



Chapitre de livre

1995

Published version

Open Access

This is the published version of the publication, made available in accordance with the publisher's policy.

El yacimiento de Zn-As-(Au) Azulcocha asociado a la falla de desgarre Cochas-Gran Bretaña (Perú Central)

Muñoz, César; Fontboté, Lluís

How to cite

MUÑOZ, César, FONTBOTÉ, Lluís. El yacimiento de Zn-As-(Au) Azulcocha asociado a la falla de desgarre Cochas-Gran Bretaña (Perú Central). In: Volumen jubilar Alberto Benavides. Benavides, Victor (Ed.). Lima : Sociedad Geologica del Perú, 1995. p. 205–230.

This publication URL: <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:163442>

EL YACIMIENTO DE Zn-As-(Au) AZULCOCHA ASOCIADO A LA FALLA DE DESGARRE COCHAS-GRAN BRETAÑA (PERÚ CENTRAL)

César Muñoz *

Lluís Fontboté **

RESUMEN

El yacimiento de Azulcocha ($12^{\circ} 03'30''\text{S}$ y $75^{\circ} 40'18''\text{W}$) se ubica en los Andes del Perú Central, 270 km al este de Lima. En el área de estudio afloran rocas sedimentarias marinas y continentales del Mesozoico y Cenozoico, deformadas por diferentes fases de la tectónica andina. Seis kilómetros al oeste del yacimiento afloran el stock Chuquipita, cuya composición es de granito a granito de feldespatos alcalinos, y el domo Jesús María de composición riolita a riolita de feldespatos alcalinos. A ambos se les atribuye una edad del Eoceno Superior al Mioceno. La estructura más importante del área es la falla regional de desgarre Cochab-Gran Bretaña con un rumbo general $\text{N}45^{\circ}\text{W}$. El yacimiento de Azulcocha se encuentra emplazado en la porción sigmoidal (E-W) de esta falla. El bloque Sur de la falla está constituido por calizas liásicas del Grupo Pucará que sobreescurren al bloque Norte conformado por areniscas neocomianas de la Formación Goyllarisquiza.

El cuerpo mineral se encuentra emplazado en las calizas de la Formación Condorsinga y tiene forma elíptica con dimensiones $300 \times 50 \times 160$ m; controlado y limitado por la estructura sigmoidal de la falla Cochab-Gran Bretaña y fallas secundarias de rumbo noreste-suroeste. La alta permeabilidad a lo largo de las fallas y la solubilidad de las rocas favoreció la formación de brechas de colapso y espacios vacíos, donde se ha desarrollado el cuerpo mineral. No se observa deformación importante en el cuerpo mineral, lo que sugiere que la mineralización sea básicamente posterior a las principales fases de la tectónica andina y en particular a la falla de desgarre Cochab-Gran Bretaña. Esto indica una edad máxima de Mioceno Superior.

Se han distinguido cuatro etapas principales de mineralización. La segunda constituye la principal por su contenido de esfalerita tipo schalenblenda, acompañada por barita, rodocrosita, marcasita y cantidades menores de galena y sulfosales de Pb-As. La tercera etapa se caracteriza por la presencia de marcasita y "melnicovita" con contenidos de Au, oropimente, rejalgá, y cristales aciculares de una sulfosal de Pb y As no conocida ("Mineral X": $5\text{PbS} \cdot 3\text{As}_2\text{S}_3$). No ha sido observada alteración hidrotermal asociada al yacimiento, salvo silicificación y dolomitización de las calizas al sur del yacimiento asociadas a fallas transversales de rumbo noreste-suroeste. Los análisis geoquímicos en concentrados bulk arrojan valores relativamente altos en Ge (20-115 ppm), Cd (100-2500 ppm), In (1-40 ppm), Hg (10-120 ppm) y Tl (10-280 ppm). Una particularidad del yacimiento es el alto contenido de Au en algunos concentrados de mena (2-14 ppm) y en concentrados de marcasita-"melnicovita" ricos en As (hasta 7.8 % As) con contenidos de oro hasta 70 ppm.

Las inclusiones fluidas en barita de las etapas II y III arrojan temperaturas de homogenización similares que varían entre 90° y 177°C (promedio 131°C) y salinidades entre 5 y 20% NaCl equivalente (promedio 12%). Estas temperaturas bajas concuerdan con la paragénesis del yacimiento y las texturas del mismo, lo cual aunado a la casi ausencia de alteración sugieren un modelo de precipitación de metales a baja temperatura. Los valores isotópicos de Pb en galena y sulfosales de Azulcocha y yaci-

* Newmont Peru Limited. Av. El Golf Los Incas 216, Urbanización Monterrico, Lima 33, Perú.

** Département de Minéralogie. 13, rue des Maraîchers, CH-1211 Genève 4, Suiza.

mientos vecinos sugieren dos fuentes para el Pb: una fuente poco radiogénica representada por rocas volcánicas y volcanoclásticas del Grupo Mitu y la otra más radiogénica probablemente representada por rocas del basamento pre-Pérmico o sedimentos y/o rocas intrusivas derivadas de él. Los estudios de isótopos de azufre en esfalerita y barita no presentan grandes variaciones: δ entre +2‰ y +6‰ y entre +20‰ y +24‰ respectivamente. Esa pequeña variación de los valores de $\delta^{34}\text{S}$ indican una fuente homogénea, ausencia de cambios bruscos de las condiciones fisicoquímicas durante la precipitación de los sulfuros y ausencia de reducción bacteriana de sulfatos. Como fuente se propone una mezcla entre azufre magmático como componente principal y azufre derivado de las intercalaciones de evaporitas en la Formación Capas Rojas del Eoceno.

La estructura sigmoidal de la falla Cochabamba-Gran Bretaña y las fracturas secundarias asociadas a ésta formaron zonas de debilidad con alta permeabilidad, por las cuales ascendieron fluidos mineralizantes, moderadamente calientes, reducidos, salinos y ácidos. En contacto con las calizas de la Formación Condorsinga los fluidos atacaron los carbonatos originando cavidades. La baja temperatura del fluido no permitió originar otras alteraciones significativas. El incremento resultante del pH es considerado como la causa probable de la precipitación de sulfuros. La mineralización se desarrolló esencialmente en una sola etapa. Una edad miocena máxima de la mineralización y los valores isotópicos de azufre sugieren una relación directa o indirecta con las intrusiones graníticas del Cenozoico que afloran en el área.

Las investigaciones aquí resumidas muestran que el yacimiento de Azulcocha presenta similitudes con algunos yacimientos polimetálicos en el Perú central asociados al magmatismo terciario, ricos en Zn y As, como Huarón y Colquijirca; los que a su vez se encuentran asociados, al menos espacialmente, a fracturas profundas. Azulcocha podría representar un equivalente de menor temperatura de este grupo de yacimientos.

ABSTRACT

The Zn-As-(Au)-Azulcocha ore deposit is located in the Central Peruvian Andes, 270 km East of Lima. Main rocks in the Azulcocha area are marine and continental sediments of Mesozoic and Cenozoic age. West of the Azulcocha ore deposit occur a granitic to alkali feldspar granitic rock (Chuquipita stock) and a rhyolitic to alkali feldspar rhyolitic dome (Jesús María dome). The ore deposit is emplaced at the major regional N45° W trending strike-slip Cochabamba-Gran Bretaña fault, which in the mining area builds an E-W sigmoidal overthrust structure. The southern block consisting of Liassic limestones of the Pucará Group thrusts over Neocomian sandstones of the Goyllarisquizga Formation in the North.

The Azulcocha orebody is controlled and limited by the sigmoidal structure of the Cochabamba-Gran Bretaña fault. It is located in limestones of the Condorsinga Formation and has an elliptical shape with dimensions 300x50x160 m. Increased permeability along the fault allowed the formation of open spaces and collapse breccias. The orebody is undeformed suggesting a post-tectonic ore formation, specifically later than the Cochabamba-Gran Bretaña fault. This indicates a maximum age of upper Miocene.

Four main depositional stages have been distinguished. Stage II is the main stage and comprises sphalerite (schalenblende), subordinate barite, rhodochrosite, marcasite and minor amounts of galena and Pb-As-sulphosalts. Stage III consists mainly of marcasite, "melnikovite", in part gold-bearing, orpiment, realgar and small acicular inclusions of a not known Pb-As-sulphosalt ("mineral X" - $5\text{PbS} \cdot 3\text{As}_2\text{S}_3$). Hydrothermal alteration is not observed in the ore deposit area. However, in the southern part silicification and dolomitization occur associated with secondary transversal faults trending northeast-southwest. Geochemical analyses on bulk-concentrates show relatively high values of the Ge (20-115 ppm), Cd (100-2500 ppm), In (1-40 ppm), Hg (10-120 ppm) and Tl (10-280 ppm). A particularity of the Azulcocha ore deposit is the high gold contents in some ore-concentrates (2-14 ppm) and in As-rich-marcasite-"melnikovite" concentrates (up to 7.8% As) which show the highest gold values (up to 70 ppm).

Fluid inclusions on barite from stages II and III give similar homogenization temperatures, which range from 90° to 177° C (average 131° C). Salinities range from 5 to 20 equiv. wt. percent NaCl (average 12 wt. percent). The low temperature fluid inclusions correlate reasonably well with the mineral paragenesis and textures of the ore deposit. This fact together with the scarce alteration suggest a low temperature metal precipitation. Lead isotope composition in galena and sulphosalts from Azulcocha and other neighbor ore deposits indicates two lead sources: a less radiogenic source represented by the volcanic

and volcanoclastic rocks of the Mitu Group, and a more radiogenic source probably from the pre-Permian basement or sediments and/or intrusive rocks derived from in. The sulphur isotopic analyses in sphalerite and barite show a small variations range, between +2‰ to +6‰ for sphalerite and +20‰ to +24‰ for barite. The narrow span of the $\delta^{34}\text{S}$ ratios indicates an homogeneous source, not abrupt changes of the physicochemical conditions during sulfide precipitation, and absence of bacterial sulphate reduction. A mixing of magmatic sulphur, as main component, with sulphur of intercalated evaporites in the Eocene Capas Rojas Formation is proposed.

The sigmoidal structure of the Cochas-Gran Bretaña fault and secondary faults provided weakness zones with increased permeability which served as feeder channels for moderately warm, reduced, saline, and acid ore-forming brines. These low temperature fluids dissolved in places carbonates of the Condorsinga Formation forming vugs, but did not produce other significant alteration. The rise of the pH is considered to be the probable reason for sulfide precipitation. The ore formation took essentially place in only one stage. The maximum Miocene age of ore formation and sulphur isotopic ratios suggest a direct or indirect relationship with the Cenozoic granitic intrusions outcropping in the area.

The present work shows that, there are similarities with other polymetallic Zn-As rich ore deposits associated to Tertiary magmatism in central Peru, like Huarón and Colquijirca. These ore deposits are at least spatially associated to deep fractures. Azulcocha could be considered as a low temperature equivalent of these ore deposits.

INTRODUCCION

El yacimiento de Zn-As-(Au) Azulcocha se encuentra 270 km al este de Lima y se sitúa entre la parte oriental de la Cordillera Occidental y las altiplanicies de los Andes Centrales del Perú (Fig. 1). El depósito se encuentra emplazado en la falla regional de desgarre Cochas-Gran Bretaña, que en el área de la mina es inversa y pone en contacto los sedimentos calcáreos de la Formación Condorsinga y los clásticos de la Formación Goyllarisquiza. Desde 1946 hasta 1968 fueron explotados en pequeña escala los óxidos de manganeso; recién a partir de 1964, durante la explotación subterránea, fue descubierto el cuerpo mineral de zinc. Hasta 1986 fueron extraídas alrededor de 1.5 millones de toneladas de mena con leyes entre 18 y 25% de Zn y 2% de As. Las labores mineras fueron paralizadas en junio de 1986 debido principalmente a los altos costos de producción. Las reservas actuales y la producción se muestran en la tabla 1. El de Azulcocha fue uno de los cuerpos minerales individuales de zinc más grandes y ricos que se hayan encontrado en el Perú.

MARCO GEOLÓGICO

Los afloramientos más importantes y extensos corresponden a sedimentos marinos y continentales del Mesozoico y Cenozoico (Fig. 2). La actividad magmática (stocks ácidos, diques y sills de composi-

ción básica) en la zona de Jatunhuasi-Azulcocha-Chuquipita tuvo lugar durante el Terciario (Muñoz, 1994). El stock granítico de Chuquipita y el domo riolítico de Jesús María intruyen a los sedimentos mesozoicos y afloran seis kilómetros al oeste del yacimiento Azulcocha. Se han reconocido estructuras, principalmente pliegues y fallas, correspondientes a las fases compresivas del terciario. La estructura más importante de la zona es la falla regional de desgarre Cochas-Gran Bretaña.

ESTRATIGRAFÍA

Las rocas más antiguas pertenecen a sedimentos mesozoicos de la Formación Condorsinga (Liásico), que alcanzan una potencia de 400 m al sur de la Laguna Azulcocha (Muñoz, 1994). Son calizas con intercalaciones de dolomitas y niveles de chert que se incrementan hacia el techo.

