

Investigación geoquímica en un yacimiento 'sedex' del Ordovícico Inferior: Mina El Aguilar, Jujuy, Argentina (23° 12' S)

José L. Martín
Fernando J. Flores
Ricardo J. Sureda

Universidad Nacional de Salta, Argentina
Compañía Minera Aguilar S.A., Argentina
Universidad Nacional de Salta y CONICET, Argentina

RESUMEN

Se presenta una síntesis del primer estudio geoquímico realizado en los depósitos estratiformes de plomo y zinc de la mina El Aguilar, provincia de Jujuy, Argentina. Sus objetivos han sido orientar la exploración de nuevos cuerpos de mena y responder a los variados interrogantes genéticos que plantean estos grandes y complejos depósitos minerales. La información analítica cubre 32 elementos químicos (Pb, Ag, Cu, Sb, Zn, Cd, Fe, Mn, Ti, Ba, V, Y, Mg, Sr, Ca, La, Sn, Bi, Be, B, Co, Ni, As, Cr, Mo, W, Hg, Zr, Ga, Sc, Ge, Nb) que corresponden a 9.181 datos analíticos procedentes de tres muestreos geoquímicos independientes, con un total de 1.297 muestras. Estos datos se han valorado en relación a las rocas portadoras y a los diferentes tipos estructurales de menas. Los resultados obtenidos avalan un modelo genético sedimentario-exhalativo ('sedex') y la relación sinsedimentaria de las menas metalíferas principales con el depósito de la Formación Padrioc. Se aprecia la concentración Zn, Pb, Ba, Mn, Fe, Ag, Cu y Cd, tanto en las lagunas sulfuradas densas como en las bocas de emisión hidrotermal y sus halos de alteración sobre el fondo marino del Tremadociano inferior. De igual modo, es clara la vinculación de Be, Bi, Sn y La con los fenómenos metamórficos y metasomáticos ligados al emplazamiento del Granito Aguilar y a otras magmatitas de filiación alcalina durante el Cretácico Inferior.

Palabras claves: Geoquímica minera, Plomo, Zinc, Depósitos estratiformes 'sedex', Ordovícico Inferior, Tremadociano, Jujuy, Argentina.

ABSTRACT

Geochemical exploration of an Early Ordovician sedex deposit: El Aguilar Mine, Jujuy, Argentina.
A synopsis on the first geochemical study from El Aguilar mine is described. Several zinc-lead stratiform orebodies lie over the east slope of the Aguilar range, Jujuy province, Argentina. This geochemical work supplies a valuable contribution to mining development and ore genesis approach. It includes thirty two elements (Pb, Ag, Cu, Sb, Zn, Cd, Fe, Mn, Ti, Ba, V, Y, Mg, Sr, Ca, La, Sn, Bi, Be, B, Co, Ni, As, Cr, Mo, W, Hg, Zr, Ga, Sc, Ge, Nb) and 9,181 analyses from three geochemical sampling programs with a whole amount of 1,297 samples. The data can be reconciled with the enclosing host rocks, ore structure types and certain geological processes. As it would be expected, there is a good agreement with the so called sedex genetic model. The spatial distribution of Zn, Pb, Ba, Mn, Fe, Ag, Cu and Cd, in the sea-floor brine pools and hydrothermal vents, is stratabound to the siliciclastic sediments of the Padrioc Formation (lower Tremadoc). On the other hand, Be, Bi, Sn, and La are interpreted to gain access during the Aguilar Granite intrusion in the Lower Cretaceous.

Key words: Geochemistry, Lead-zinc sedex deposits, Ordovician, Tremadoc, Jujuy, Argentina.

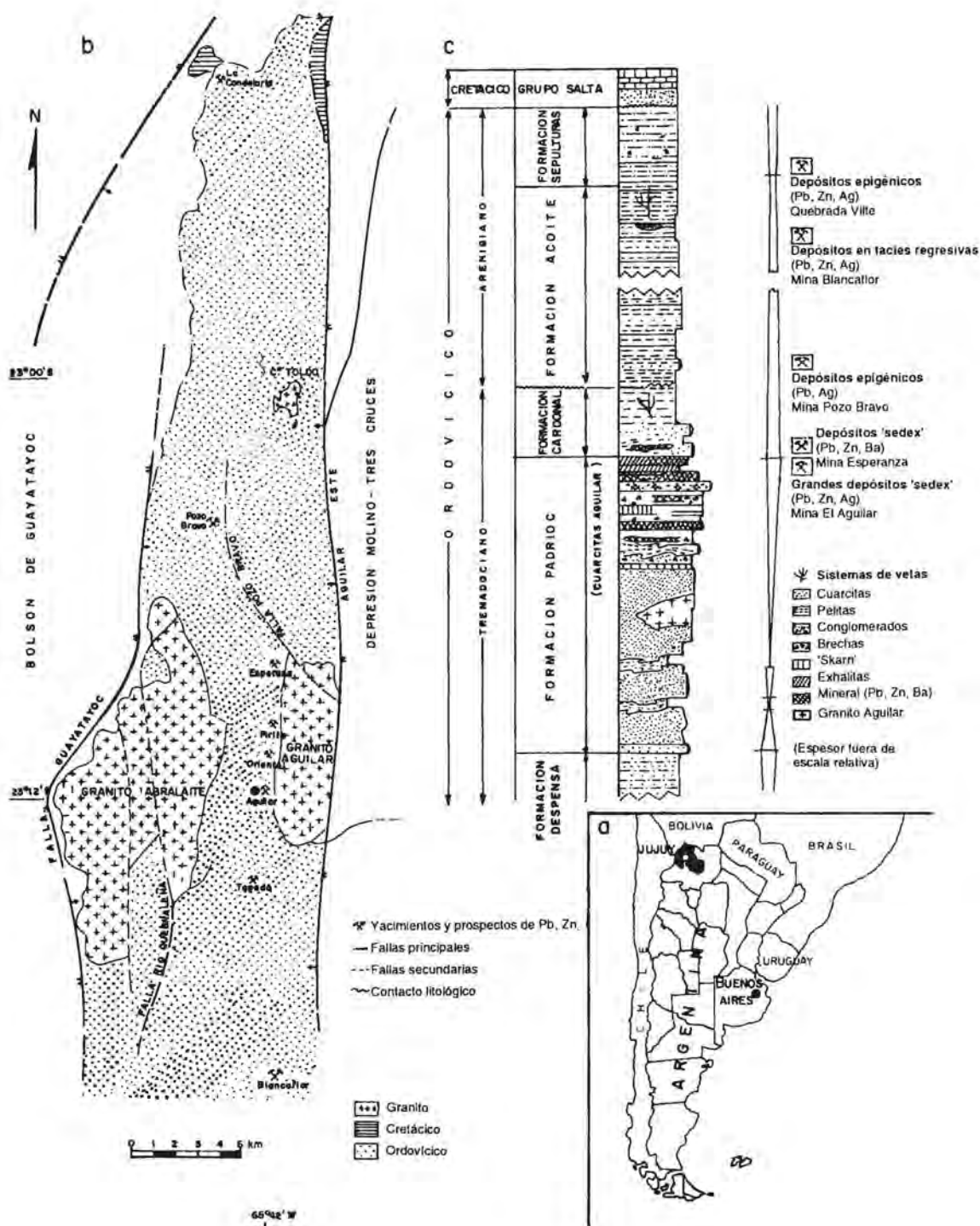


FIG. 1. a- Mapa de ubicación geográfica del área estudiada; b- esquema geológico de la sierra de Aguilar, Jujuy, Argentina; c- columna estratigráfica simplificada, con énfasis en el Paleozoico de la sierra de Aguilar y con la posición de sus yacimientos de plomo y zinc.

INTRODUCCION

Se ofrece una síntesis de la geología de la región de El Aguilar como marco adecuado para describir el primer estudio geoquímico realizado en sus depósitos de plomo y zinc. El programa revistió un doble carácter de investigación básica y de exploración minera con el propósito de contribuir a la búsqueda de nuevos cuerpos de mena y reunir evidencias adicionales relativas a la génesis del yacimiento.

La mina El Aguilar se encuentra ubicada en el faldeo oriental de la sierra de Aguilar (23°12'S-65°42'W) en la provincia de Jujuy, Argentina (Fig. 1). Sus depósitos minerales yacen a una altura de 4.500 m s. n. m., en un ambiente geológico limítrofe entre Puna y Cordillera Oriental. La ruta nacional No. 9 es la mejor vía de acceso, con un tramo de 200 km entre las localidades de San Salvador de Jujuy y Tres Cruces, para continuar por un camino asfaltado de 47 km hasta el establecimiento minero.

La explotación sistemática de la mina El Aguilar

comenzó en 1936 y al presente se han producido más de 20 millones de toneladas de menas de plomo y zinc. Hoy constituye la mayor actividad minera de Argentina en metales no ferrosos, con una producción diaria de 2.000-2.200 t y leyes de 4,1% en Pb, 6,1% en Zn y 90-120 g/t de Ag. Sus depósitos representan la mayor concentración conocida de minerales de plomo y zinc en el Paleozoico sudamericano, con un volumen estimado en 30 millones de toneladas.

Los antecedentes publicados con referencias a los depósitos minerales de plomo y zinc de la sierra de Aguilar son numerosos e incluyen los trabajos de Brown (1941, 1962), Spencer (1950), Ahlfeld (1955), Linares (1968), Aceñolaza (1968), Stipanovic y Linares (1969), Angelelli (1971, 1984), Linares y Latorre (1975), Brodtkorb *et al.* (1978), Sureda y Amstutz (1981), Alonso *et al.* (1982), Martín *et al.* (1987, 1989), Barbieri *et al.* (1989), Sureda y Martín (1990a, b), Gemmell *et al.* (1992), Sureda *et al.* (1992) y Sureda (1994).

GEOLOGIA REGIONAL Y METALOGENIA PALEOZOICA

El basamento del Grupo Lerma representa las rocas más antiguas que afloran en la región (Salfity *et al.*, 1975). En su mayor parte es una columna monótona de varios miles de metros de espesor con grauwacas, pelitas y areniscas, en vastas sucesiones turbidíticas rítmicas, pertenecientes a la Formación Puncoviscana (Turner, 1960; Omarini y Baldi, 1984). Este basamento, asignado al Proterozoico superior-Cámbrico Inferior, incluye también algunas unidades menores de calizas, conglomerados y mantos lávicos. Sus depósitos han sido plegados durante los movimientos compresivos de la orogenia Tílica (~550 Ma), en el cierre del ciclo Pampeano. Este conjunto está penetrado por plutonitas apotectónicas cámbricas (Rapela *et al.*, 1992).

En el Cámbrico y sobre una notable discordancia angular de extensión regional, se depositan sedimentos maduros en una plataforma estable caracterizada por el predominio de ortocuarcitas claras y algunos conglomerados de grano fino pertenecientes al Grupo Mesón (Turner, 1960; Sánchez y Salfity, 1990). Con un espesor máximo de 1.500 m, configura una cuenca intracratónica menor. En el ciclo sedimentario cámbrico, las unidades estratigráficas son compara-

tivamente estériles, tanto desde el punto de vista paleontológico como geoquímico. Muestran apenas un fondo regional de 50-200 ppm en metales básicos combinados (Pb+Zn+Cu), con datos del sector suroeste de la cuenca, única información geoquímica disponible en estas unidades.

La riftogénesis y los movimientos distensivos de la fase diastrófica Irúyica originan discordancias suaves, aun cuando los mares ordovícicos transgreden con amplitud la paleogeografía cámbrica. El ambiente de 'rift' propio del Cámbrico Superior-Ordovícico Inferior (~515 Ma) también está ligado al emplazamiento de fuentes geotermales y depósitos 'sedex' en los fondos marinos de la época (Sureda, 1988). Al menos tres episodios de extensión cortical han acontecido en la historia geológica de los Andes centrales. Unos 200 Ma separan los movimientos irúyicos del 'rift' proterozoico en el basamento precámbrico (Omarini y Sureda, 1993). La apertura del 'rift' preandino tiene lugar aproximadamente 380 Ma después (Galliski y Viramonte, 1988). A lo largo del ciclo sedimentario ordovícico, los espesores estratigráficos se incrementan en varios órdenes de magnitud y existen pronunciadas variaciones en las litofacies (Moya,

1988; Aceñolaza, 1992). El 'rift' irúyico aborta con los movimientos compresivos de la fase Guandacol (~470 Ma). El escaso magmatismo asociado al 'rift' es anorogénico, rico en Nb, Zr, Ga y tierras raras livianas. Tiende progresivamente a una filiación intracortical, calcoalcalina, con altos valores $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0,7154-0,7633) (Coira, 1973, 1975; Barbieri *et al.*, 1989). Las emisiones volcánicas aumentan de volumen durante el Arenigiano-Llanvirniano con los movimientos guandacólicos (Salfity *et al.*, 1984), de notable significado metalogénico en una región perteneciente a la Provincia Metalogénica Quiaqueña (Sureda, 1988). El contenido fosilífero y los controles bioestratigráficos son excelentes (Moya *et al.*, 1994). Se registra un marcado aumento en el fondo geoquímico de los metales básicos (400-5.000 ppm de Pb+Zn+Cu). En líneas generales, los distritos mineros con vetas polimetálicas (Au, Cu, Fe, Pb, Zn) yacen en posiciones distales de la cuenca. En cambio, los distritos vetiformes (Pb, Zn, Ba) y los depósitos estratiformes (Pb, Zn, Ba), como El Aguilar, yacen en posiciones proximales o de plataforma (Sureda *et al.*, 1986). En este ciclo sedimentario ordovícico, durante el Caradociano, la metalogenia polimetálica se diversifica y sus yacimientos se extienden desde la latitud de Ananea, Perú, hasta Mendoza, Argentina. Un magmatismo maduro, ensiálico, culminó con la fuerte tectónica compresiva asociada a la orogenia Oclóyica (Ramos, 1986; F.H. Omarini y R.J. Sureda).

Tras un ampl o *hiatus*, el registro geológico prosigue con el emplazamiento de rocas alcalinas, basaltos y plutones graníticos epizonales del 'rift' preandino. Estas unidades penetran las formaciones sedimentarias del Proterozoico superior y el Paleozoico Inferior y Medio a partir de la fase Araucana, en el límite Jurásico-Cretácico (Galliski y Viramonte, 1988). Entre el Valanginiano y el Eoceno medio acontece el depósito de sedimentos continentales del Grupo Salta, el cual concluye con los movimientos compresivos de la fase diastrófica Incaica (Salfity, 1982). Los registros estratigráficos postincaicos son exclusivamente continentales y se encuentran asociados con los episodios de mayor relevancia en la configuración y el ascenso de los Andes centrales.

LA SIERRA DE AGUILAR

La sierra de Aguilar constituye un 'horst' sobre la estratigrafía mesozoica y cenozoica circundante, compuesto en su mayor parte por sedimentitas marinas del Ordovícico Inferior y Medio. Se destaca una

estructura anticlinal mayor de rocas paleozoicas, perturbada en el tramo austral por el emplazamiento de cuerpos graníticos que asoman en ambos faldeos de la sierra (Fig. 1 y fotografía 2).

La columna estratigráfica comienza con la Formación Despensa (Alonso *et al.*, 1982), aflorante en los altos del río Despensa y al oeste de la mina El Aguilar. Consiste en pelitas y areniscas de grano fino gris verdosas, arcosas y grauwas bien estratificadas con algunas intercalaciones conglomerádicas. Esta unidad, de base desconocida, infrayace a la Formación Padrioc y muestra indicios de mineralización. El espesor expuesto es de 350 m.

La Formación Padrioc (Aceñolaza, 1968 *emend.* Alonso *et al.*, 1982) es una sucesión de areniscas arcólicas y areniscas calcáreas, de colores muy claros y granulometría gruesa, con grandes intercalaciones de lutitas negras fosilíferas hacia el techo de la unidad. Se aprecia regionalmente un engranaje lateral con la Formación Lampazar (Harrington y Leanza, 1957) en litofacies marinas transgresivas (Martín *et al.*, 1989). En el área de la mina El Aguilar, y en coincidencia con el tercio superior de los niveles cuarcíticos, existen frecuentes intercalaciones menores de lutitas, calizas, 'chert', conglomerados y brechas de deslizamiento y colapso con niveles bandeados de exhalitas. Hacia la base hay abundantes trazas fósiles (*Skolithos*) y quedan preservadas numerosas estructuras primarias de valor paleoambiental. La sedimentación es somera y de carácter intramareal en régimen transgresivo. Es una unidad muy importante por albergar los mayores depósitos estratiformes en metales de base del noroeste argentino. Se ha medido un espesor mínimo de 560 m y su contenido paleontológico indica una edad tremadociana inferior.

La Formación Cardonal (Harrington, 1937; Martín *et al.*, 1989) es una sucesión de areniscas pardas o gris verdosas con intercalaciones menores de pelitas oscuras, grises o pardas, que se apoya de modo concordante y transicional sobre la unidad anterior. Sólo se han reconocido cuerpos mineralizados pequeños. Se ha medido un espesor mínimo de 340 m de sedimentos depositados en un ambiente marino somero durante el Tremadociano inferior.

La Formación Acoite (Harrington y Leanza, 1957) es la mayor unidad sedimentaria ordovícica de la sierra de Aguilar, tanto por los espesores expuestos -más de 3.000 m- como por la gran extensión de sus afloramientos. En el distrito minero muestra únicamente relaciones tectónicas con las formaciones

¹ 1994. El basamento centroandino y sus cuencas marginales entre el rift irúyico (515 Ma) y la colisión oclóyica (435 Ma) (Inédito). Para ser presentado en el Congreso Geológico Chileno, No. 7, Concepción, Chile.

infrapuestas, pero en el extremo norte de la sierra pasa en concordancia y transición a la Formación Sepulturas (Martín *et al.*, 1987). Es una espesa sucesión turbidítica de grauwacas y pelitas grises, verdosas, interestratificadas con algunos niveles delgados de calizas oscuras y conglomerados sabulíticos de grano fino. El registro fosilífero pertenece al Arenigiano inferior a medio y el ambiente deposicional es marino nerítico. Culmina la estratigrafía ordovícica con la Formación Sepulturas (Harrington y Leanza, 1957) bajo la forma de una sección de areniscas y lutitas rojas o moradas, de 300 m de espesor, que asoma en el tramo norte de la sierra (Martín *et al.*, 1987).

El Mesozoico está representado por cuerpos magmáticos de edad Jurásico Superior-Cretácico Inferior pertenecientes al 'rift' preandino. Se destacan los granitos de Aguilar, Abrolaite y Toldo. En la aureola metamórfica de los dos primeros yace la mayor parte de los depósitos metalíferos de plomo y zinc. Los sedimentos del Grupo Salta se han reconocido al naciente y al norte sobre los flancos de la sierra. Sedimentitas cenozoicas postincaicas completan la columna estratigráfica con una espesa secuencia molásica terciaria (Eoceno medio-Mioceno superior) acumulada en las fosas aledañas. Material de acarreo reciente corona las cumbres por encima de los 4.500 m con morrenas y sedimentos glaciales (Fotografía 1).

MINA EL AGUILAR

Las minas El Aguilar, Oriental y Esperanza contienen grandes depósitos estratiformes de plomo y zinc singenéticos con la sedimentación de las formaciones Padrioc y Lampazar (Sureda y Martín, 1990a; Gemmell *et al.*, 1992; Sureda *et al.*, 1992). Los considerables volúmenes de mena existentes se pueden atribuir a fuentes exhalativas de salmueras metalíferas densas en el fondo marino del Tremadociano inferior. En El Aguilar, varios cuerpos concordantes mayores, con minerales de plomo y zinc, se encuentran ubicados en el tramo superior de la Formación Padrioc. Antiguamente conocida como Cuarcitas Aguilar (Spencer, 1950), esta unidad tiene 200 m de espesor, 70° de buzamiento al oeste y hundimiento axial hacia el sur. El desarrollo actual de la mina expone una visión vertical superior al kilómetro y en los planos inferiores sus estratos tienden a la horizontal, con buzamientos inferiores a 45°. Perteneció al limbo occidental de un anticlinal parcialmente erosionado. Las dimensiones de los cuerpos de mena varían entre 150-1.000 m de largo, 50-300 m de ancho y 5-80 m de

espesor. Estas unidades mineralizadas se extienden a lo largo de ca. 2 km en la aureola metamórfica, junto al borde suroeste del granito Aguilar (Fotografía 2).

La mineralogía primaria de las menas es bastante simple y comprende esfalerita ferrífera (marmatita), galena y pirita. Los acompañantes menores incluyen pirrotina, greigita, calcopirita, tetraédrita, tennantita, pirargirita, alabandina, arsenopirita, magnetita, marcasita y molibdenita. Existe un número considerable de especies minerales adicionales en inclusiones muy pequeñas, la mayoría originadas en transformaciones metamórficas o metasomáticas posdeposicionales (Brodtkorb *et al.*, 1978; Sureda y Amstutz, 1981; Gemmell *et al.*, 1992; Sureda *et al.*, 1992; Sureda, 1994).

ESTRUCTURAS DE LA MINERALIZACIÓN

Las estructuras de la mineralización describen los rasgos meso- y macroscópicos que existen entre las menas y sus rocas hospedadoras. Estas 'texturas' en escala mayor son comunes y significativas en ciertas tipologías de yacimientos minerales estratoligados, tal como sucede en los depósitos 'sedex'. El vocablo 'ore structure' ha sido introducido en la literatura geológica con esta finalidad por Gustafson y Williams (1981, p. 154).

En idioma español, el uso de estructura de la mineralización o estructura de mena es aconsejable, más allá de los simples aspectos lingüísticos de una traducción, por sus analogías evicentes con las estructuras sedimentarias y sus implicancias de acción de fuerzas coetáneas o posteriores a la formación de la roca. También existe una gran distancia conceptual que lo separa de 'ore textures' o texturas de mena y su significado de ensamble mineral, trama o tejido primario durante el depósito, blastesis o cristalización de la paragénesis (Sureda y Martín, 1990b). En la mina El Aguilar, los cuerpos mineralizados se destacan por su posición estratigráfica y por estas características estructurales de las menas (Sureda y Martín, 1990a).

- La estructura **en brechas** es la más común (63%), predominando las brechas intraformacionales ordovícicas. Estas brechas son penecontemporáneas con el depósito de los metales. La estructura consiste, de modo casi exclusivo, en fragmentos angulosos de metacuarcitas claras con tamaños entre algunos centímetros a un metro y medio de diámetro. La matriz muestra esfalerita y cuarzo finamente cristalino, con cantidades menores y variables de galena y pirita. Su

origen se atribuye al flujo, deslizamiento y colapso en las cubetas de salmueras metalíferas densas del fondo marino.

- La estructura **bandeada** (15%) se encuentra con frecuencia por encima de la anterior, o bien interestratificada con ella y con la estructura maciza, a la cual suele pasar en transición. Tiene una mineralogía simple, dispuesta en bandas alternantes, a veces muy finamente laminadas, milimétricas, de pirita y marmatita predominantes en relación a galena. La matriz silícea intercala también en bandas distintivas por su granulometría y las proporciones minerales. Aquí es posible reconocer 'chert', cóculas y otras exhalitas, aun en parajes con metamorfismo en facies de corneanas hornbléndicas. Casi siempre existe concordancia entre la estratificación original de las rocas hospedantes y el bandeamiento de las menas. Se interpretan como formadas en la parte media y superior de las lagunas densas.
- La estructura **diseminada** (10%) es característica hacia el piso de la sección mineralizada. Los sulfuros metálicos se distribuyen de modo homogéneo en la roca, en proporciones que van desde trazas o contenidos subeconómicos, hasta constituir el 70% de la misma. Marmatita y galena son los minerales más abundantes, con proporciones menores de pirita y pirrotina. Suele ser muy común en otros depósitos 'sedex', también hacia la base del sistema geotermal.
- La estructura **maciza** no excede el 5% sobre el total de menas y supone contenidos de sulfuros superiores al 70% de la roca. Estos cuerpos carecen de lineaciones internas en el arreglo textural de sus minerales. Tanto galena como esfalerita oscura (marmatita) suelen configurar cuerpos macizos de dimensiones variables dentro de otros tipos estructurales dominantes.
- La estructura de **cementación** se presenta en los conglomerados polimictos de clastos intra- y extracuencales, cuyos diámetros promedian entre 2 y 4 mm. Están cementados principalmente

por marmatita, con proporciones menores de galena, pirita, pirrotina y calcopirita. Las menas de cementación yacen como lentes elongadas en concordancia con otras rocas hospedantes y suelen pasar en transición a mineralización bandeada o diseminada de marmatita y pirita.

- La estructura **vetiforme** tiende a formar un enjambre de vetillas entrelazadas constituyendo verdaderos 'stockworks'. Se ha desarrollado en el piso de la sección cuarcítica favorable y muestra diseños deformados por la intrusión del granito Aguilar. Son fracturas rellenas con galena dominante y menor proporción de calcopirita, cuya distribución y frecuencia son muy variables, al igual que sus parámetros de espesor y longitud. Argumentos geométricos, geoquímicos y de zonación permiten asociar los principales conjuntos de vénulas oblicuas con estructuras primarias ordovícicas relativas a los vertederos del sistema geotermal. En este sentido, se destacan los frentes de explotación subterránea 14-K-310 y 14-K-305 y sus sistemas de fisuras tensionales con cierta orientación paralela entre sí, pero oblicuas a los planos de la estratificación dominante. Tanto su diseño en superficies cónicas circundando las zonas de menas bandeadas-macizas, con alta relación Pb/Pb+Zn (<0,8), como su relleno de galena predominante, son aspectos muy significativos asociados a las chimeneas de emisión.
- Las estructuras de **reemplazo en el 'skarn'** están asociadas a los silicatos de 'skarn', con amplia y llamativa distribución en el yacimiento. Volumétricamente están siempre muy subordinadas a los otros tipos estructurales. Los sulfuros de plomo y zinc del 'skarn' no superan el 2% de la mineralización total en las evaluaciones de reservas. Las asociaciones minerales comunes contienen esfalerita y galena junto a granates, calcita, rodonita, epidotos, wollastonita, bustamita, diópsido, hedenbergita, tremolita y actinolita, entre una larga lista de especies menos frecuentes.

MÉTODOS Y ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN GEOQUÍMICA

Los escasos antecedentes que existen sobre la geoquímica de los depósitos de plomo y zinc de El Aguilar datan del año 1972 y comprenden 420 análisis

inéditos (J.L. Martín)². Estos análisis se efectuaron sobre 21 muestras generales, esto es, extraídas en rozas verticales sobre el espesor completo del

² 1985, Recopilación de datos geoquímicos, mina El Aguilar (Inédito), *Compañía Minera Aguilar, S.A. (CMASA)*, 23 p.

manto mineralizado y procedentes de los frentes en explotación situados entre la superficie y el nivel 12, además de 40 muestras de diamantinas de exploración.

Los elementos químicos Pb, Ag, Cu, Sb, Zn, Ca, Fe, Mn, Ti, Ba, V, Sn, Bi, Be, Co, Ni, As, Cr, Mo, Hg y Zr, han sido analizados en los laboratorios de la Cordero Mining Company, Rocky Mountain Geochemical Corp. (USA), y Technical Service Laboratories (Canadá). Si bien el muestreo no ha discriminado con claridad la litología o los tipos estructurales de mena, los resultados obtenidos son interesantes con fines comparativos y en relación a otros yacimientos similares (Sureda y Martín, 1990b).

Durante el año 1986, CMASA ejecutó un muestreo geoquímico que comprende 222 muestras del distrito minero, de las cuales 181 muestras pertenecen al yacimiento El Aguilar. Se han analizado los elementos metálicos principales, varios elementos menores en trazas, con indicación de litología, posición estratigráfica y tipos estructurales de la mineralización. La información analítica comprende 31 elementos químicos (Pb, Ag, Cu, Sb, Zn, Cd, Fe, Mn, Ti, Ba, V, Y, Mg, Sr, Ca, La, Sn, Bi, Be, B, