresa llegó con la edad de esas rocas. El resultado de

la datación indicó una edad de  $9.640 \pm 40$  años: comienzos del Holoceno, cuando el clima de la Tierra se suavizaba, dejando atrás la última edad fría y seca (*Younger Dryas*), permitiendo así las lluvias y, por lo tanto, la erosión fluvial. En otras palabras, la contaminación por metales pesados y metaloides derivada de la zona mineralizada de El Indio tenía un carácter milenar (Oyarzun *et al.*, 2004 y 2006a).

Dada la naturaleza de los trabajos mineros en el distrito minero de El Indio, 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 de la dispersión de elementos químicos, es 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 denominar una "contaminación natural" de los ríos. Cuanto más prolongado e intenso sea el proceso, más grandes serán los efectos. Si tomamos en cuenta que la secuencia lacustre del Holoceno temprano presentaba altos valores de arsénico, tendríamos que concluir que el problema de la contaminación en esta zona databa desde hacía (al menos) 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 con arsénico y cobre al sistema (Oyarzun *et al.*, 2006b). Sin embargo, es importante que sepamos que en el caso del Elqui no basta con el cierre de la mina de El Indio (o de su operación metalúrgica) para que la contaminación deje de existir. Dado que se trata de un problema milenar, es importante que las autoridades tomen este dato en consideración para cualquier análisis futuro de riesgos ambientales en la zona.

Llegados aquí, resulta importante llamar la atención sobre otro fenómeno. Si se observa con detenimiento la *figura 4*, veremos una quiebra importante en cuanto

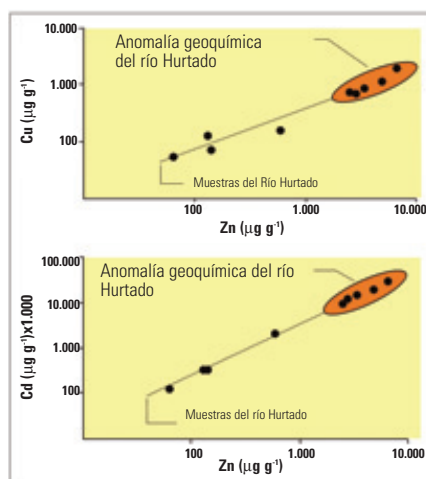


Figura 5. Anomalia geoquímica del río Hurtado (cuenca del Limarí) (modificada de Oyarzun *et al.*, 2006b).

a los contenidos de arsénico aguas arriba y abajo del embalse de Puclaro. Resulta evidente que la presa (con una capacidad para 200 millones de  $m^3$ ) está reteniendo sedimentos ricos en arsénico y que, como tal, representa un reservorio secundario actual de este elemento.

#### *Cuando no hacen falta explotaciones mineras para que exista una fuerte contaminación por metales pesados: la cuenca del Limarí*

Los resultados de la campaña de 2002 en la cuenca del Elqui llevaron a plantearse nuevos estudios en las cuencas del sur de la región de Coquimbo. Así, se decidió muestrear la cuenca del Limarí en 2004 (*figura 1*). La idea inicial era que, dado que no había actividad minera en la alta cordillera de dicha cuenca, la contaminación por metales pesados debía ser mucho menor. En otras palabras, serviría como "línea base", a modo comparativo entre la cuencas del Elqui (con la mina de Au-Cu-As de El Indio) y la del Choapa (con la gigantesca mina de Cu de Los Pelambres) (*figura 1*).

Nada fue así, y los sedimentos fluviales del río Hurtado (*figura 1*) iban a entregar elevadas concentraciones de cobre ( $53-1.881 \mu g g^{-1}$ ), zinc ( $64-6.586 \mu g g^{-1}$ ) y cadmio ( $130-31.348 ng g^{-1}$ ) (*figura 5*), mientras que las concentraciones de arsénico tenían valores elevados ( $6-186 \mu g g^{-1}$ ), pero no tanto como los observados en la cuenca del Elqui ( $39-485 \mu g g^{-1}$ ) (Oyarzun *et al.*, 2006a).

En Chile, la minería es un asunto económico importante y las compañías no suelen entregar fácilmente sus datos respecto a potenciales yacimientos (prospectos). Costó, pero finalmente se tuvo acceso a cierta información respecto a una de las zonas de alteración en la cabecera del río Hurtado: Coipita (*figura 1*), prospecto al que por fin pudo achacársele la anomalía geoquímica de Cu-Zn-Cd-As observada en los sedimentos fluviales del río Hurtado. Hasta donde sabemos, el prospecto no ha cambiado su estatus. ¿Tendrá algo que ver con esto los relativamente bajos —en términos comparativos— valores de arsénico encontrados? Recordemos que el arsénico es un metaloide ampliamente distribuido en las mineralizaciones epitermales de metales preciosos en la cadena andina, formando dos importantes minerales de mena: tennantita y enargita. Ambos son además minerales de cobre y, este último, es un metal importante en las explotaciones auríferas. Si hay bajos contenidos de arsénico, es probable que los contenidos en cobre también lo sean y, por lo tanto, la rentabilidad de un depósito podría verse comprometida, particularmente si las leyes de oro no son particularmente altas.