Sobre la Formación Condorsinga y en concordancia afloran 180 m de rocas clásticas de la Formación Cercapuquio (Rosas, 1989), las cuales caracterizan un periodo de regresión. Se trata de sedimentos fluviales constituidos por areniscas con intercalaciones de lutitas y limolitas. Los sedimentos carbonatados de la formación Chaucha, que corresponden a un periodo corto de transgresión, se encuentran sobreyaciendo concordantemente a la Formación Cercapuquio. Están constituidos por tres secuencias de carbonatos con

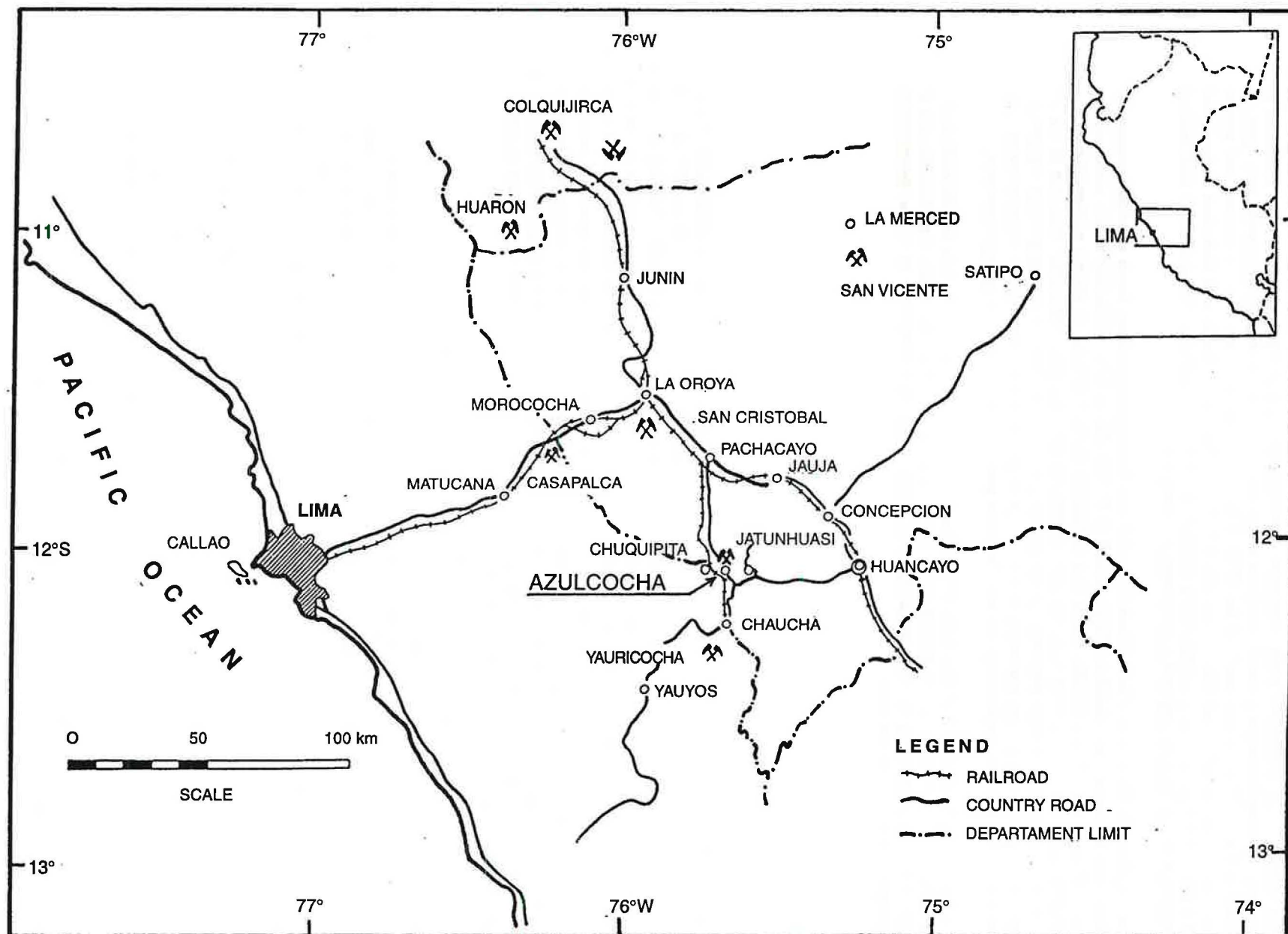


FIG. 1
Ubicación del área de trabajo (Jatunhuasi-Azulcocha-Chuquipita) y del yacimiento Azulcocha

Reservas / Producción	Toneladas	Zn (%)	As (%)	BaSO ₄ (%)	Mn (%)
Producción acumulada de Zn (suma total)*	1'467,659	17.8	2.8		
Reservas de Zn					
Reservas de alto grado					
Probadas	126,893	11.1			
Estimadas	35,449	22.8			
Total	162,342	13.6			
Reservas de bajo grado					
Probadas	46,131	4.9			
Estimadas	1'894,909	4.5			
Total	1'941,040	4.7			
Relaves con Zn **	1'337,948	5.2	3.4	15.0	
Reservas de Manganeseo					
Probadas	624,957				19.7
Estimadas	567,332				19.4
Total	1'192,289				19.6

* desde 1971 hasta principios de 1986

** a junio de 1985

TABLA 1

Reservas y producción acumuladas del yacimiento Azulcocha (según SALAZAR y MONTOYA 1987)

intercalaciones de limolitas y alcanzan una potencia de 55 m en el perfil Laguna Azulcocha (Rosas, 1989). Rosas y Fontboté (1990) asumen una edad correspondiente al Dogger para estas dos formaciones, correlacionando, entre otras, con la formación calcárea Chunu-mayo (Narváez y Guevara, 1968).

Sobre la Formación Chaucha descansan concordantemente los sedimentos deltáicos y de aguas someras de la Formación Goyllarisquizga pertenecientes al Neocomiano-Aptiano Superior. Están formados por secuencias monótonas de areniscas blancas con intercalaciones de lutitas, limolitas y horizontes de carbón, que alcanzan una potencia de 480 m en el perfil de Chincanamachay (Muñoz, 1994). Estos sedimentos corresponden a las facies orientales que marcan el límite Este de la cuenca, razón por la cuál son menos potentes y no es posible subdividirla como sucede al oeste de la cuenca, donde se han distinguido cuatro formaciones que sobrepasan los 1000 m de potencia (Wilson, 1963).

Los sedimentos carbonatados del Albiano hasta Cretácico Superior y las Capas Rojas del Terciario afloran al sur y norte del área de Azulcocha.

ACTIVIDAD MAGMÁTICA

Seis kilómetros al oeste de Azulcocha (Fig. 2) aflora el stock de Chuquipita cuya composición es de granito hasta granito de feldespatos alcalinos. En el contacto con los sedimentos carbonatados se han desarrollado cuerpos de skarn como los de Mina Waie, Cantagallo y Evita (Muñoz, 1994). Al norte del stock de Chuquipita y seis kilómetros al noroeste de Azulcocha aflora un domo de composición riolítica a riolita de feldespatos alcalinos. En el contacto con los sedimentos carbonatados del Cretácico se han desarrollado cuerpos de skarn como los de la mina Jesús María. Otros cuerpos ígneos ocurren en forma de diques en las cercanías del stock de Chuquipita y como sill dentro de los sedimentos de la Formación Goyllarisquizga al noroeste de la mina Jatunhuasi.

Tanto al domo de Jesús María como al stock de Chuquipita se les atribuye una edad terciaria (Muñoz, 1994). Intrusiones similares han sido reconocidas en diferentes lugares de las altiplanicies; como el stock granodiorítico-tonalítico de Huacravilca en Cercapuquio, el domo de Pumaranra en la hoja de Yauyos,

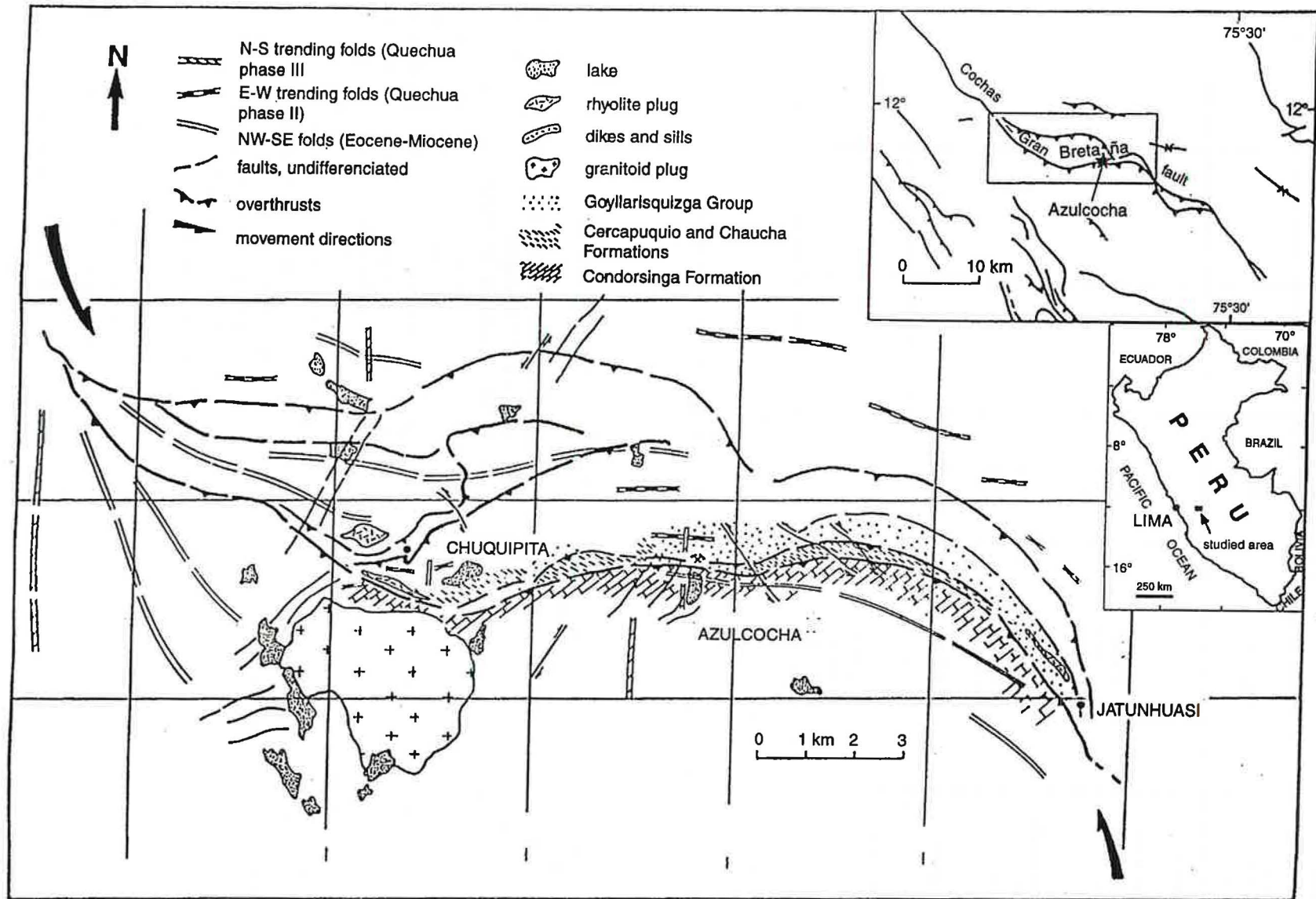


FIG. 2
Esquema geológico del área Jatunhuasi-Azulcocha-Chuquipita con los principales elementos tectónicos (modificado de Soulas Y Mégard, 1979 y Muñoz, 1994)

los domos y lacolitos riolíticos en las cercanías de Canchaillo al norte de Azulcocha que intruyen a las Capas Rojas. Mégard (1979) atribuye a estas intrusiones ácidas edades entre el Eoceno superior y el Mioceno.

LA FALLA COCHAS-GRAN BRETAÑA - CRONOLOGÍA

La estructura más importante es la falla Cochás-Gran Bretaña (Fig. 2), se trata de una falla de desgarre con rumbo $N45^{\circ} W$ y que aflora por más de 70 km. En el área de Jatunhuasi-Azulcocha-Chuquipita esta falla se comporta como una falla inversa, con sobreescurrecimiento, y forma una estructura sigmoidal. Como consecuencia de las fases tectónicas Quechua II y III del Mioceno Superior y Plioceno se han formado y/o reactivado fallas, pliegues, esquistosidad y brechas dentro de los sedimentos (Soulas, 1975; Mégard, 1979; Muñoz, 1994).

En la figura 3 se muestra un modelo que explica la evolución de la falla Cochás-Gran Bretaña durante el Eoceno-Mioceno. Durante la fase Quechua II de compresión N-S la falla Cochás-Gran Bretaña fué sometida a una deformación que dió lugar a la estructura sigmoidal $N80^{\circ} E - S70^{\circ} E$, donde el bloque sur cabalgó sobre el bloque norte. Mientras que el segmento longitudinal (NW-SE) habría sufrido dos movimientos -uno sinistral y otro dextral- durante los cuales se formaron fallas secundarias y pliegues asociados (Soulas, 1975; Soulas y Mégard, 1979).

En la fase Quechua III de compresión E-W la falla Cochás-Gran Bretaña tuvo un movimiento sinistral con desplazamiento de algunos cientos de metros. Pliegues de la fase Quechua III se han superpuesto a los de la fase Quechua II y las brechas de pendiente de la fase Quechua II también han sido deformadas durante la compresión E-W (Soulas y Mégard, 1979). Fallas secundarias, principalmente de rumbo noreste-suroeste, han sido observadas al este y oeste de Azulcocha.

EL YACIMIENTO AZULCOCHA

El depósito de Azulcocha se encuentra dentro de la porción sigmoidal y sobreescurrecida de la falla de desgarre Cochás-Gran Bretaña (Fig. 2). El cuerpo mineral está emplazado en el bloque sur a lo largo del plano de falla. Este bloque está constituido por sedimentos de la Formación Condorsinga que se superponen a los del bloque norte constituidos principalmente por areniscas de la Formación Goyllarisquiza y localmente por sedimentos de las Formaciones Cercapuquio y Chaucha

(Fig. 4). La zona de cabalgamiento muestra dos cambios de rumbo (Fig. 2 y 3) y se encuentra atravesada por fallas menores de rumbo noreste-suroeste. Brechas y estructuras cársticas han sido observadas a lo largo de la falla.

La zona de cabalgamiento en el yacimiento está formada por numerosos planos de falla con milonitas, espejos de falla y estrías con rumbo N-S. Dentro de la mina las intercalaciones de lutitas y limolitas de la Formación Goyllarisquiza se encuentran fuertemente deformadas y alteradas (Fig. 4 y 5), lo que llevó a interpretarlas como diques alterados de dacita (Nishihara et al., 1977; Salazar y Montoya, 1987). Estudios petrográficos y análisis de elementos traza confirman que estos materiales corresponden a las intercalaciones de lutitas y limolitas de la Formación Goyllarisquiza (Muñoz, 1994).

RELACIÓN ENTRE LAS MENAS Y LA FALLA COCHAS-GRAN BRETAÑA

La situación tectónica del yacimiento (intersección de la falla principal con fallas secundarias), así como la solubilidad de los carbonatos han favorecido el desarrollo de brechas de colapso y cavidades internas (Fig. 5). El desarrollo de brechas de colapso se inicia en el techo por la desintegración local a partir del fracturamiento de la roca compacta hasta algunas decenas de metros en profundidad con formación de cuerpos de brecha. Estructuras cársticas (dolinas) a lo largo de la falla Cochás-Gran Bretaña y en el mismo yacimiento son la prueba de este proceso de desintegración y disolución de las rocas.

El relleno de las cavidades está constituido principalmente por fragmentos angulosos centimétricos hasta métricos de calizas cementados por las menas. El relleno mineral fué interrumpido en varias oportunidades por el desarrollo de nuevas brechas de colapso, que en parte volvieron a ser cementadas por las menas. Los fragmentos no parecen haber sido transportados o muy poco, lo cuál permite en algunos casos reconstruir la secuencia de la deposición mineral y las texturas minerales originales. El cuerpo mineral no muestra deformación importante.

La mineralización de interés económico se encuentra dentro de los límites de las brechas de colapso. Venillas finas, impregnaciones y diseminaciones de sulfuros ocurren en la parte sur y al techo del yacimiento, sin que exista un límite marcado entre el cuerpo mineral y la roca de caja; en contraste, el límite norte del cuerpo mineral está claramente marcado por el plano de falla (Fig. 5 y 6). Una excepción la constituyen con-

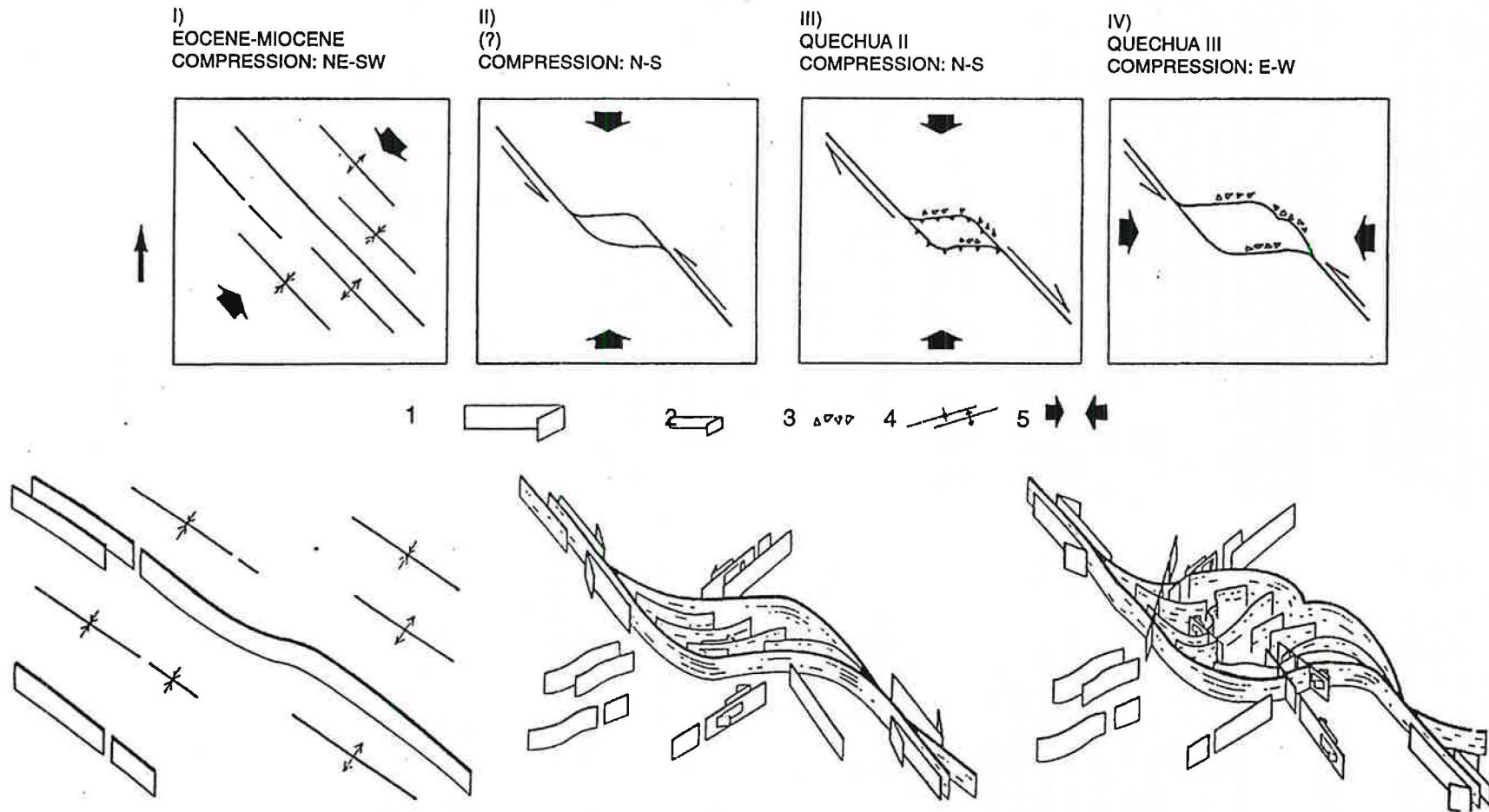


FIG. 3 Modelo estructural mostrando el desarrollo de la falla de desgarre Cochabamba-Gran Bretaña durante el Eoceno-Mioceno.

- I: fallas de desgarre y pliegues NW-SE (fallas y pliegues andinos);
- II: compresión N-S, falla de desgarre sinistral con desarrollo de la estructura sigmoidal;
- III: compresión N-S (fase Quechua II), falla de desgarre dextral, sobreescorrimento y desarrollo de brechas de pendiente en la zona de la estructura sigmoidal;
- IV: compresión E-W (fase Quechua III), falla de desgarre sinistral, fallas secundarias y deformación de las brechas de pendiente. 1: dirección del movimiento de la falla principal; 2: dirección del movimiento de las fallas secundarias; 3: brechas de pendiente; 4: pliegues; 5: dirección de compresión.

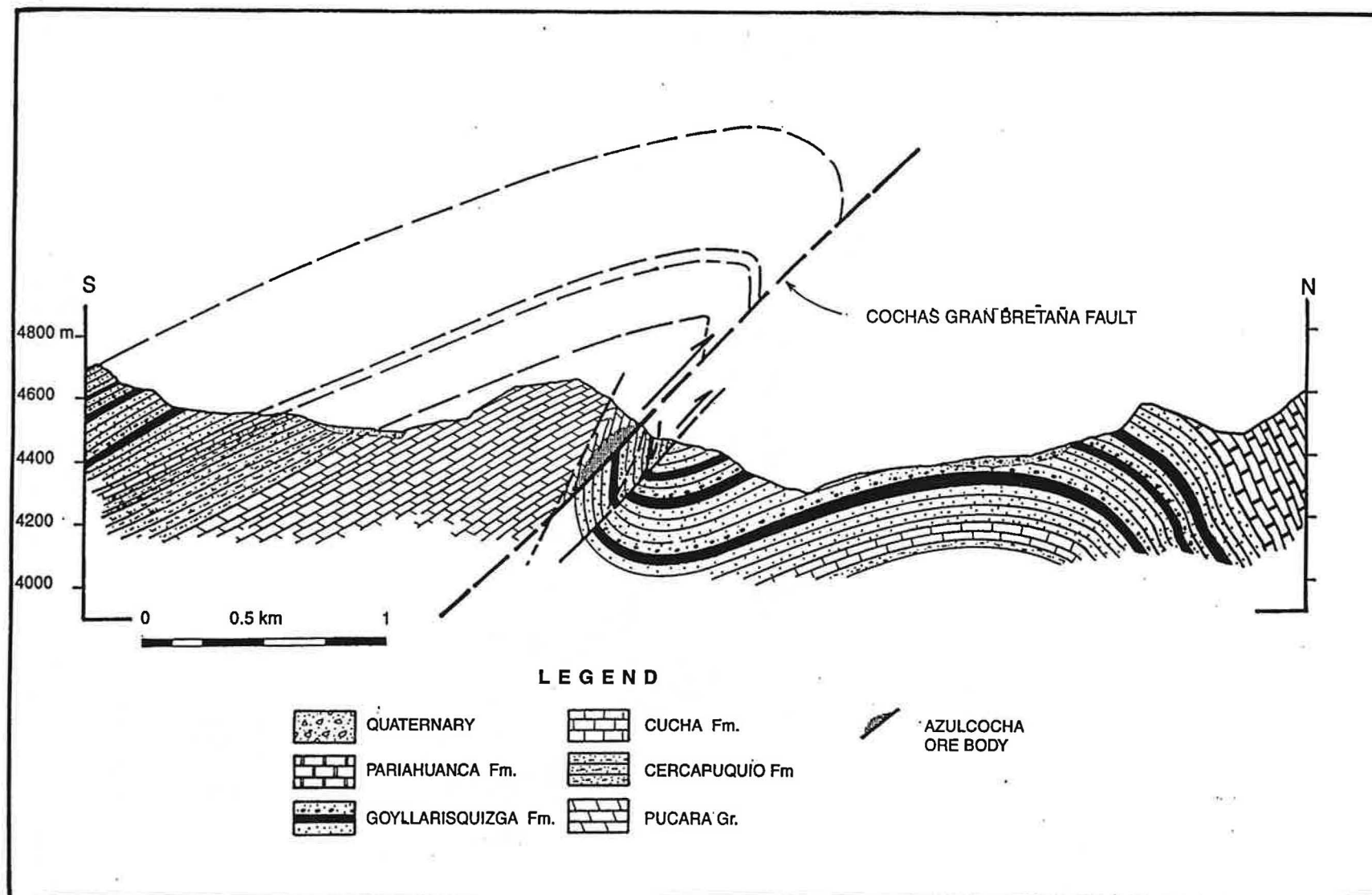


FIG. 4 Corte geológico transversal a la falla Cochas-Gran Bretaña y al yacimiento Azulcocha.

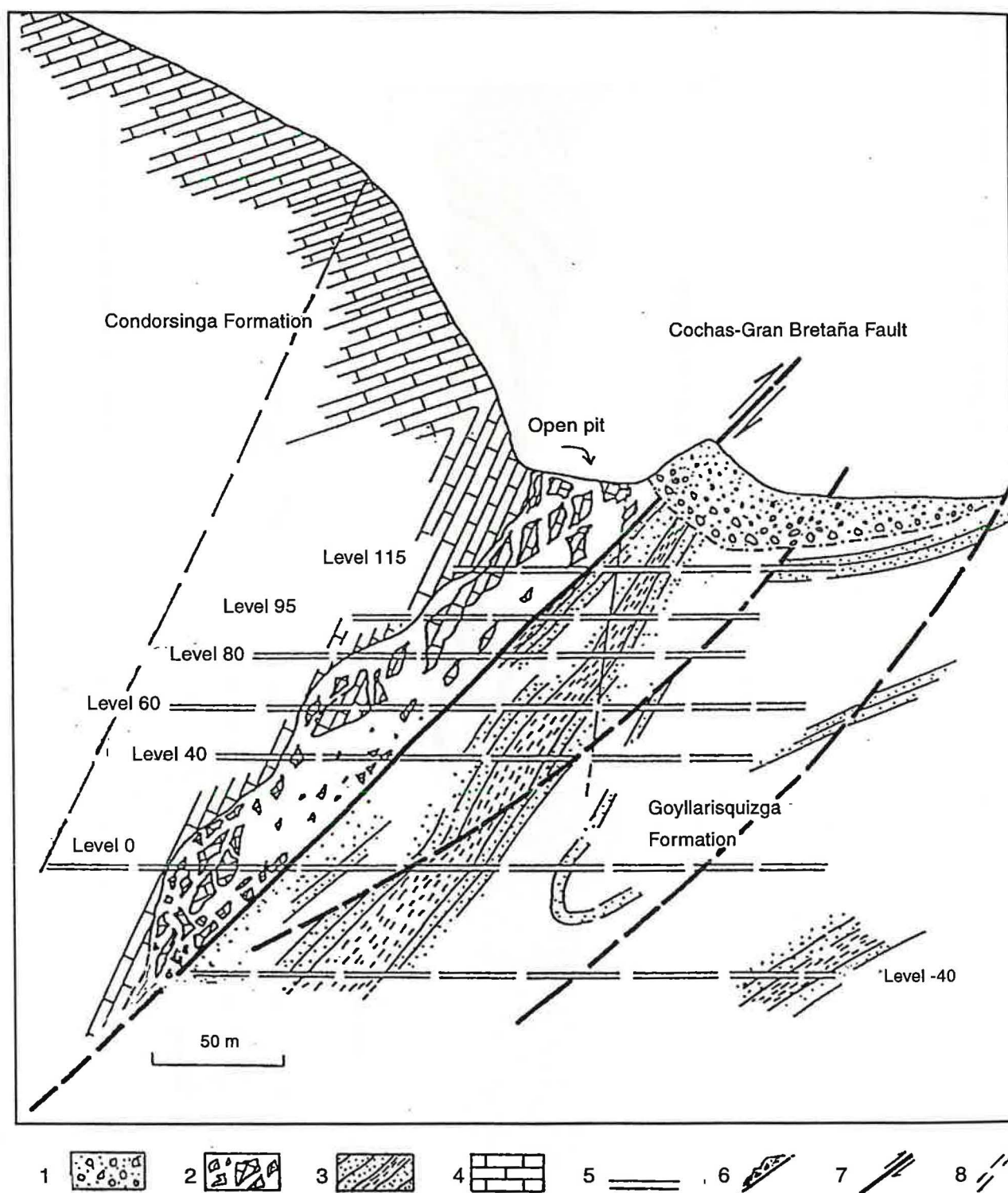


FIG. 5 Corte transversal a la falla Cochas-Gran Bretaña mostrando el cuerpo mineral y las brechas del yacimiento Azulcocha buzante 40° - 45° al Sur. La deformación de las rocas de la Formación Goyllarisquizga es consecuencia del sobreescorrimiento Cochas-Gran Bretaña. 1: Cuaternario; 2: brechas de colapso; 3: Formación Goyllarisquizga; 4: Formación Condorsinga; 5: galerías; 6: cuerpo mineral (> 5% de Zn); 7: sobreescorrimiento Cochas-Gran Bretaña; 8: fallas secundarias.

centraciones menores de esfalerita dentro de las areniscas de la formación Goyllarisquizga en el Nivel -40.

Las brechas de colapso y las cavidades, así como el relleno mineral y el propio desarrollo del cuerpo mineral se encuentran estrechamente controlados por la falla. La ausencia de una significativa deformación tectónica del yacimiento sugiere que éste se formó después de las principales fases de la tectónica andina.

GEOMETRÍA

La geometría de un yacimiento y/o cuerpo mineral, como regla general, está determinada por límites de carácter económico (límites de explotación), más no por los límites geológicos, que a menudo son diferentes. Desde el punto de vista económico el cuerpo mineral de Azulcocha tiene una forma elíptica, buzante 35-45° al sur con el techo cortado (Fig. 6). Su elongación corre paralela a la porción este-oeste de la falla Cochas-Gran Bretaña y el cuerpo mineral se inclina alrededor de 40° al oeste. La máxima extensión (300 x 50 m) se encuentra entre los niveles 60 y 80, mientras que la altura es de 160 m, pudiendo llegar hasta los 240 m, donde el cuerpo mineral alcanza una extensión reducida (20 x 20 m, nivel -40). Los valores más altos de Zn se encuentran entre los niveles 40 y 115 (Fig. 7). Por medio de taladros se ha podido determinar el estrangulamiento del cuerpo mineral, alcanzando éste, en el nivel -140 una potencia de 2.50 m con 3% de Zn (Fig. 6).

La deposición mineral se ha producido principalmente como relleno de espacios abiertos, gran parte como cemento de los fragmentos de calizas en las brechas de colapso y las texturas coloformes son las predominantes. Es común observar la repetición de secuencias de deposición mineral y cementación de fragmentos minerales recién formados.

MINERALOGÍA Y PARAGENESIS

La mineralogía y paragénesis son relativamente complejas (Tabla 2). La mena está constituida fundamentalmente por esfalerita y sulfuros de As y Fe. Galena y sulfosales de Pb-As ocurren en cantidades menores y carecen de importancia económica. Barita y minerales de manganeso como rodocrosita y óxidos de Mn, están ampliamente distribuidos en el yacimiento. Dolomita, calcita, cuarzo y minerales secundarios como: smithsonita, cerusita, anglesita y limonitas ocurren esporádicamente.

Algunos minerales del grupo de las sulfosales de Pb-As como jordanita, baumhauerita, gratonita y una

fase aún no identificada, han sido confirmados por estudios microscópicos, difracción de rayos X y microsonda electrónica (Muñoz, 1994).

Se ha diferenciado cuatro etapas principales de mineralización (Fig. 8). La primera etapa (Fe-Zn) está formada por agregados masivos de pirita y marcasita, en gran parte como cristales subidiomórficos, y cristales de esfalerita diseminada.

La segunda etapa de mineralización con Zn-Fe-Ba-Mn-As-Pb es la más importante y está constituida principalmente por esfalerita (schalenblenda), acompañada por barita, rodocrosita y marcasita. También están presentes cantidades menores de galena y sulfosales; además de pirrotita, la cual ha sido observada esporádicamente. Esta etapa está formada por numerosas secuencias de deposición mineral, a veces rítmicas donde se alternan principalmente esfalerita y barita. Con frecuencia se ha observado la presencia de brechas minerales (hasta métricas) cementadas por secuencias más jóvenes de mineral.

La tercera etapa caracterizada por As-Fe-Zn-Mn-Pb-Au, está formada sobre todo por marcasita, "melnicovita" y minerales de arsénico. En esta etapa son especialmente abundantes el oropimente y rejalgar que contienen inclusiones de un mineral acicular ("Mineral X" en Muñoz, 1994: $5\text{PbS} \cdot 3\text{As}_2\text{S}_3$). Una fase mineral intermedia (Pb-As-S) parece también haberse formado durante esta etapa. Las mediciones con la micro-sonda electrónica de la marcasita-"melnicovita" (ricas en As) de esta etapa indican contenidos de oro de hasta 500 ppm. Asociado a algunos minerales de esta etapa como schalenblenda, pirita y marcasita suelen ocurrir agregados irregulares y esféricos de bitumen, que con frecuencia están cementados por sulfuros de arsénico.

La cuarta y última etapa representa la mineralización supérgena y está constituida principalmente por minerales oxidados de manganeso, smithsonita, minerales secundarios de plomo como anglesita y cerusita, y limonitas.

Las menas ocurren principalmente como relleno de espacios abiertos y como cemento de los fragmentos de caliza y las propias menas en las brechas de colapso. Las texturas de tipo coloforme son las más extendidas y algunas de ellas se pueden observar en la figura 9, que muestra además las asociaciones minerales durante las diferentes etapas de la deposición mineral y su distribución en el cuerpo mineral. Son frecuentes las bandas rítmicas con intercalaciones de esfalerita, barita, sulfosales, galena y marcasita-"melnicovita". La esfalerita (schalenblenda), los sulfuros de Fe, galena y

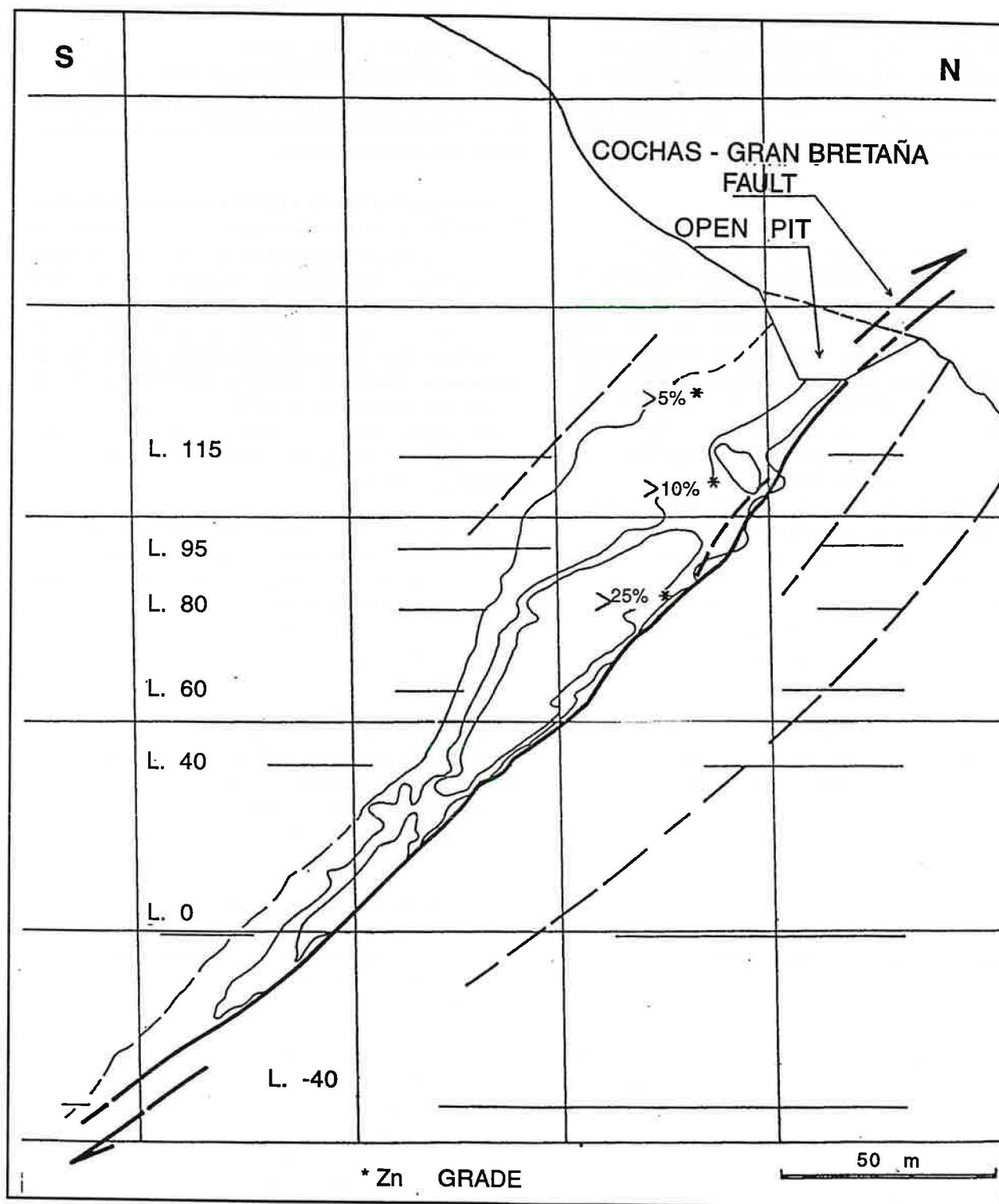


FIG. 6 Corte transversal del cuerpo mineral del yacimiento Azulcocha mostrando la distribución del Zn.

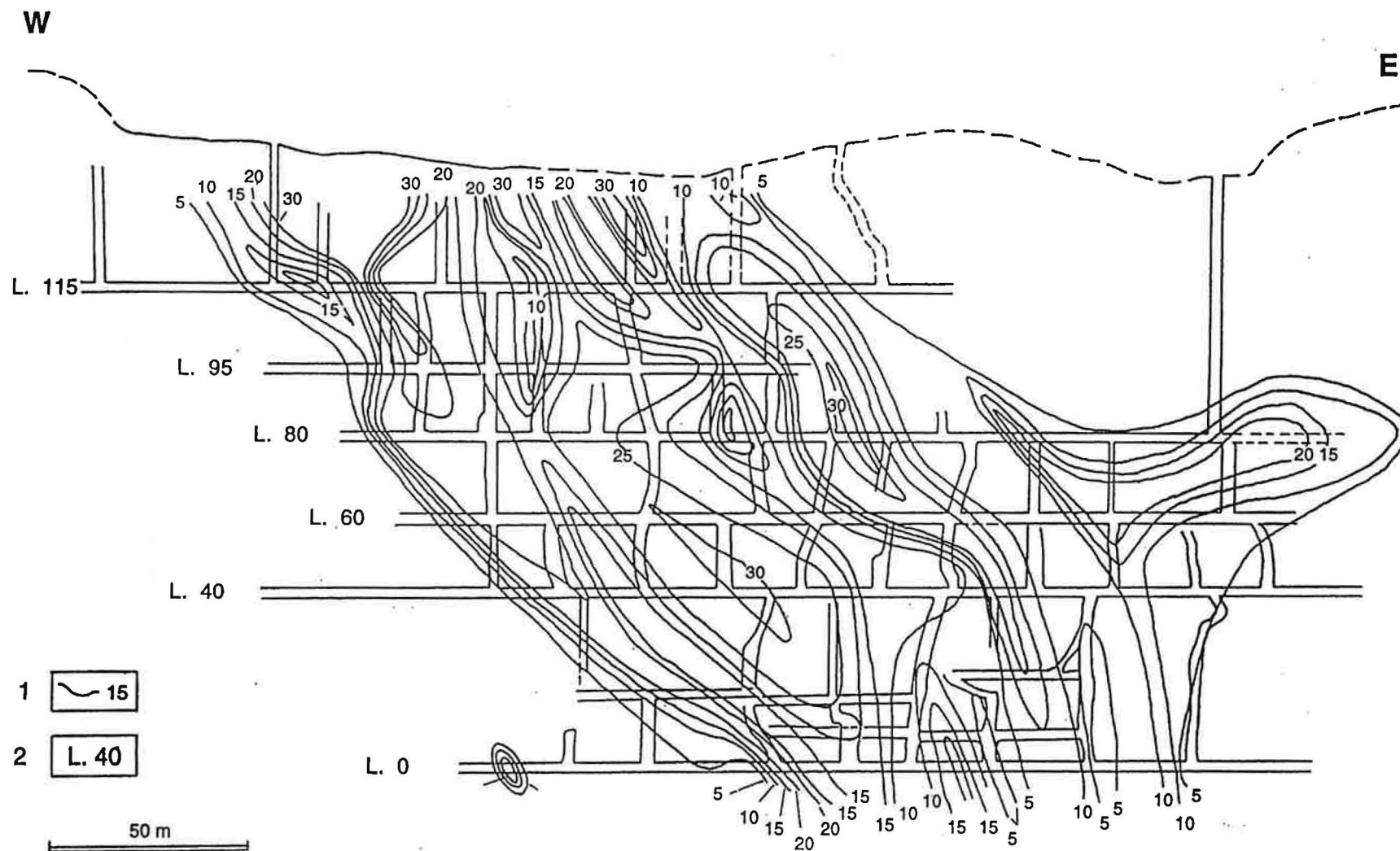


FIG. 7 Corte longitudinal E-W del cuerpo mineral del yacimiento Azulcocha mostrando la distribución del Zn. 1: isovalores de Zn en %; 2: labores subterráneas.

Mineral Variety	Chemical Composition	Abundance
Marcasite	FeS ₂	+++
Pyrite	FeS ₂	+
Pyrrhotite	FeS	(.)
"Melnikovite"	FeS ₂ (± As)	+++
Sphalerite	ZnS	++++
Granular sphalerite	ZnS	+++
Schalenblende	ZnS	+++
Brunckite	ZnS	+
Galena	PbS	+
Jordanite	Pb ₁₄ As ₆ S ₂₃	++
Gratonite	Pb ₉ As ₄ S ₁₅	(.)
Baumhauerite	Pb ₃ As ₄ S ₉	(-)
Geocronite	Pb ₁₄ As ₂ Sb ₄ S ₂₃	(-)
"Mineral X"	Pb ₅ As ₆ S ₁₄	+
Pb-As-S-Compound	Pb _{3.5} As _{3.4} S _{10-10.5}	+
Realgar	AsS	++
Orpiment	As ₂ S ₃	++
Gold	Au	
Native arsenic	As	(-)
Barite	BaSO ₄	+++
Rhodochrosite	MnCaCO ₃	++
Dolomite	CaMgCO ₃	+
Calcite	CaCO ₃	+
Smithsonite	ZnCO ₃	+
Mn-oxide		+++
Limonite		+
Organic matter (coal & bitumen)		+

++++ most abundant
 +++ very abundant
 ++ abundant

+ few
 (-) scarce
 (.) traces

TABLA 2
 Mineralogía del Yacimiento Azulcocha

sulfosales suelen ocurrir a menudo en agregados en forma arriñonada y/o como racimos de uva formando finas bandas concéntricas y radiales.

La paragenesis, estructuras y texturas minerales son características de una precipitación rápida a baja temperatura bajo condiciones reductoras y relativamente constantes. El hecho de que marcasita sea un componente importante y la ausencia de calcita y dolomita en las etapas paragenéticas I y II sugieren condiciones ácidas, que pasarían a neutras en la etapa III como indica

la precipitación de calcita y dolomita y la menor abundancia de marcasita (Fig. 8). La coprecipitación local de pirrotita y esfalerita en la etapa IIc indican un valor bajo del cociente de actividad de S₂ respecto a O₂.

GEOQUÍMICA DE LAS MENAS

La caracterización geoquímica de las menas ha sido realizada por diferentes métodos. Los primeros resulta-

Mineral paragenesis	I Fe-Zn	II Zn-Fe-Ba-(Pb-As-Mn)			III As-FE.Pb (Mn-Au)	IV Sup. Ox.
		IIa	IIb	IIc		
Pyrite						
Marcasite						
Sphalerite						
Pyrrhotite						
Galena						
Sulfosalts:						
- Jordanite						
- Baumhauerite						
- "Mineral X"						
- Pb-AS-S-Compound						
"Melnikovite"						
Blumen						
Realgar						
Orpiment						
Gold						
Arsenic						
Baryte						
Rhodochrosite						
Dolomite						
Calcite						
Smithsonite						
Mn-oxide						
Limonite						

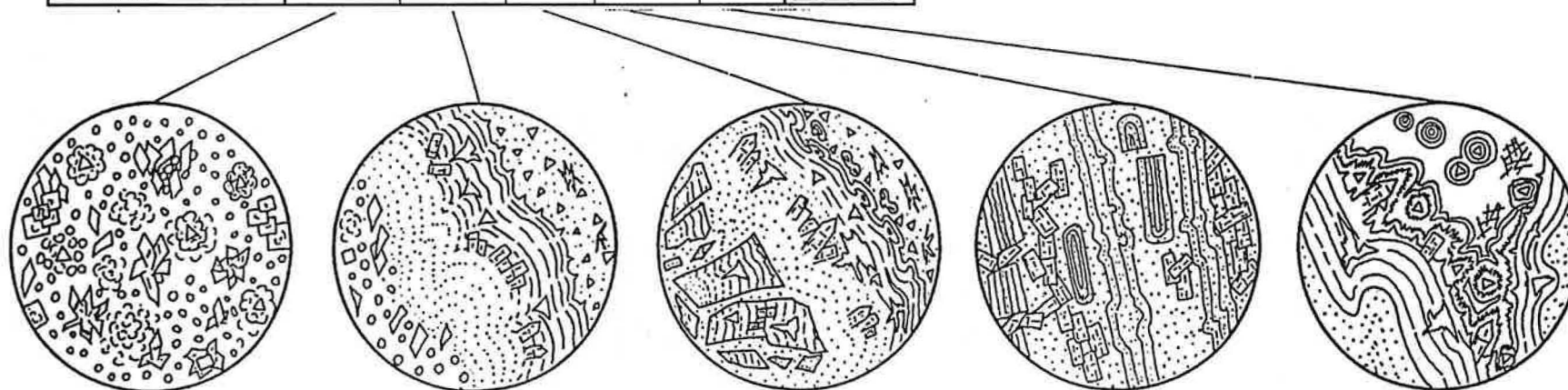
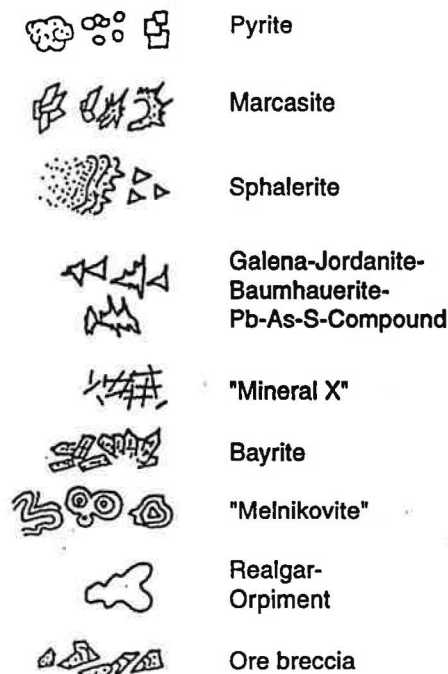


FIG. 8 PARAGÉNESIS MINERAL Y PRINCIPALES TEXTURAS E INTERCRECIMIENTOS DE LAS MENAS EN EL YACIMIENTO AZULCOCHA.

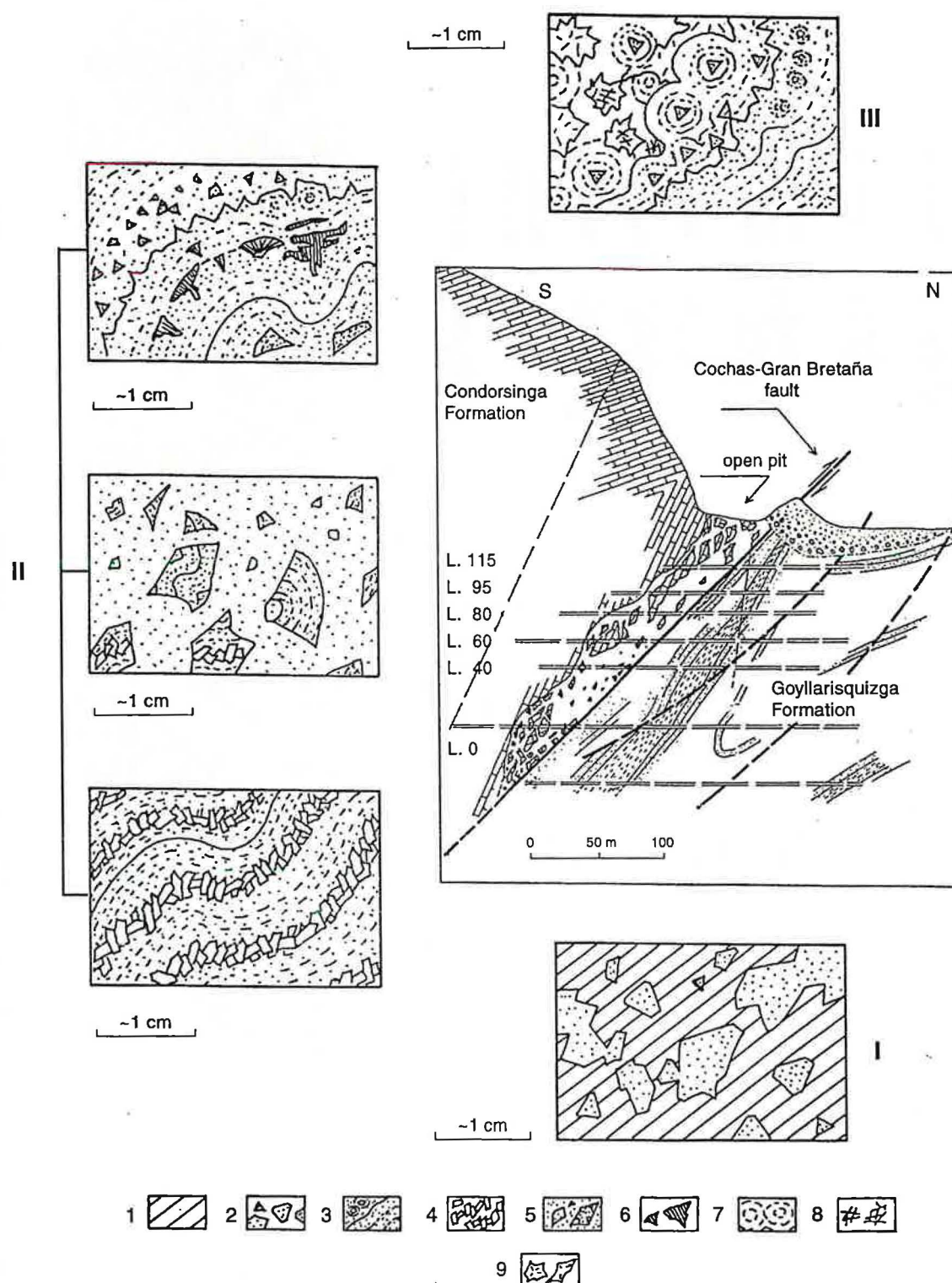


FIG. 9 Intercrecimientos representativos de las principales etapas de mineralización en el yacimiento Azulcocha.

I: primera etapa de mineralización; II: segunda etapa de mineralización; III: tercera etapa de mineralización.
1: marcasita-pirita; 2: cristales de esferita; 3: esferita bandada (schalenblenda); 4: barita; 5: brecha mineral; 6: sulfosales y galena; 7: "melnicovita"; 8: "Mineral-X"; 9: oropimente y rejalgar.

dos fueron obtenidos por Soler (1984) sobre doce muestras de mena y siete muestras de diferentes etapas del proceso de concentración. En la Tabla 3 se resume los contenidos de los elementos mayores y trazas en el yacimiento Azulcocha.

Se han encontrado valores relativamente altos de Ge (20-115 ppm), Cd (100-2500 ppm), In (1-40 ppm), Hg (10-120 ppm) y Tl (10-280 ppm). Los valores de Cd, Ge e In en concentrados de Zn de los yacimientos Azulcocha, San Vicente y Shalipayco se encuentran bastante cercanos (Muñoz, 1994; Soler y Lara, 1990). Los contenidos de Hg en concentrados de Zn en Azulcocha y Shalipayco son más altos que en los demás yacimientos del centro del Perú. Así mismo, el contenido de Tl en las menas y concentrados de Azulcocha es mayor que en otros yacimientos del centro del Perú. Según los estudios con la microsonda electrónica el Tl también se encuentra en las sulfosales, galena y los sulfuros de Fe. El As no solo ocurre como sulfuro y sulfosal, sino que es un componente importante de los sulfuros de Fe, especialmente de la marcasita y "melnicovita". La correlación significativa y negativa entre el As y Sb puede explicarse por una sustitución por diadoquia en la serie isomórfica jordanita-geocronita (Muñoz, 1994).

Una peculiaridad del yacimiento es el contenido de oro en cantidades económicamente interesantes. Mediciones con la microsonda electrónica, confirmadas por análisis ICP/MS, indican que el oro está asociado principalmente a la "melnicovita" rica en arsénico (hasta 7.8% As) y a la marcasita de la tercera etapa de mineralización. La concentración más alta de oro es de 70 ppm, medida en un concentrado mineral de «melnicovita» y marcasita (Fig. 10). El contenido y distribución del oro es irregular tanto en las menas como en el yacimiento.

En el área del yacimiento no se ha observado alteración hidrotermal importante, sin embargo al sur del yacimiento se observan silicificación y dolomitización asociadas a fallas secundarias. Barita, calcita y dolomita ocurren rellenando espacios vacíos.

INCLUSIONES FLUIDAS

Las inclusiones fluidas han sido siempre observadas en barita, eventualmente en rodocrosita, esfalerita y oropimente. Las inclusiones en barita son las únicas adecuadas para su investigación, en los demás minerales su tamaño demasiado pequeño (< 5 µm) y/o la poca transparencia de estos no permiten distinguir los cam-

bios de estado durante el calentamiento y/o enfriamiento de las inclusiones.

Las inclusiones son abundantes en los cristales de barita de la II y III etapa de mineralización (Fig. 8), son mono (fase líquida) y bifásicas (fase líquida y gaseosa). Las inclusiones fluidas estudiadas varían entre 6 y 35 µm y el volumen de gas ocupa entre 5 y 30% de la inclusión a temperatura ambiental.

Los resultados del estudio de las inclusiones fluidas indican que la formación de los minerales en el yacimiento tuvo lugar a temperaturas relativamente bajas con fluidos moderadamente salinos (Fig. 11). Las temperaturas de homogenización varían entre 90° y 177° C (promedio 131° C) y una salinidad entre 5.3 y 20.0% NaCl equivalente (promedio 12.4%). La presencia de dos generaciones de barita fue determinada según la paragénesis mineral del yacimiento, obtenida principalmente por estudios microscópicos. Sin embargo los estudios de inclusiones fluidas no muestran diferencias claras entre las dos generaciones de barita. De estas observaciones se puede concluir que durante la formación de los minerales primarios en el yacimiento circularon fluidos de composición, salinidad y temperaturas relativamente constantes. Las temperaturas medidas en las inclusiones fluidas concuerdan con el tipo de paragénesis y texturas minerales del yacimiento (Muñoz y Fontboté, 1994).

