



## EL ANÁLISIS DE LAS *THOLAS* COMO MÉTODO DE EXPLORACIÓN DE MENAS DE ANTIMONIO-ORO EN EL ALTIPLANO BOLIVIANO

M. Viladevall \*, R. Santivañez \*\*, J. Ponce \*\*, H. Alarcón \*\*, E. Valenzuela \*\*, J. Saavedra \*\*\*,  
E. Pellitero +, A. Murciego ++, J. Babkine +++ y Y. Dusausoy +++

### Introducción

Bolivia es conocida internacionalmente por su diversidad, densidad y potencial minero, principalmente en el Altiplano y en la Cordillera Oriental. Entre los distintos tipos de substancias minerales, hay que destacar las menas auríferas, con un total de 153 explotaciones conocidas entre las activas e inactivas <sup>1, 2</sup>. Estos depósitos adoptando los modelos del US Geological Survey <sup>3</sup>, se clasifican en nueve tipos, destacando por su número (34) y por su distribución en los Departamentos altiplánicos y de Cordillera, el denominado 27d de "cuarzo-estibina con  $\pm$  oro" y una producción estimada en 1992 de 7.500 toneladas de antimonio y desconocida en oro. Estos depósitos sobre los que se realizará la prospección biogeoquímica, se describen en este mismo volumen <sup>4</sup>. Además de estos, hay que señalar los del tipo 36a o "filones de cuarzo-oro con contenidos bajos en sulfuros", con 21 depósitos en dichos departamentos, y los del tipo 39a o "placeres", con 40 depósitos situados principalmente en el sector de la Cordillera Oriental-Subandino dentro del Departamento de La Paz.

### La Prospección Biogeoquímica

La homogeneidad de estos depósitos de Sb-Au tanto en sus aspectos morfo-estructurales, como por sus encajantes siliciclásticos, composición mineralógica, y en sus procesos metalogenéticos, así como por su ubicación en zonas de clima árido a semiárido con relieves

poco acusados, bajo desarrollo de la red hidrográfica y de los suelos autóctonos, permite proponer como excelente herramienta de prospección geoquímica a la vegetación.

Si tenemos en cuenta además, las elevadas condiciones de anoxia por a una cota media de 3.900 m.s.n.m. que no permiten altas, tasas de oxidación e hidrólisis y en consecuencia una liberación y removilización elevada de elementos tales como Sb, As, Hg, Pb, Zn, Au..., y en su defecto la formación de complejos auríferos móviles que den lugar a extensas aureolas de dispersión secundaria que deberían reflejarse tanto en suelos, aguas y sedimentos de redes de drenaje, podemos prever como método eficaz de exploración, la biogeoquímica.

Este método tanto para oro como para el antimonio ya ha sido contrastado por numerosos autores entre los que cabe resaltar <sup>5, 6, 7, 8</sup>.

En el Altiplano, si bien existe una limitada variedad de especies vegetales autóctonas, hay que destacar la presencia de una vegetación arbustiva muy extendida denominada *Thola.*, que da lugar a los denominados *tholares.* Esta vegetación que normalmente no sobrepasa los 150 cm. de altura, presenta unas raíces superficiales y otras profundas que pueden alcanzar hasta los 5 metros de profundidad y en consecuencia estas últimas, cuando se trata de suelos alóctonos, revelar los contenidos no tan solo en metales de interés y definir y delimitar las aureolas de dispersión primaria, como las ya indicadas poco extensas aureolas secundarias, sino también los contenidos geoquímicos en otros elementos diferenciadores de los distintos materiales siliciclásticos o volcánicos.

Otra vegetación muy extendida en el Altiplano es la denominada "paja brava" con raíces muy superficiales y que suele ser el pasto de la cabaña altiplánica, y una vegetación altamente espinosa. Ambas por problemas de

\* GPPG.Fac.Geología Univ.Barcelona.España

\*\* Univ. Mayor San Andrés Bolivia

\*\*\* IRNA (CSIC). Salamanca, España

+ Dpto.Geología. Univ. Salamanca, España

++ Fac.Ciencias, Badajoz, España.

+++ Université de Nancy, Francia

representación geoquímica y logísticos no han sido utilizadas en este trabajo.