Cualquiera que sea el caso, si algo quedó claro de manera definitiva es que no es necesario que existan explotaciones mineras en un sector de la cordillera para que la contaminación por metales sea intensa (Oyarzun *et al.*, 2006a).

#### *Cuando los gigantes pódidos contaminan menos que los pequeños epitermales: la cuenca del Choapa*

El estudio de la cuenca del Choapa (*figura 1*) en 2006 dio curiosos resultados. La presencia y explotación del gigantesco pórfido cuprífero de Los Pelambres en la alta cordillera hacía presumir elevados niveles de contaminación en sedimentos fluviales; sin embargo, nada de eso se observó (Oyarzun *et al.*, 2007b).

Factores clave que controlan el comportamiento ambiental de un yacimiento mineral incluyen los minerales

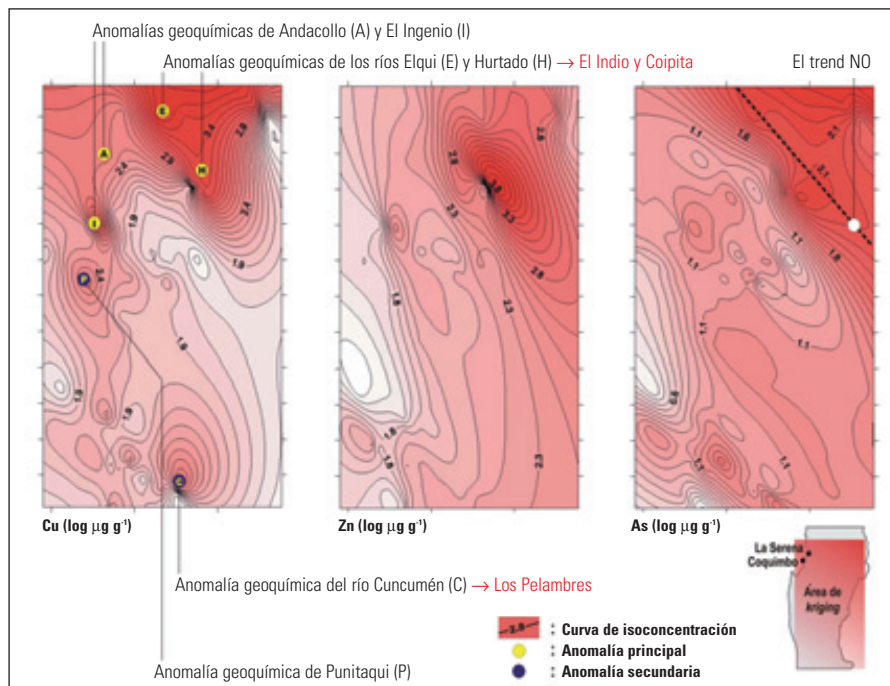
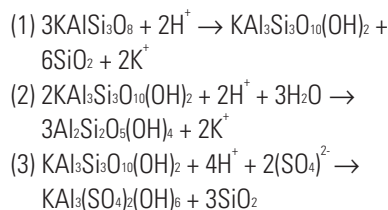


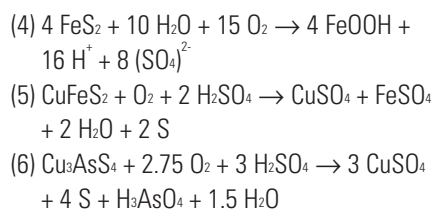
Figura 6. Mapas geoquímicos de cobre, zinc y arsénico para las cuencas del Elqui, Limarí y Choapa, realizados mediante kriging puntual (modificada de Oyarzun et al., 2007b).

de mena y ganga, la litología del encajante y la alteración hidrotermal, los cuales influyen en la respuesta química de un yacimiento (Plumlee, 1999; Plumlee y Nash, 2004). Las grandes anomalías geoquímicas de Elqui y Hurtado y la menor de Los Pelambres (figura 6) merecen un completo análisis que contemple los numerosos factores geológicos que controlan la dispersión de los metales. Las mineralizaciones de El Indio (anomalía Elqui), Coipita (anomalía Hurtado) y Los Pelambres (anomalía del río Cuncumén) (figuras 1 y 6) comparten algunos rasgos geológicos y fisiográficos, pero difieren fundamentalmente en otros. Por ejemplo, las tres mineralizaciones son de edad miocena, se relacionan con rocas magmáticas félsicas y están emplazadas a lo largo de la cadena andina a gran altitud. Sin embargo, las dos primeras son del tipo epitermal, mientras que Los Pelambres es un pórfido cuprífero. El Indio y Coipita presentan fuertes y extensas zonas de alteración del tipo argílica avanzada. Esto tiene fuertes implicaciones en lo que se refiere a la dispersión de metales, porque este tipo de alteración disminuye de manera fundamental la capacidad de tamponamiento (*buffering*) ácido de las rocas albergantes. La química de estos procesos se puede resumir de la siguiente manera: la fuerte hidrólisis

durante la actividad hidrotermal lleva a la destrucción de los feldespatos a través de la subsecuente formación de sericita (1), caolinita (2) y aún alunita (3) si hay ácido sulfúrico presente en el sistema, lo cual es común en los sistemas de alta sulfurización (Heald et al., 1987):



Esto es particularmente relevante en el caso de los yacimientos epitermales de alta sulfurización, que son ricos en pirita y otros sulfuros. Así, cuando comienza la oxidación de la pirita (4) no quedan minerales como los feldespatos que puedan reaccionar con el ácido generado durante la oxidación de los sulfuros. Esto incrementa la movilidad del cobre a partir de calcopirita (5) o del cobre y arsénico a partir de la enargita (6).



Por el contrario, el pórfido cuprífero de Los Pelambres presenta alteración potásica, fílica y propilítica. La formación de biotita o feldespatos potásico secundario (alteración potásica) no afecta significativamente la reactividad de las rocas encajantes, mientras que la alteración propilítica incluso la aumenta (formación de calcita). Además, la sericita de la alteración fílica es también un consumidor de  $\text{H}^+$  (2) durante los procesos hidrolíticos supergénicos. De esta manera, la capacidad de tamponamiento de las rocas en Los Pelambres siguió siendo importante y la dispersión de metales se redujo (Oyarzun et al., 2007b).

### Sobre un modelo de dispersión de metales y metaloides a partir de mineralizaciones emplazadas en zonas de altura

Los problemas fundamentales de contaminación (natural o antrópica) en las cuencas hidrográficas estudiadas en la IV Región de Chile se derivan, principalmente, de la remoción de As, Cu y Zn desde las zonas de alteración y explotaciones mineras de gran altitud. A esto contribuyen diversos factores, entre los que tenemos los fisiográficos y climáticos. Durante la estación de lluvias, especialmente en los años de El Niño, estos materiales van a parar directamente a los cursos fluviales principales de esta región, entre ellos, los ríos Elqui, Hurtado, y Limarí (figura 1). Dado que la IV Región sostiene una importante actividad agrícola, la situación es preocupante.

Pero la dispersión de metales y metaloides es más que un hecho que responda de manera exclusiva a una temática climático-fisiográfica. Hay tres factores geológicos que tienen mucho que decir al respecto:

- La intensidad de la fracturación, a escala local y regional. Mientras más fracturada está una zona, más fáciles serán los procesos de erosión y, por lo tanto, de remoción. Así, la cubierta de un yacimiento será desmontada rápidamente y los procesos de oxidación-lixiviación actuarán rápida y efectivamente. Al respecto, resulta significativo que la fracturación regional

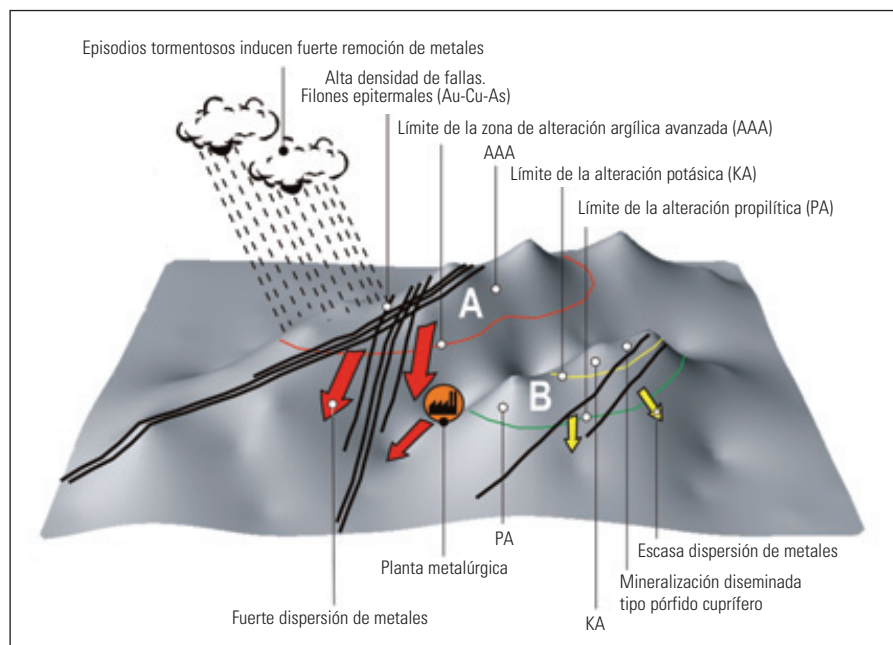


Figura 7. Esquema idealizado de los procesos de contaminación por metales pesados y metaloides. Factores climáticos, fisiográficos, estructurales, de alteración hidrotermal y tipos de yacimientos emplazados en zonas de altura (modificada de Oyarzun et al., 2007b). A: Caso de tipo epitermal. B: Caso de tipo pórfido cuprífero.

es mucho más intensa en la faja metalogénica de El Indio que en la zona de Los Pelambres. Esto último se constató mediante el estudio sistemático de imágenes Landsat, que permitió distinguir dos corredores regionales (zonas de falla) de intensa fracturación: NO-SE y NNE-SSO (Oyarzun et al., 2006a y 2007a). El estudio geoestadístico de los datos mediante *kriging* puntual mostró que las anomalías geoquímicas regionales tienen un fuerte control regional NO-SE (figura 6), acorde con una de las grandes zonas de falla mencionadas anteriormente. De esta manera se pudo apreciar que la geología estructural también constituye una importante herramienta de trabajo en los estudios minero-ambientales (Oyarzun et al., 2006a y 2007b).

- Dado que la acidez de las soluciones es la pieza clave para la lixiviación de los metales y metaloides, la litología del encajante controla parte del proceso. No es lo mismo una caliza (que tamponará las soluciones ácidas) que una roca ígnea, cuya posibilidad de subir el pH depende de la presencia abundante de feldespatos (véanse ecuaciones 1-3) (Oyarzun et al., 2007b), lo cual nos lleva al tercer factor de riesgo.
- La alteración hidrotermal. Como expresamos en el punto anterior, los

feldespatos son la única barrera que existe entre una lixiviación masiva y una controlada. Las alteraciones de tipo potásica y propilítica (pórfidos cupríferos) mantendrán la mineralogía feldespática del encajante. Así, cuando comience la oxidación de la pirita, el ácido reaccionará con los feldespatos, neutralizando las soluciones. Por el contrario, la alteración hidrotermal argílica avanzada (típica de los yacimientos epitermales de alta sulfurización) destruirá los feldespatos, y cuando la pirita comience su oxidación en el ambiente supergénico no habrá ningún mineral que pueda neutralizar efectivamente las soluciones. Esto favorecerá fuertemente la lixiviación de metales pesados y metaloides (véanse ecuaciones 4-6) (Oyarzun et al., 2007b).

De esta manera, tenemos que entender los procesos de lixiviación y dispersión de metales y metaloides en el medio como un proceso complejo en el cual intervienen variables climáticas, fisiográficas y geológicas. La interacción entre estas variables está resumida en la figura 7.

Sin embargo, de manera alguna debemos olvidar que la actividad minera contamina y, en ocasiones, mucho. Un hecho notable en este sentido queda demostrado por las

anomalías geoquímicas de Andacollo y El Ingenio (figuras 1, 6 y 8). Andacollo es un desastre ambiental en regla. Siglos de minería han creado una gran anomalía geoquímica de mercurio y cobre (Higueras et al., 2004 y 2005). La minería histórica del cobre (y oro) ha dejado además inmensas balsas de estériles dentro del pueblo, el cual, a su vez, está al lado de las modernas explotaciones a cielo abierto de un pórfido cuprífero (mina Carmen) y de epitermales de baja sulfurización de oro (Dayton) (figura 8). Estas últimas son (dentro de un margen) explotaciones "ambientalmente correctas". Otro caso notable de contaminación por cobre y fenómenos masivos de drenaje ácido lo proporciona la planta de tratamiento de minerales de cobre de Panulcillo, con efectos ambientales devastadores en el estero (río) de El Ingenio (figura 8).

### Lecciones aprendidas

Los trabajos realizados en Chile entre 2002 y 2006 llaman a reflexionar sobre varios temas. El primero guarda relación con los hechos aislados, esos que pueden cambiar radicalmente la forma de ver las cosas. Por ejemplo, en nuestra opinión, la clave para la consecución de los trabajos en las cuencas hidrográficas de la región de Coquimbo guarda mucha relación con la toma de una muestra aislada en la cuenca del Elqui, que ni tan siquiera era de sedimento fluvial activo. Para un trabajo que se basaba estrictamente en el muestreo de sedimentos fluviales, esto debería llamar la atención sobre las metodologías de campo. Nos referimos a la muestra de la secuencia lacustre colgada en el valle del río Turbio (HLS) (figuras 1 y 4). Su carácter rico en arsénico, junto con su edad (unos 10.000 años), mostraron que las relaciones yacimientos minerales —minería— contaminación por metales pesados y metaloides pueden ser mucho más complejas que lo que a primera vista parece. Otra enseñanza que se deriva de esa muestra es que el geólogo ambiental debe trabajar en el campo con una perspectiva amplia, con "curiosidad" sobre todo lo que rodea el ámbito de trabajo. El estudio de una cuenca fluvial es mucho más que coger unas cuantas muestras y luego analizarlas por otros cuantos elementos químicos.