GEOQUIMICA ISOTOPICA (ISOTOPOS DE Pb Y S)

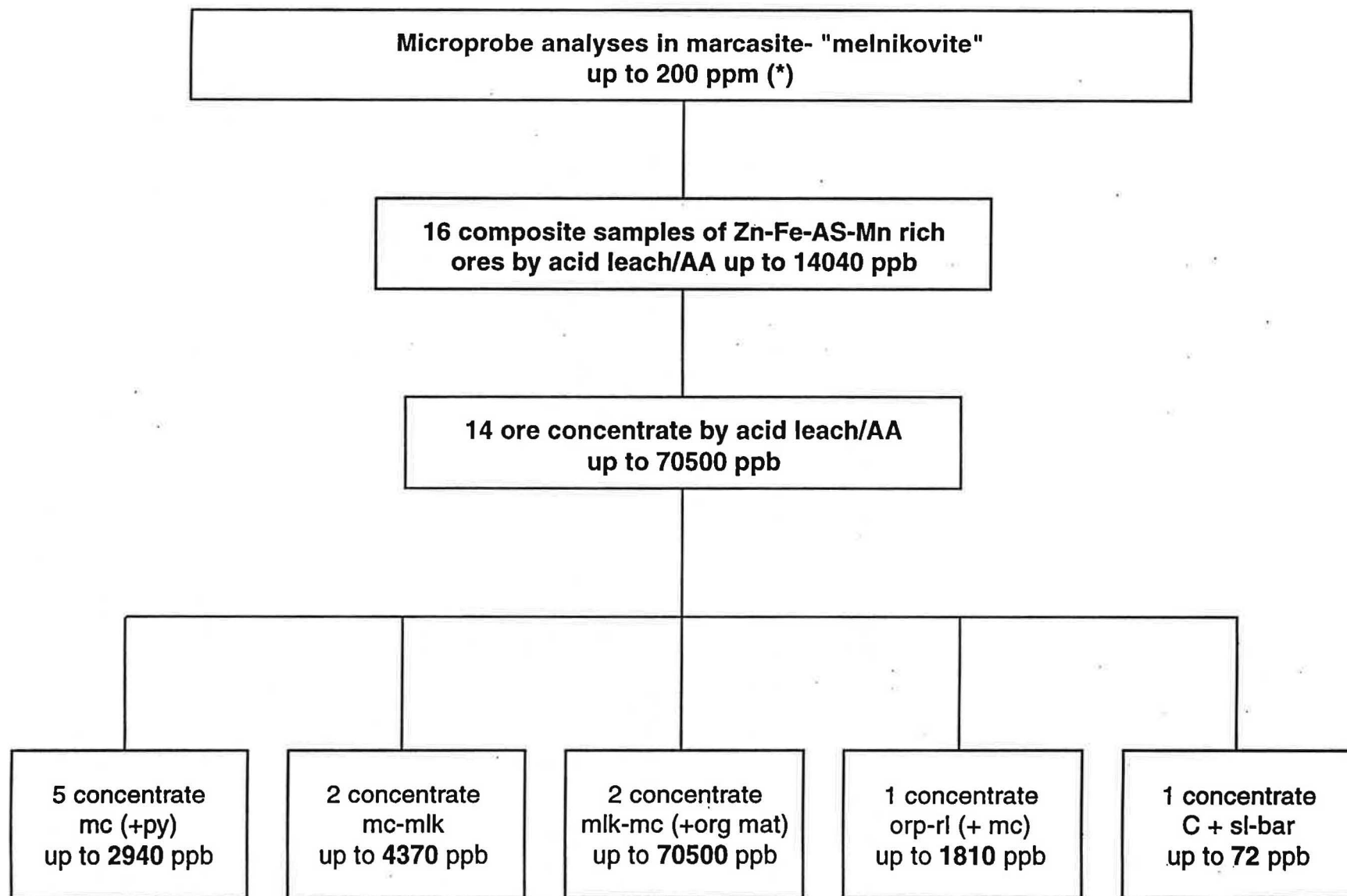
Para los estudios de isótopos de Pb en los yacimientos de Azulcocha, Esperanza Sur, Esperanza Norte y Miraflores se escogieron dieciseis muestras. En el yacimiento de Azulcocha las medidas isotópicas se realizaron en galena y sulfosales, en los yacimientos Esperanza Sur y Norte, y en el yacimiento Miraflores en geocronita.

Los valores isotópicos de plomo en Azulcocha son similares a los de los yacimientos de Zn-Pb de Cercapuquio, Shalipayco y a los del distrito del Domo de Yauli, pero también a los del pórfido cuprífero de Toro Mocho en Morococha (Fig. 12, Gunnesch et al., 1990, Muñoz, 1994). Los análisis fueron efectuados por A. Baumann de la Universidad de Münster (Alemania) y J.Y. Cavez del BRGM (Orleans, Francia). El análisis de los resultados sugiere dos fuentes de plomo. Una componente poco radiogénica, que estaría representada por las rocas volcánicas y volcanoclásticas del Grupo Mito (Pérmico). Una segunda fuente de los me-

Sample	Description	Zn	Pb	As	Fe	Mn	Ga	Ge	Cd	In	Sb	Te	Hg	Tl	Cu	Ni	Co	V	Cr	Au
		%	%	%	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppb
AZ-040-01	IO-ZO	11.47	1.07	2.69	14.33	0.02	4	92	196	0.3	42	0.4	18	21	21	9	7	2	10	121
AZ-040-02	IO	0.14	0.02	0.12	8.41	0.05	2	1	3	0.1	1	0.01	1	8	123	57	66	40	22	24
AZ-0-01	ZO-AO-IO	35.28	1.38	16.67	8.57	0.04	4	26	1368	10	430	25.8	68	40	13	4	3	1	2	1560
AZ-0-02	ZO-AO-MO	26.80	1.29	8.50	7.60	7.88	9	22	1248	3.2	375	2.2	71	82	6	1	4	3	6	960
AZ-0-03	ZO-IO-MO	22.93	0.25	4.36	12.01	6.50	4	27	738	7.9	111	0.3	69	106	15	1	6	6	10	350
AZ-0-04	ZO-IO-MO	23.81	0.09	0.31	11.29	9.37	2	14	900	5	14	0.6	17	34	3	1	5	6	4	74
AZ-0-05	ZO-IO-MO	35.14	0.94	0.45	10.13	6.53	4	23	2364	4.3	143	3.4	80	116	7	1	5	4	6	44
AZ-0-07	IO-ZO	3.69	0.04	0.12	10.95	1.93	2	1	97	0.3	14	0.2	9	3	16	15	6	14	24	77
AZ-40-01	ZO-AO-IO	26.68	1.24	15.78	7.84	1.56	10	19	936	13.2	659	3.2	118	70	14	4	3	2	5	14040
AZ-40-02	ZO-IO-MO	23.40	0.11	2.55	8.62	6.95	2	34	917	3.7	18	0.9	17	74	7	1	4	3	3	360
AZ-40-03	ZO-IO-AO	48.43	4.99	6.65	9.51	0.03	6	113	2040	39.2	179	8.6	64	29	11	4	4	1	6	1020
AZ-60-01	IO-AO	1.52	0.10	5.34	19.42	3.83	2	1	85	1.4	25	5.6	50	122	13	1	9	3	2	1
AZ-60-02	ZO-IO-AO	29.82	3.32	10.09	13.86	0.05	5	82	923	21.5	405	0.3	70	33	17	5	7	3	5	1180
AZ-60-03	ZO-IO	36.00	0.25	4.09	12.40	3.44	3	31	896	6.7	70	2.9	48	99	16	7	7	4	7	930
AZ-95-01	ZO-AO-IO	23.34	2.75	9.68	7.15	6.90	2	8	935	4.5	106	7.2	34	190	7	1	3	2	3	770
AZ-95-02	ZO-IO-AO	35.80	3.74	7.09	10.36	0.41	3	11	2460	3.2	1170	19.2	121	279	11	1	3	1	6	1800

ICP- and ICP/MS analysis (*), except for the Au (Acid leaching/AA). Other results: B <20 ppm, Na <2 ppm, P <100 ppm, Ti <100 ppm, Mo <6 ppm, Rh* <0.2 ppm, Ag <2 ppm, Ba <5 ppm, La <2 ppm, Re* <0.2 ppm, Os* <2 ppm, Ir* <0.1 ppm, Bi* <0.2 ppm, Th* <1 ppm and U* <0.4 ppm. ZO= Zink ore, IO= Iron ore, AO= Arsenic ore, MO= Manganese ore.

TABLA 3
Contenido de Elementos Mayores y Trazas en las Menas del Yacimiento Azúcocha



(*) The microprobe results lie close to the detection limit.

FIG. 10 Diagrama de flujo de los métodos de análisis utilizados para la identificación del oro en el yacimiento Azulcocha. bar: barita; C: bitumen; mc: marcassita; mlk: "melnikovita"; org mat: materia orgánica; orp: oropimente; py: pirita; rl: rejalgar; sl: esfalerita.

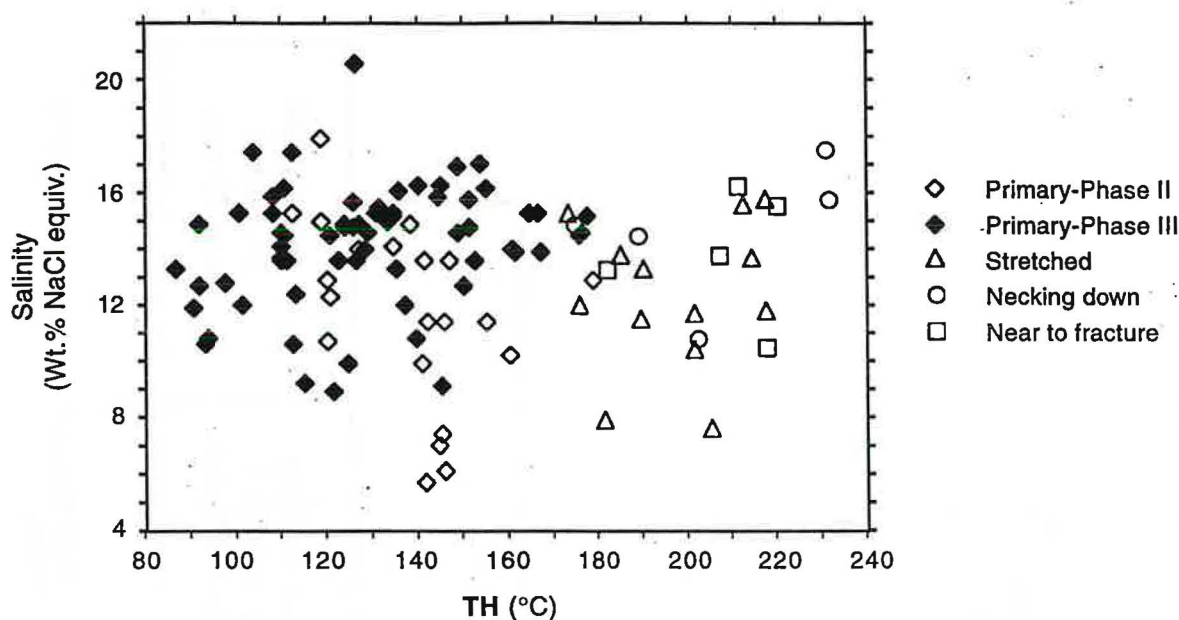


FIG. 11 Diagrama de las temperaturas (Th) de homogenización vs. salinidades de las inclusiones fluidas en barita de las etapas de mineralización II y III.

tales, más radiogénica, serían las rocas del basamento pre-Pérmico o sedimentos y/o rocas intrusivas derivadas de él.

Se realizaron determinaciones de las razones isotópicas de azufre en 14 concentrados monominerálicos seleccionados bajo binocular de esfalerita, marcasita, "melnicovita", galena y barita (Fig. 13). Los análisis fueron efectuados por A. Fallick y P. McConville en el laboratorio de Geología Isotópica (PURRC) en Glasgow/Escocia. Las muestras de sulfuros y de sulfatos muestran poca variación de $\delta^{34}\text{S}$ (entre 2.5‰ y 5.6‰ para esfalerita y 19.7‰ y 23.9‰ para barita en el yacimiento principal). Además se realizaron dos perfiles de análisis "in situ" en una briqueta pulida conteniendo esfalerita (schalenblende), galena y oropimente con resultados en general similares. Los valores indican una fuente homogénea y ausencia de cambios bruscos en las condiciones fisicoquímicas durante la precipitación de sulfuros. Estos datos son compatibles con un episodio mineralizante único. Los dos pares de galena-esfalerita analizados dan temperaturas isotópicas irreales de 399° y 537° C indicando que no se llegó a un equilibrio iso-tópico, algo frecuente en fluidos a baja temperatura.

Como fuente del azufre se propone una mezcla entre azufre de dos reservorios diferentes. Los valores de $\delta^{34}\text{S}$ de la esfalerita y en general de los sulfuros con un rango total entre +1.2‰ y +5.6‰ sugieren que existe

una componente mayoritaria de azufre magmático. Este aporte puede hacerse mediante azufre derivado directamente de un magma silicatado o por lixiviación de sulfuros diseminados en rocas ígneas. Ambas alternativas serían posibles en Azulcocha. Sulfuros ígneos susceptibles de ser lixiviados provendrían principalmente de rocas volcánicas de edad pérmica y terciaria así como de los intrusivos de edad terciaria como son el stock de Chuquipita y el domo de Jesús María. Una potencial fuente directa de azufre magmático es el magmatismo asociado a estos intrusivos terciarios.

Los valores de $\delta^{34}\text{S}$ de los sulfuros son algo más altos de lo que se podría esperar de una mera derivación directa o indirecta de un reservorio de azufre magmático. Puesto que la homogeneidad de los valores y las características de la paragénesis mineral excluyen cambios significativos de pH o de $f\text{O}_2$, parámetros que influyen en el fraccionamiento de los isótopos de azufre (e.g., Ohmoto, 1972, 1986, Zheng & Hoefs, 1993), se debe asumir la presencia de un reservorio de azufre más pesado. Este reservorio podría, en principio, estar constituido por las intercalaciones de yeso marino en sedimentos del Triásico Superior a Liásico del Pucará o en sedimentos continentales de edad terciaria (Capas Rojas). La poca variación de los valores $\delta^{34}\text{S}$ indica que la reducción de un posible aporte de SO_4^{2-} no puede haber sido por reducción bacteriana. La presencia de bitumen (Muñoz, 1994) y los valores isotópicos sugieren que la reducción de sulfatos debe haber sido

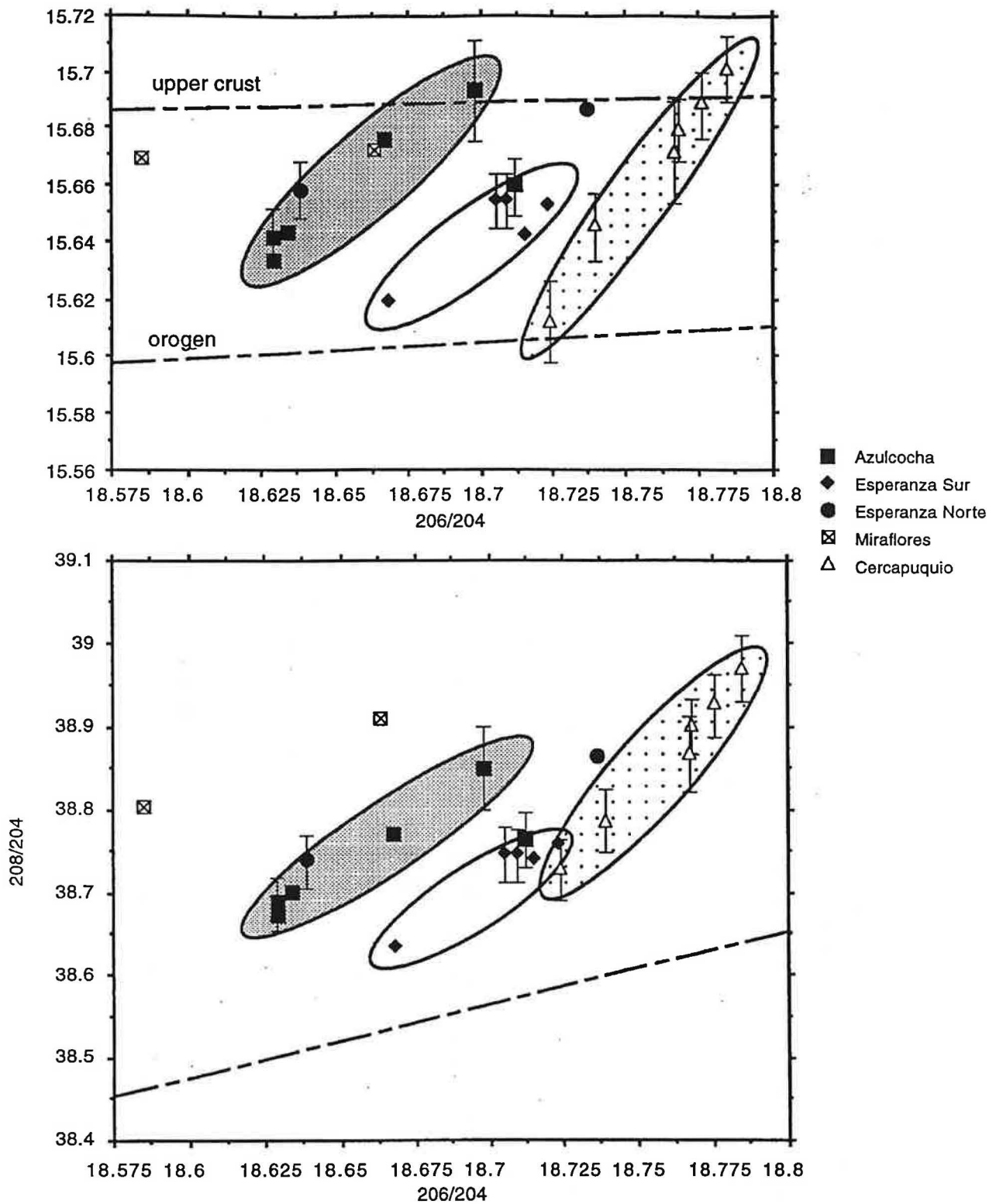


FIG. 12 Composición de los isótopos de Pb ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ y $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) de los yacimientos Azulcocha, Esperanza Sur, Esperanza Norte, Miraflores y Cercapuquio. Los datos isotópicos del yacimiento Cercapuquio corresponden a Cedillo (1990), las curvas de crecimiento del Pb han sido tomadas de Doe y Zartmann (1979).

Mineralphase

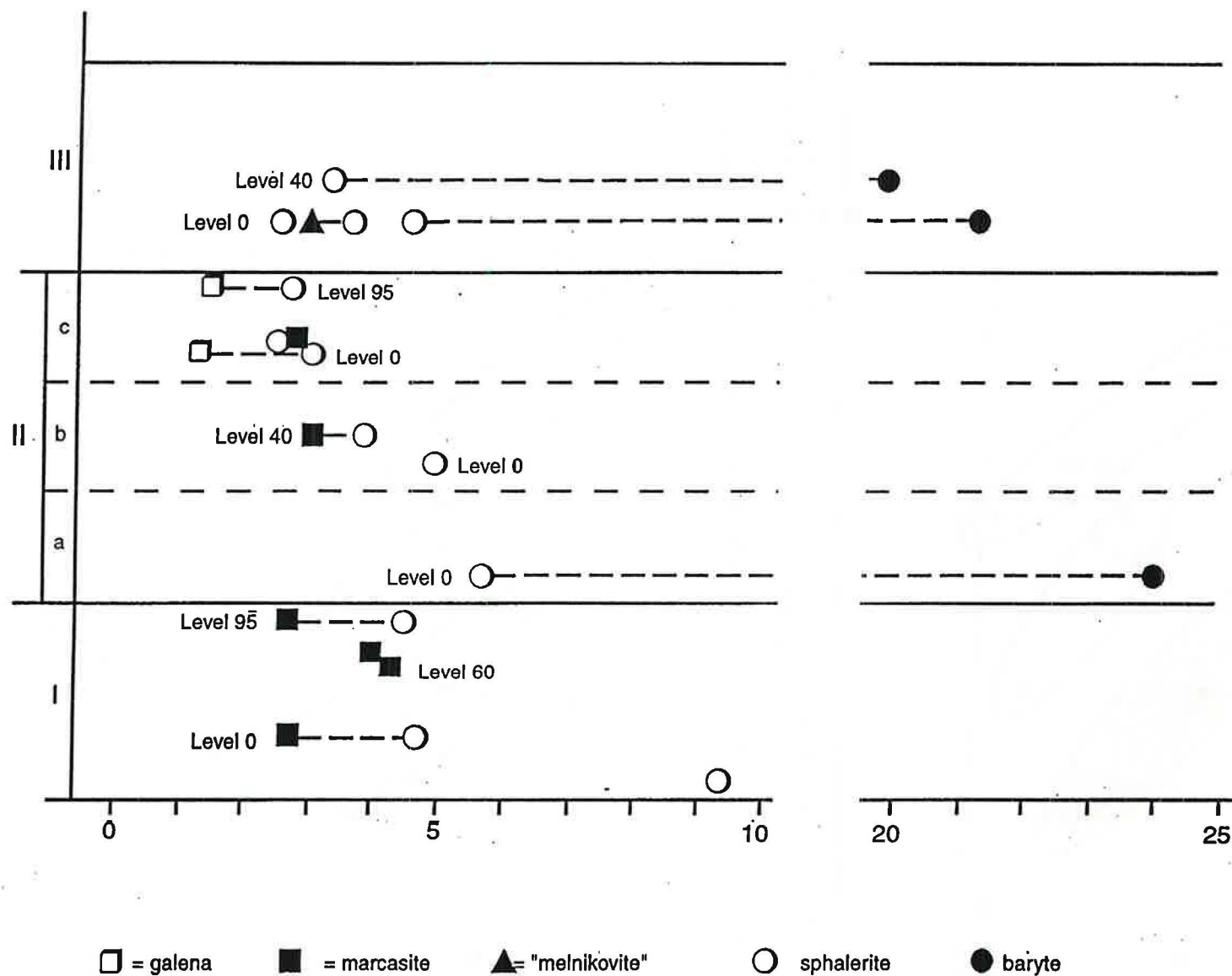


FIG. 13 Relaciones isotópicas del azufre ($\delta^{34}\text{S}$) en esfalerita, galena, marcasita, "melnikovita" y barita del yacimiento Azulcocha.

abiogénica. En los últimos años se están acumulando evidencias de que la reducción termoquímica de sulfatos mediante hidrocarburos (Orr, 1974) es un proceso que también tiene lugar en el rango de temperaturas de 100° a 160° C asumido para Azulcocha (e.g., Gorzawski et al., 1990, Spangenberg, 1995, Goldhaber et al., 1995).

La composición isotópica de las muestras de barita también apoya las hipótesis de que el azufre del yacimiento de Azulcocha es el resultado de la mezcla de azufre de un reservorio "magmático" y otro constituido por sulfatos evaporíticos. Los valores de $\delta^{34}\text{S}$ en barita de Azulcocha varían entre +19.7‰ y +23.9‰ y son demasiado livianos para que ésta haya sido precipitada en equilibrio del mismo fluido que formó los sulfuros. Una observación similar se ha hecho para la mayoría de los yacimientos formados a temperaturas debajo de 350° C (Ohmoto & Lazaga, 1982) y se puede explicar como el resultado de mezcla de un fluido rico en SO_4^{2-} y otro en H_2S , guardando cada especie de azufre "memoria" de su composición original (Ohmoto & Lazaga, 1982, Zheng & Hoefs, 1993). En Azulcocha el valor máximo de $\delta^{34}\text{S}$ en la barita asciende a +23.9‰ y corresponde a la composición de azufre en el fluido dominado por SO_4^{2-} . Este valor, y los de todas las muestras de barita medidas, son considerablemente más altos que los $\delta^{34}\text{S}$ en evaporitas del Pucará, cuyos valores medidos están entre +13.1‰ y +13.8‰ (Field et al., 1983) y los asumidos entre +12‰ y +18‰ (Gorzawski et al., 1990). Esto sugiere la necesidad de participación de evaporitas marinas de edad más reciente a las del Pucará. Así, por ejemplo, las evaporitas marinas terciarias tienen un rango de $\delta^{34}\text{S}$ entre +20‰ y +23‰ (Claypol et al., 1980) o de evaporitas continentales igualmente enriquecidas en $\delta^{34}\text{S}$.

A pesar de la homogeneidad de los valores de $\delta^{34}\text{S}$ se observan ligeras tendencias que pueden ser significativas. Así, dentro de la etapa II se observa un cierto descenso de los valores de $\delta^{34}\text{S}$ de generación IIa a IIc. Esto puede explicarse por un aumento del pH del fluido (Ohmoto, 1972), o bien por una ligera disminución en la proporción de fluido oxidado rico en SO_4^{2-} o una disminución de la efectividad de la reducción del sulfato.

De todas formas, debemos subrayar que la proximidad de los valores de $\delta^{34}\text{S}$ de los sulfuros a valores típicos magmáticos indica una predominancia del fluido reducido. Es decir, el que ha derivado su azufre directa o indirectamente de fuentes magmáticas, sobre el oxidado. Esto también concuerda con la ausencia de óxidos en la paragénesis hipogénica de Azulcocha.

DISCUSIÓN

Los resultados de la presente investigación del yacimiento de Azulcocha, incluyendo la paragénesis, la ausencia de alteración y las inclusiones fluidas permiten sugerir un modelo genético con precipitación de metales a baja temperatura. La paragénesis mineral, los resultados de isótopos de azufre y de inclusiones fluidas indican que el fluido mineralizante era salino, estaba reducido y contenía H_2S como especie principal de azufre. Un fluido de estas características sólo puede transportar metales en cantidades apreciables, en particular Zn y Pb, si es ácido.

Hay varios indicios que sugieren que el fluido mineralizante de Azulcocha fue efectivamente ácido. En primer lugar, hay abundantes brechas de colapso, cavidades internas y otras evidencias de disolución de carbonatos. De hecho el cuerpo mineral de Azulcocha está constituido fundamentalmente por relleno de cavidades mientras que fenómenos de reemplazamiento son sólo minoritarios. La paragénesis mineral, con presencia de marcasita y ausencia de calcita y dolomita en las etapas I y II es compatible con un fluido ácido que sería paulatinamente neutralizado hasta precipitar calcita y dolomita en la etapa III.

El mecanismo más probable de precipitación es precisamente la neutralización del fluido ácido en contacto con los carbonatos de la Formación Condorsinga. La disolución de carbonatos de la Formación Condorsinga a lo largo de la falla de Azulcocha provocaría un aumento del pH del fluido, lo que a su vez provocaría un descenso del producto de solubilidad de los metales en solución y la precipitación brusca de los sulfuros que conforman la paragénesis de Azulcocha.

Como se ha indicado más arriba, los resultados de isótopos de azufre también indican un aporte minoritario de fluido oxidado que contiene SO_4^{2-} , respecto al fluido mineralizante principal reducido. Se podría por tanto proponer que fuera la mezcla de los dos fluidos el mecanismo de precipitación. Sin embargo un mecanismo de precipitación por mezcla con fluidos menos salinos parece poco probable por la falta de gradiente en las inclusiones fluidas. Por la misma razón se puede excluir el descenso de temperatura como un factor importante.

Aunque no existen dataciones absolutas de la mineralización del yacimiento de Azulcocha, se ha mostrado que la mineralización es posterior a las principales fases de la tectónica andina y en particular al movimiento principal inverso de la falla Cochabamba-Gran

Bretaña durante la Fase Quechua II. Esto indica una edad máxima de Mioceno Superior, es decir una edad probablemente próxima a la del magmatismo que ha originado el stock de Chuquipita y otros intrusivos en el área. Es por tanto posible que el azufre magmático, que según los datos de isótopos de azufre, constituye el reservorio principal, esté derivado de la actividad ígnea miocena. Sin embargo también es posible que el magmatismo terciario haya actuado sólo como "motor térmico" para hacer ascender fluidos corticales por la falla Cochabamba-Gran Bretaña. Esta última posibilidad estaría apoyada por la composición compleja en elementos mayores y traza de la paragénesis y por los datos isotópicos de plomo que indican una mezcla de una fuente más y otra menos radiogénica.

COMPARACIÓN CON OTROS YACIMIENTOS Y CONCLUSIÓN

Azulcocha ha sido clasificado como «remobilización cástica» dentro del «Grupo de yacimientos estratiformes del Grupo Pucará», es decir en el mismo grupo que los yacimientos de tipo Mississippi Valley (MVT) de San Vicente y Shalipayco (Soler et al., 1986). Si bien la paragénesis es rica en Zn, en marcasita, y las texturas de baja temperatura presentan alguna semejanza con yacimientos del tipo MVT como por ejemplo Reocín, España o el distrito de Silesia Superior, Polonia, los resultados resumidos más arriba muestran que Azulcocha tiene características y un origen distinto al de los yacimientos de tipo MVT en el Pucará. Un rasgo distintivo es la edad, que en los yacimientos estudiados de tipo MVT del Pucará es previa a las fases principales de la tectónica andina (Fontboté y Gorzawski, 1990, Fontboté et al., 1995, Moritz et al., 1995) y en Azulcocha es post-falla de desgarre. Otras diferencias importantes son el origen del azufre y el contenido mineral, con, por ejemplo una paragénesis mucho más rica en As y en Sb en Azulcocha.

Más que con yacimientos de tipo MVT, Azulcocha podría ser comparada en su paragénesis y texturas con yacimientos de Zn-Pb discordantes, en parte vetiformes, formados por fluidos corticales de temperaturas moderadas y encajados en rocas calcáreas como Wiesloch, Alemania (Seeliger, 1963; Schmitt, 1988), o encajados en rocas del basamento como Bad Grund y Andreasberg en el Harz, Alemania (Möller y Lüders, 1993), y Saint Salvy, Francia (Cassard et al., 1994, Muñoz et al., 1993). Una característica similar de este último yacimiento con Azulcocha son los contenidos relativamente elevados de Ge (hasta 2000 ppm en esferita, Cassard et al., 1994). Sin embargo en todos estos

yacimientos, no se reconoce una asociación con actividad ígnea contemporánea.

Si, como hipótesis de trabajo, se asocia Azulcocha al stock granítico de Chuquipita, se reconoce una similitud, con otras mineralizaciones del grupo de yacimientos polimetálicos en el Perú central asociados al magmatismo terciario en el sentido de Soler et al. (1986) y ricos en Zn y en As como son Huarón (Thouvenin, 1984) y Colquijirca (Vidal et al., 1984, Lehne, 1990). Estos dos yacimientos, de la misma forma que Azulcocha, también están asociados, al menos espacialmente, a fracturas profundas (Vidal & Noble, 1994). Azulcocha podría representar en cierta manera un equivalente distal y de menor temperatura dentro de este grupo de yacimientos.

En resumen, se puede proponer que la estructura sigmoidal de la falla Cochabamba-Gran Bretaña y fracturas secundarias asociadas a ésta formaron zonas de debilidad con alta permeabilidad por las cuales ascendieron fluidos mineralizantes moderadamente calientes, reducidos, salinos y ácidos. En contacto con las calizas de la Formación Condorsinga los fluidos atacaron los carbonatos originando cavidades. Sin embargo, la baja temperatura del fluido no permitió originar otras alteraciones significativas. El incremento resultante del pH provocó la precipitación de sulfuros. La mineralización se desarrolló esencialmente en una sola etapa sin que se reconozcan otros gradientes que el incremento de pH. El fluido que precipitó la mineralización contenía una mezcla de azufre predominantemente magmático y en menor medida evaporítico. Una edad miocena máxima de la mineralización sugiere una relación directa o indirecta con intrusiones graníticas en el área.

AGRADECIMIENTOS

Deseamos agradecer al Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD) por la ayuda financiera para esta investigación, y la cooperación de la Compañía Gran Bretaña S.A. durante el trabajo de campo, así como al Dr. C. Vidal por la revisión del manuscrito y las sugerencias.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cassard, D., Chabod, J.-C., Marcoux, E., Bourguin, B., Castaing, Ch., Gros, Y., Kosakevitch, A., Moisy, M. et Viallefond, L. (1994)
 Mise en place et origine des minéralisations du gisement filonien à Zn, Ge, Ag, (Pb, Cd) de Noailhac - Saint-Salvy (Tarn, France). *Chronique de la recherche minière*, 514, 3-27.

- Cedillo, E. (1990)**
Stratabound Lead-Zinc Deposits in the Jurassic Chaucha Formation, Cercapuquio District, Central Peru. Diss., Univ. Heidelberg, 201 p. (no publ.)
- Claypool, G.E., Holser, W.T., Kaplan, I.R., Sakai, Z. & Zak, I. (1980)**
The age curves of sulfur and oxygen isotopes in marine sulfate and their mutual interpretation. *Chemical Geology*, 28, 199-260.
- Doe, B.R. & Zartmann, R.E. (1979)**
Plumbotectonics I, the Phanerozoic. In: Barnes, H.L. (ed.) *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*, Wiley, New York, 22-70.
- Field, C.W., Rye, R.O., Dymond, J.R., Whelan, J.F. & Senechal, R.G. (1983)**
Metaliferous sediments of the East Pacific. In: Shanks, W.C. III (ed.) *Cameron Volume of unconventional mineral deposits*, Soc. Mining Eng., New York, 133-156.
- Fontboté, L. & Gorzawski, H. (1990)**
Genesis of the Mississippi Valley-type Zn-Pb deposit of San Vicente, Central Peru: geological and isotopic (Sr, O, C, S) evidences. *Economic Geology*, 85, 1402-1437.
- Fontboté, L., Spangenberg, J., Oldham, L., Dávila, D., Febres, O. (1995)**
The Mississippi Valley-type zinc-lead mine of San Vicente, Peru. In: Leach, D.L. & Goldhaber, M. (eds.) *Extended abstracts, international Field Conference on Carbonate-hosted Lead-zinc Deposits*, St. Louis, Missouri, 83-86.
- Gorzawski, H., Fontboté, L., Field, W.C. & Tejada, R. (1990)**
Sulfur isotope studies in the zinc-lead mine San Vicente, Central Peru. In: Fontboté, L., Amstutz, G.C., Cardozo, M., Cedillo, E. & Frutos, J. (Eds.) *Stratabound ore deposits in the Andes*. Springer Berlin, Heidelberg, 305-312.
- Goldhaber, M., Church, S.E., Doe, B.R., Taylor, C. & Gent, C.A. (1995)**
Sources and transport paths for MVT ore deposit lead and sulfur in the Midcontinent of the U.S.A.. Leach, D.L. & Goldhaber, M. (eds.) *Extended abstracts, International Field Conference on Carbonate-hosted Lead-zinc deposits*, St. Louis, Missouri, June 1995, p. 11-114.
- Gunnesch, K., Baumann, A. & Gunnesch, M. (1990)**
Lead isotope variations across the Central Peruvian Andes. *Economic Geology*, 85, 1384-1401.
- Lehne, R. (1990)**
The polymetallic ore deposit of Colquijirca, Central Peru. In: Fontboté, L., Amstutz, G.C., Cardozo, M., Cedillo, E. & Frutos, J. (Eds.) *Stratabound ore deposits in the Andes*. Springer Berlin, Heidelberg, 615-620.
- Mégard, F. (1979)**
Estudio geológico de los Andes del Perú central. *Bol. Inst. geol. min. met.*, serie D, 8, 227 p.
- Möller, P. & Lüders, V. (eds.) (1993)**
Formation of hydrothermal vein deposits. A case study of the Pb-Zn-Ba and fluorite deposits of the Harz mountains. *Monograph series on mineral deposits*, 30, Borntraeger, Stuttgart, 291 p.
- Moritz, R., Fontboté, L., Spangenberg, J., Rosas, S., Sharp, Z. & Fontignie, D. (1996)**
Sr, C and O isotope systematics in the Pucará Basin, Central Peru: comparison between Mississippi Valley-type deposits and barren areas. *Mineralium Deposita*, V. 31.
- Munoz, M., Boyce, A.J., Fallick, A.E., Courjault-Radé, P. & Tollon, F. (1993)**
Multi-stage geochemical signatures from the vein system of the Saint Salvy Zn deposits, SW France: Fluid inclusion and stable isotope evidence. In: Fenoll Hach-Ali, P., Torres-Ruiz, J. & Gervilla, F. (eds.) *Current research in geology applied to ore deposits. Proceedings of the Second Biennial SGA Meeting*, Granada, Spain, 183-186.
- Muñoz, C. (1994)**
Geologische, mineralogische und metallogenetische Untersuchungen des Jatunhuasi-Azulcocha-Chuquipita Gebietes, mit besonderer Berücksichtigung der Zn-As-(Au)-Lagerstätte Azulcocha, Zentralperu. Heidelberg *Geowiss. Abh.* 73, 379 p.
- Muñoz, C. & Fontboté, L. (1994a)**
Azulcocha - ein an eine Blattverschiebung gebundener massiver Zn-As-(Au)-Erzkörper in Zentralperu. *Erzmetall*, 47, 394-402.
- Muñoz, C. & Fontboté, L. (1994b)**
Mineralización de Zn-As-(Au) de baja temperatura en la falla de desgarre Cochabamba-Gran Bretaña: El yacimiento Azulcocha (Perú Central). *Resúmenes Extendidos, VIII Congreso Peruano de Geología*, Lima, 23- 25.
- Narváez, S. & Guevara, C. (1968)**
Mapa geológico a escala 1:100000 del cuadrángulo de Huancavelica. *Serv. geol. min.* Lima.
- Nishihara, M., Nemoto, T. & Yokokawa, K. (1977)**
Geology, ore deposits and prospecting of the Gran Bretaña mine, central Peru. *Mining Geology*, 27, 143-154 (en japonés).
- Ohmoto, H. (1972)**
Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits. *Economic Geology*, 67, 551-578.

- Ohmoto, H. (1986)**
Stable isotope geochemistry of ore deposits. In: Valley, J.W., Taylor, H.P. & O'Neil, J.R. (eds.) Stable isotopes in high temperature geological processes. Reviews in Mineralogy, 16, 491-559.
- Ohmoto, H. & Rye, R.O. (1979)**
Isotopes of sulfur and carbon. In: Barnes, H.L. (ed.) Geochemistry of hydrothermal ore deposits, Wiley, New York, 509-567.
- Ohmoto, H. & Lasaga, A.C. (1982)**
Kinetics of reactions between aqueous sulfates and sulfides in hydrothermal systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46, 1727-1742.
- Orr, W.L. (1974)**
Changes in sulfur content and isotopic ratios of sulfur during petroleum maturation - study of Big Horn basin Paleozoic oils. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 58, 2295-2318.
- Rosas, S. (1989)**
Sedimentologische Untersuchungen der Formationen Cercapuquio und Chaucha im Gebiet der Erzlagertätte Azulcocha - Zentral Peru. Diplom Arbeit, Univ. Heidelberg, 126 p.
- Rosas, S. & Fontboté, L. (1990)**
Análisis sedimentológico y litogeoquímico de las Formaciones Cercapuquio y Chaucha en un corte (12° 04'19"S, 74° 40'45"W) al sur de la mina Azulcocha, Perú Central. *Bol. Soc. Geol. Perú*, 81, 15-32.
- Salazar, L. & Montoya, L. (1987)**
Estudio técnico-financiero de la Sociedad Minera Gran Bretaña S.A., unidades de Azulcocha y Contonga. Reporte interno de la Sociedad Minera Gran Bretaña S.A., 3, 87 p.
- Schmitt, B. (1988)**
Mineralogische und petrographische Untersuchungen anschnittgebundenen Cu-und Pb-Lagerstätten im Saarland und in Lothringen (Buntsandstein) sowie an der schichtgebundenen Lagerstätte Wiesloch (Muschelkalk). Ph. D. Thesis, Univ. Heidelberg, 341 p.
- Seeliger, E. (1963)**
Die Paragenese der Pb-Zn-Erzlagertätte am Gänsberg bei Wiesloch (Baden) und ihre genetischen Beziehungen zu den Gängen im Odenwaldkristallin, zu alt Wiesloch und der Vererzung der Trias des Kraichgaues. *Jb. geol. Landesamt Baden-Württemberg*, 6, 239-299.
- Soler, P. (1984)**
Etude de la repartition de certains elements mineurs on traces associés an plomb et an zinc dans les gisements polymetalliques des Andes Peruvienes. ORSTOM, Paris, 94 p.
- Soler, P. y Lara, M.A. (1990)**
Minor and trace elements in the polymetallic stratabound ore deposits of the central Peruvian Andes. In: Fontboté, L. Amstutz, G.C., Cardozo, M., Cedillo, E. & Frutos, J. (Eds.) Stratabound ore deposits in the Andes. Springer Berlin, Heidelberg, 735-748.
- Soler, P., Grandin, G. & Fornari, M. (1986)**
Essai de synthèse sur la métallogenie du Pérou. *Géodynamique*, 474, 33-40.
- Soulas, J.P. (1975)**
Las fases tectónicas jóvenes de los Andes centrales del Perú. *Bol. Soc. geol. Perú*, 50, 77-86.
- Soulas, J.P. & Mégard, F. (1979)**
Kinematics and tectonic significance of sigmoidal fault and fold systems in central Peru, 21 p. (no publ.).
- Spangenberg, J. (1995)**
Geochemical (elemental and isotopic) constraints on the genesis of the Mississippi Valley-type zinc-lead deposit of San Vicente, Central Peru. *Terre & Environnement*, 1, 123 p.
- Thouvenin, J.-M. (1984)**
Le gisement polymetallique à Zn-Pb-Cu-Ag de Huaron (Pérou): description des corps minéralisés, étude paragenétique, datations K/Ar des altérations hydrothermales, répartition de l'argent. *Chronique de la recherche minière*, 477, 35-54.
- Vidal, C., Mayta, O., Noble, D.C. & Mckee, E.H. (1984)**
Sobre la evolución de las soluciones hidrotermales desde el centro volcánico de Marcapunta en Colquijirca-Pasco. *Vol. Jubilar Soc. Geol. Perú, Fasc. 10*, 1-14.
- Vidal, C. y Noble D. (1994)**
Yacimientos hidrotermales controlados por magmatismo y estructura en la región central del Perú. Resúmenes extendidos, VIII Congreso Peruano de Geología, Lima, 48-52.
- Wilson, J.J. (1963)**
Cretaceous stratigraphy of central Andes of Peru. *Bull. Amer. Ass. Petrol. Geol.*, 47, 1-34.
- Zheng, Y.-F. & Hoefs, J. (1993)**
Carbon and oxygen isotopic covariations in hydrothermal calcites. Theoretical modeling on mixing processes and application to Pb-Zn deposits in the Harz Mountains, Germany. *Mineralium Deposita*, 28, 79- 89.