Teniendo en cuenta las consideraciones geográficas y climáticas expuestas, además de los parámetros geológicos (materiales siliciclásticos del Silúrico-Devónico y Ordovícico y materiales ígneos no tobáceos y aluvionares del Terciario), y siempre próximos áreas con mineralizaciones de Sb-Au y Au, los puntos muestreados con un total de 324 muestras entre vegetación, suelos y rocas, han sido los siguientes: Mina Antofagasta (18° 1,71'S; 67° 0,53'W en Oruro); Mina Sepulturas-Cala Cala (17° 58,72'S; 66° 59,00'W Oruro); Cantera Sepulturas (17° 59,56'S; 67° 01,40'W); Mina Cevada Mayo (18° 9,64'S; 66° 56,99'W en Sora Sora); Mina Tarumita (Caracollo); Escuela Condoriri (17° 34,26'; 67° 15,82'W Caracollo); Venta y Media (18° 17,58'S; 66° 51,44'W, Huannuny); Cerro Coricollo (18° 12,85'S; 66° 54,99'W, Huannuny); Mina San Bernardino (18° 50,39'S; 66° 44,29'W); Mina Chilcobija (21° 24,65'S; 66° 05,64'W) y la Formación aluvial terciaria de Kholpana en Caracollo

### Muestreo y Tratamiento de las Muestras

Para cubrir los objetivos, se ha realizado:

A. Un muestreo en malla regular o aleatorio para suelos y rocas (definición del contraste suelo-vegetación o PSC *sensu* Kovalevsky<sup>8</sup>), con un peso mínimo de 5 Kg. y un muestreo de características similares para la vegetación con un mínimo de muestra de unos 200 g.

B. Un lavado de la vegetación con agua abundante para eliminar las partículas adheridas en ésta y un secado específico para suelos y vegetación en función de los elementos a analizar. Así por ejemplo la baja presión atmosférica de La Paz, obliga a que ésta preparación se realice tanto para ambas a una temperatura no superior a los 30°C, con el fin de evitar la volatilización del mercurio.

C. Un tamizado de los suelos, con una malla inferior a 60 mesh ASTM para la determinación del estaño, e inferior a 80 mesh ASTM para el resto de los elementos.

D. Una molturación no contaminante en W, Ni y Co para muestras litogeoquímicas, y de hojas o tallos para la vegetación.

Una vez secadas, tamizadas o molturadas las muestras, los métodos analíticos utilizados

han sido para algunos elementos digestión previa (agua regia), y de forma mayoritaria en muestra sólida. En el primero de los casos y de manera rutinaria se han empleado para suelos indistintamente la Espectrometría de Emisión por Plasma (ICP) como la Espectrometría de Absorción Atómica (AAE) con llama convencional. En el segundo de los casos la técnica empleada a sido principalmente la Activación Neutrónica (INAA) tanto para, suelos y rocas como para la vegetación. En menor medida la Fluorescencia de Rayos X (XRF) ha sido empleada en suelos para la determinación del Sn y Zr. Una relación de elementos junto con sus técnicas analíticas mas representativa se muestra en la tabla.1).

Todos los análisis, se han llevado a cabo en Activación Laboratories LTD (ACTLABS), Ontario, Canadá.

Técnica Muestra	INAA	ICP
Suelos	Au, As, Ba, Br, Ce, Co, Cr, Cs, Fe, Eu, Hf, Hg, La, Lu, Mo, Na, Ca, Nd, Rb, Sb, Sc, Se, Sr, Sm, Ta, Th, Tb, U, W, Yb	Ag, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn.
Vegetación	Au, As, Ag, Ba, Br, Ce, Co, Cr, Cs, Fe, Eu, Hf, Hg, K, La, Lu, Mo, Na, Ca, Nd, Rb, Sb, Sc, Se, Sr, Sm, Ta, Th, Tb, U, W, Yb, K.	
Roca	Au, As, Ba, Br, Ce, Co, Cr, Cs, Eu, Hf, Hg, La, Lu, Mo, Na, Nd, Rb, Sb, Sc, Se, Sr, Sm, Ta, Th, Tb, U, W, Yb, Cl.	Al, Ag, B, Be, Bi, Ca, K, Na, Ni, Fe, Mg, Mn, P, Si, Ti, V, Zr, Dy, Gd, Y

Tabla .1.

Los datos aportados por estas muestras, han sufrido un tratamiento estadístico clásico monovariado y multivariado (ACP), con el fin de determinar los fondos geoquímicos, los umbrales de anomalías y la relación entre los elementos. La representación de los datos, se ha realizado bajo la forma de mapas de fondos, anomalías y de componentes principales con sus cargas respectivas, con la representación de uno

o varios niveles, mediante los programas McGridzo para Appel Macintosh.

### La Vegetación.

La vegetación elegida dentro de las distintas variedades de *Tholas* ha sido por su mayor difusión la especie *Baccharis incarum* Weddell *Cloris Andina*, de la familia de las Compuestas. Este arbusto intrincado-ramoso, presenta un entramado de raíces superficiales así como una o varias raíces profundas que pueden alcanzar tal como ya se ha indicado una elevada profundidad, lo que le permite vivir en áreas ausentes de suelos edáficos y en condiciones de humedad muy reducidas. A esta vegetación en general, se le atribuye una ubicación entre los 2.800 y 4.500 m, siendo reconocida por nosotros en el Altiplano boliviano entre los 3.350 hasta los 4.350 m, lo que representa tan sólo en Bolivia, una extensión de más de 130.000 km<sup>2</sup>. Es por lo demás, un tipo de vegetación de fácil reconocimiento para no expertos en botánica.

Otras variedades muy difundidas, también denominadas "*Tholas*", son la *Parasterphia lepidophylla*, *Baccharis leptophylla* y *Baccharis heterothalamoides*, también de la familia de las Compuestas y la especie *Fabiana densa* de la familia de las Solanáceas.

Para el muestreo de la vegetación, se ha tenido en cuenta:

#### A. Relación Planta-Suelo (PSC).

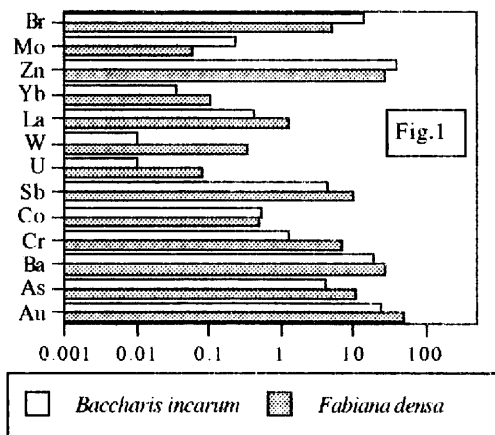
Con el fin de definir esta relación entre el contenido en Au, As y Sb en vegetación y suelos, se tomaron 14 muestras de suelos junto con la especie *Baccharis incarum* en el sector Norte de la Mina Antofagasta, y una muestra en un desmonte de mina. Se constata, que tanto el oro como el As y Sb, se comportan como un buen elemento no-barrera con valores entre 0.1 y 10 y un coeficiente de correlación de 0.92.

#### B. Especies Vegetales

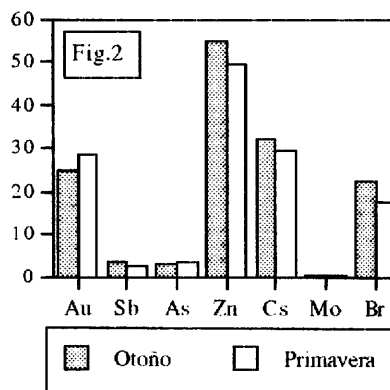
De las especies indicadas observamos en la Mina Antofagasta que la de mayor difusión es la *Baccharis incarum*, si bien la especie *Fabiana densa*, acumula mucho más Au, As, Ba, Co, Cr, Cs, Fe, Hf, Sb, Sc, W, U, Th, Hf y Tierras Raras que la primera, mientras que esta acumula mucho más Br, Ca, K, Mo, Na, Sr y Zn (fig.1 en la que el Au se representa en ppb y el resto en ppm). Esto nos permite concluir que ambas

*Tholas* acumulan los elementos de interés, como en este caso el Au y Sb, pero selectivamente.

En la Mina Chilcobija, la variedad más frecuente también es la *Baccharis incarum* muy por encima de otra especie de la misma familia como la *Baccharis leptophylla*. El contenido de Au y Sb de ambas especies tomadas sobre un mismo suelo (desmonte de mina) son superiores en la primera especie (49.2 ppb de Au y 440 ppm de Sb), con respecto a la segunda (con 33.7 ppb de Au y 350 ppm Sb).



#### C. Época de Muestreo



Los ensayos de muestreo realizados con la *Baccharis incarum*, nos muestra (Fig.2), mientras que los contenidos de oro en hojas se incrementan sensiblemente en Primavera (Octubre) o época de floración, con respecto al

Otoño (Mayo-Junio), tanto si la vegetación vive sobre un suelo altamente mineralizado en Au y Sb (desmontes de la Mina Antofagasta o Cevada Mayu), como si se trata de muestras tomadas en sectores con ausencia de suelos o relativamente mineralizados. Otros elementos tales como el Zn, Mo, Cs y Br, presentan una relativa mayor concentración en Otoño que en Primavera.

En consecuencia y en función del elemento a prospectar en el Altiplano, el muestreo debe efectuarse en Primavera para oro y arsénico, mientras que para el Zn, Sb y Mo, es preferible el muestreo en Otoño.

#### D. Los órganos muestreados.

En nuestros ensayos previos y teniendo en cuenta el aspecto logístico, han sido descartadas las raíces ya que estas alcanzan profundidades de hasta 5 metros, habiéndose realizado tan solo para hojas y tallos. En estos, sobresalen que para la mayoría de los elementos, incluido el oro, el órgano que mayor contraste proporciona, a excepción para el molibdeno y el arsénico, son las hojas.

#### Primeros Resultados

En los sectores muestreados se observa a partir de las anomalías en antimonio de las *tholas* que éstas son independiente de las anomalías en oro y a su vez independientes de una fuerte anomalía en cesio (en este caso tanto litológica como en vegetación), lo que da pie a pensar en que las mineralizaciones auríferas si bien se hallan muy próximas entre sí, en muchos casos como en la mina Antofagasta, Cevada Mayu y Chilcobija (contenido en oro de la vegetación hasta las 101 ppb y el contenido en antimonio hasta las 540 ppm), ambas serían independientes en el espacio y posiblemente en el tiempo.

En los otros sectores ubicadas sobre materiales ígneos (tobas y lavas) del Terciario, la situación es parecida a la de los materiales pelíticos del Paleozoico, dando además en ellas algunos resultados positivos en plata. Cabría esperar en dichos materiales encontrar una zonación de Au(Ag)-As-Sb, a partir de las muestras de *thola*, lo que reflejaría un aspecto bastante típico en este tipo de yacimientos.

En la Formación Kholpana (antiguo placer), los contenidos de oro son muy elevados

y reflejan una distribución relativamente homogénea con los veneros en explotación.

La prospección biogeoquímica utilizando la *Thola* es pues una herramienta excelente para la prospección de oro, antimonio, arsénico y otros elementos en el Altiplano ya que refleja claramente la composición del substrato y por lo tanto de sus mineralizaciones. Puede además este método suplir perfectamente a la prospección geoquímica de suelos.

#### Agradecimientos

Este trabajo se ha financiado a través del Proyecto de la CEE ref. CII\*-CT90-0784 de Cooperación Internacional. Los autores agradecen las facilidades concedidas por los propietarios y personal de las minas estudiadas, así como al Dr. Waldo Avila Salinas, del Ministerio de Minería y Metalurgia por su ayuda y soporte en este trabajo.

#### Referencias

1. Gustavson Associates, I., & McKenzie, B. &. (1992). Compendio de Geología Económica de Bolivia. La Paz:
2. Ahlfeld, F. (1964). Los Yacimientos Minerales y de Hidrocarburos de Bolivia. Ministerio de Minas y Petróleo.
3. Cor. D.P. & Singer, D.A. (edit.) (1986). Mineral Deposits Models. *US Geological Survey Bull.* 1693.
4. J. Saavedra, E. Pellitero, A. Murciego, J. Babkine, Y. Dusausoy, M. Viladevall, J. Ponce, R. Santivañez y H. Alarcón. (1994). Las paragénesis Auro-Antimoníferas de yacimientos Representativos de los Andes Bolivianos. 7º Congreso Geológico Chileno.
5. Boyle R.W. (1979) *The geochemistry of Gold and Its Deposits*. Canada Geological Survey Bull n° 280. 584p.
6. Boyle, R. W. & Jonasson, I. R (1984). The geochemistry of antimony and its use as an indicator element in geochemical prospecting. *Journal of Geochemical Exploration*, 20: 223-302.
7. Leduc, C. (1992): Biogeochemical Prospecting for antimony deposits: results of a preliminary study on the Brouzils deposits (Vandée, France). *Chron. Recherch. Minère*. 508: 29-40.
8. Kovalevskiy A.L. (1987). *Biogeochemical Exploration for Mineral Deposits*. VNU Science Press. Utrech. 224p.