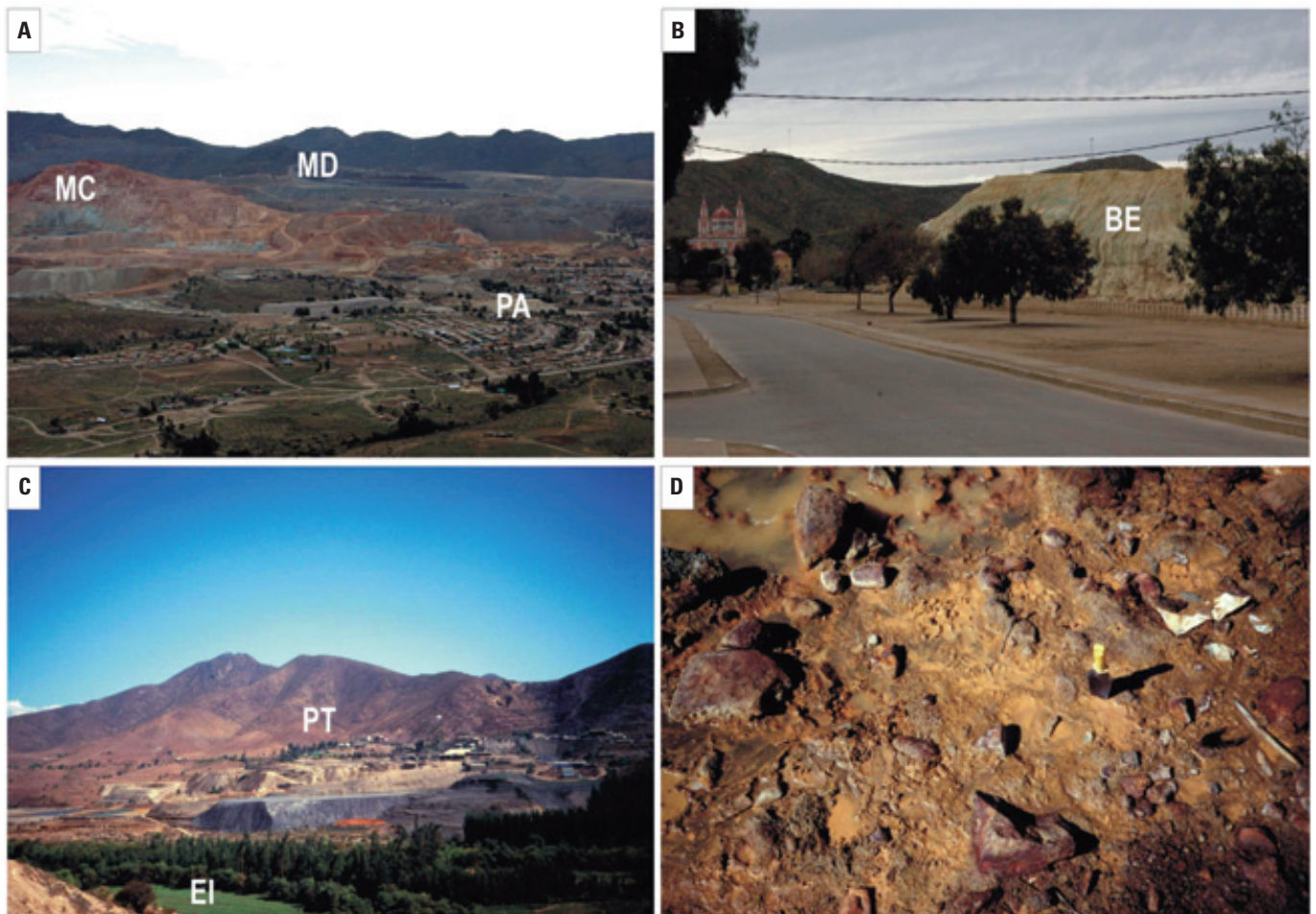


Figura 8. Problemas minero-ambientales en diferentes ámbitos de la región de Coquimbo. A: Minas Carmen (MC), Dayton (MD) y el pueblo de Andacollo (PA). B: El pueblo de Andacollo y balsa de estériles (BE) en la zona urbana. C: La planta de tratamiento de minerales de cobre de Panulcillo (PT) aledaña al estero (río) de El Ingenio (EI). D: Precipitación de óxidos-hidróxidos de hierro en los sedimentos del estero El Ingenio.

Eso puede hacerlo cualquiera. El geólogo tiene que ir más allá del mero muestreo y considerar todas las variables que pueden estar implicadas en el estudio.

De cualquier manera, la muestra de la secuencia holocena cambió nuestra visión sobre la cuenca del Elqui y nos trasladó de un presente estrictamente minero-ambiental a otro más geológico, que se remontaba al comienzo de un calentamiento global (término que hoy asusta tanto a la sociedad), que permitiría que el clima y la fisiografía de la región cambiaran radicalmente. La subida de las temperaturas durante el Holoceno permitió las lluvias y, por lo tanto, la erosión masiva de los cuerpos mineralizados del yacimiento de El Indio. Con dicha erosión vino la oxidación de la mineralización sulfurada y la lixiviación masiva de cobre y arsénico.

Había que comprobar si estas lecciones recién aprendidas tenían validez en las

cuenas del sur, nos referimos a las del Limarí y Choapa, aunque las sorpresas no acabarían. La primera vino acompañada nuevamente de una premisa falsa: no había minas en la zona cordillerana de la cuenca del Limarí, ni siquiera un yacimiento reconocido como tal. Por lo tanto, no deberíamos encontrar fuertes anomalías en metales pesados. Sólo había zonas de alteración hidrotermal en la cordillera y, como habíamos comprobado en la cuenca del Elqui (figura 1), la presencia de alteraciones no era suficiente para que se desarrollara una fuerte contaminación. Craso error, no había yacimientos pero sí un prospecto, y si había un prospecto, era potencialmente factible que hubiera fuertes anomalías geoquímicas. Después de todo, no se eleva una zona de alteración hidrotermal a la categoría de prospecto si ésta no tiene el potencial para convertirse en una zona explotable. Investigar la actividad de exploración antes de ponerse a trabajar

en una zona. Ésa es la clave, por difícil que sea recabar datos a partir de las compañías mineras.

La cuenca del Choapa proporcionó una última lección magistral. La explotación del pórfido cuprífero de Los Pelambres es a gran escala, con remoción de unas 300.000 toneladas/día y una producción anual del orden de 340.000 toneladas de concentrado de cobre. Parecía lo suficientemente grande como para dejar una marcada huella geoquímica en la cuenca del Choapa. No fue así y, como pudimos deducir durante la investigación, una serie de factores mineralógicos y estructurales mitigan fuertemente los procesos de lixiviación y transporte de metales. No queremos decir con esto que no exista contaminación asociada a Los Pelambres, la hay, pero es de menor escala (anomalía geoquímica del río Cuncumén) comparada con las de El Indio o Coipita (figura 6).

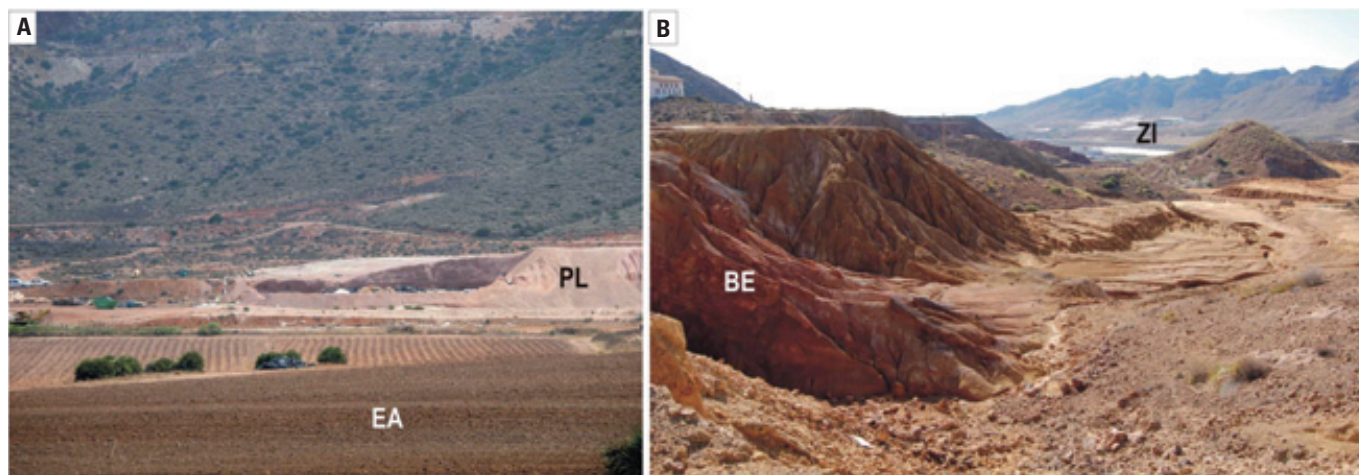


Figura 9. Riesgos ambientales en España, dos ejemplos. A: Pila de lixiviación rica en arsénico (PL) abandonada de Rodalquilar (Almería), al lado de una gran explotación agrícola (EA). B: Mazarrón, Perules-San Cristóbal, balsas de estériles (BE) abandonadas, ricas en plomo, zinc y arsénico, al lado de zonas de invernaderos (ZI) y el pueblo de Mazarrón (semiculto por el cerro).

### Sobre por qué 5 es mejor que 30: la flexibilidad de pensamiento y actuación

Otra reflexión guarda relación con el equipo de trabajo y sus premisas. Aunque parezca una paradoja, si hubiéramos dispuesto de grandes fondos y se hubieran prefijado las líneas de investigación antes de empezar, es muy probable que no se hubiera hecho ni la mitad. Fue justamente la carencia de una organización rígida lo que dio flexibilidad al equipo como para plantearse y replantearse el cómo, cuándo y por qué hacer las cosas. Es más fácil moverse y poner de acuerdo "a 5 que a 30". En este sentido, resulta curioso que el número de investigadores (mientras más "mejor") sea considerado como un factor de peso en la concesión de proyectos, y que se "premie" el tener las cosas "muy claras" antes de empezar. Al respecto resulta sorprendente (por decir lo menos) que en los impresos de algunas convocatorias de proyectos se pregunte a los investigadores cosas tales como: cuáles serán los resultados esperados del proyecto (¿si sabemos lo que vamos a encontrar para qué molestarse y gastar dinero en buscarlo?), o en qué revistas se publicarán los resultados de dicho proyecto (¿qué tiene que ver esto con la ciencia?). Esto es lo que se podría llamar "la ciencia urbanizada", que discurre por "asfaltadas carreteras" planificadas por las autoridades del sistema. En nuestra opinión, "flexibilidad" es la palabra clave. Un equipo sujeto a controles rígidos periódicos no puede hacer ciencia. La ciencia surge de la libertad de

pensamiento, los controles burocráticos atentan contra ésta.

### Palabras finales: el "geólogo ambiental" versus el "ambientalista"

El tema ambiental ha ganado importancia de manera progresiva en la geología, tanto en la enseñanza como en la investigación teórica y aplicada. Aunque los aspectos más "paisajísticos" de los problemas ambientales suelen a veces llamar de manera importante la atención de la opinión pública, existen otros, "de fondo", que, imprescindiblemente, deben ser tratados.

Muchos países registran una historia minera y metalúrgica que se extiende de manera importante en el tiempo. Décadas, incluso siglos de minería, han dejado un legado a veces oculto, de escombreras de mineral y otros residuos de origen minero que constituyen de facto potenciales bombas químicas de relojería. La carga mineral que no se explotó en su momento está sometida a procesos químicos naturales (oxidación, hidrólisis) que actúan sobre dichos minerales, contribuyendo a su disolución y, por lo tanto, a la liberación de metales pesados. Los metales puestos en solución pasan directamente a los suelos, pueden alcanzar por infiltración a las aguas subterráneas o continuar a través de los cursos fluviales, ampliándose considerablemente el área afectada y los riesgos potenciales para el medio ambiente y la salud humana. Ejemplos de esta naturaleza no hay que buscarlos

necesariamente en remotas regiones del mundo, ya que en España existen también abundantes ejemplos, incluso en las inmediaciones de ciudades o explotaciones agrícolas (figura 9). ¿Cómo y por qué se permiten estas cosas? Buena pregunta.

Obviamente, los peligros ambientales derivados de la minería no se circunscriben al legado minero de un país, sino que se extienden de manera incluso más importante al presente y se proyectan con fuerza en el futuro. Esto es debido a que la minería continúa y continuará siendo un factor importante en la economía de muchos países del mundo.

Para abordar estos problemas hace falta que los encargados de investigar lo hagan con una visión amplia de la geología. La geoquímica y la mineralogía son importantes herramientas ambientales, pero ninguna puede por sí responder a las múltiples interrogantes que surgen durante una investigación de campo. En otras palabras, los estudios minero-ambientales no pueden estar —exclusivamente— en manos de geoquímicos, mineralogistas o paisajistas. Tienen que estar controlados por "geólogos", profesionales que vayan más allá del uso de una "palita" para la toma de muestras de suelos o sedimentos y del posterior estudio, más o menos aristocrático, de los datos mediante sofisticados procedimientos analíticos y matemáticos. Pensamos que el estudio de las cuencas del Elqui, Limarí y Choapa ilustra este principio básico.

Para finalizar quisiéramos sugerir las características que debería tener un geólogo que trabaja en temas minero-ambientales. Así, el experto en recursos minerales y medio ambiente debería ser capaz de:

- Comprender la naturaleza “geológica” (integral) de los recursos minerales, tanto a escala local como regional.
  - Comprender el potencial contaminante que poseen los yacimientos minerales y el papel que puede jugar su encajante.
  - Comprender los principales métodos de explotación minera y procesos metalúrgicos.
  - Comprender los procesos de traspaso geoquímico de metales y metaloides a la atmósfera, suelos, aguas y biota.
- En función de lo anterior, debe también:
- Evaluar los riesgos potenciales que se derivan de los yacimientos minerales y explotaciones mineras en activo o abandonadas.
  - Ser capaz de proponer soluciones ambientales acordes a cada caso concreto, previniendo riesgos y estableciendo normas para la restauración y remediación.

## Bibliografía

- Araneda, R. (1985). Nuevos aportes al conocimiento de la geología de El Indio, yacimiento de oro, plata y cobre, *Revista Minerale*, 168, Coquimbo, Chile, 27-39.
- Bissig, T.; Clark, A. H.; Lee, J. K. W. y Hodgson, C. J. (2002). Miocene landscape evolution and geomorphologic controls on epithermal processes in the El Indio-Pascua Au-Ag-Cu belt, Chile and Argentina, *Economic Geology*, 97, 971-996.
- Guzmán, R. (1986). Reseña geológica de algunos de los más importantes yacimientos chilenos de cobre del tipo diseminado. En: Frutos, J.; Oyarzun, R. y Pincheira, M. (eds.), *Geología y Recursos Minerales de Chile*, Universidad de Concepción, Concepción, 2, 509-545.
- Heald, P.; Foley, N. K. y Hayba, D. (1987). Comparative anatomy of volcanic-hosted epithermal deposits: acid sulfate and adularia-sericite types, *Economic Geology*, 82, 1-26.
- Higueras, P.; Oyarzun, R.; Lillo, J.; Oyarzún, J. y Maturana, H. (2005). Atmospheric mercury data for the Coquimbo region, Chile: influence of mineral deposits and metal recovery practices, *Atmospheric Environment*, 39, 7587-7596.
- Higueras, P.; Oyarzun, R.; Oyarzún, J.; Maturana, H.; Lillo, J. y Morata, D. (2004). Environmental assessment of copper-gold-mercury mining in the Andacollo and Punitaqui districts, northern Chile, *Applied Geochemistry*, 19, 1855-1864.
- Maksaev, V.; Moscoso, R.; Mpodozis, C. y 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, *Revista Geológica de Chile*, 21, 11-51.
- Oyarzun, R.; Lillo, J.; Higueras, P.; Oyarzún, J. y Maturana, H. (2004). Strong arsenic enrichment in sediments from the Elqui watershed, Northern Chile: industrial (gold mining at El Indio-Tambo district) vs geologic processes, *Journal of Geochemical Exploration*, 84, 53-64.
- Oyarzun, R.; Ortega, L.; Sierra, J.; Lunar, R. y Oyarzún, J. (1996). The manto-type gold deposits of Andacollo (Chile) revisited: a model based on fluid inclusion and geological evidence, *Economic Geology*, 91, 1298-1309.
- Oyarzun, R.; Ortega, L.; Sierra, J.; Lunar, R. y Oyarzún, J. (1998). Cu, Mn, and Ag mineralization in the Quebrada Marquesa Quadrangle, Chile: the Talcuna and Arqueros districts, *Mineralium Deposita*, 33, 547-559.
- Oyarzun, R.; Oyarzún, J.; Ménard, J. J. y Lillo, J. (2003). The Cretaceous iron belt of northern Chile: role of oceanic plates, a superplume event, and a major shear zone, *Mineralium Deposita*, 38, 640-646.
- Oyarzun, R.; Lillo, J.; Oyarzún, J.; Higueras, P. y Maturana, H. (2006a). Strong metal anomalies in stream sediments from semiarid watersheds in northern Chile: When geological and structural analyses contribute to understanding environmental disturbances, *International Geology Review*, 48, 1133-1144.
- Oyarzun, R.; Guevara, S.; Oyarzún, J.; Lillo, J.; Maturana, H. y Higueras, P. (2006b). The As-contaminated Elqui river basin: a long lasting perspective (1975-1995) covering the initiation and development of Au-Cu-As mining in the high Andes of northern Chile, *Environmental Geochemistry and Health*, 28, 431-443.
- Oyarzun, R.; Lillo, J.; Oyarzún, J. y Higueras, P. (2007a). Plate interactions, evolving magmatic styles, and inheritance of structural paths: development of the gold-rich, Miocene El Indio epithermal belt, northern Chile, *International Geology Review*, 49, 844-853.
- Oyarzun, R.; Lillo, J.; Oyarzún, J.; Maturana, H. y Higueras, P. (2007b). Mineral deposits and Cu-Zn-As dispersion-contamination in stream sediments from the semiarid Coquimbo Region, Chile, *Environmental Geology*, 53, 283-294.
- Plumlee, G. S. (1999). The environmental geology of mineral deposits. En: Plumlee, G. S. y Logsdon, M.J. (eds.), *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits. Parte A: Processes, Techniques, and Health Issues*, *Reviews in Economic Geology*, 6A, 71-116.
- Plumlee, G. S. y Nash, J. T. (2004). Geoenvironmental models of mineral deposits- Fundamentals and applications, en Du Bray, E. A. (ed.), *Preliminary Compilation of Descriptive Geoenvironmental Mineral Deposit Models*, *USGS Open-File Report*, 95-0831, 1-9, en: <http://pubs.usgs.gov/of/1995/ofr-95-0831/>
- Rössler, H. J. y Lange, H. (1972). *Geochemical Tables*, Elsevier, Ámsterdam, 468 pp.
- Veit, H. (1996). Southern Westerlies during Holocene deduced from geomorphological and pedological studies in Norte Chico, northern Chile, *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 123, 107-119.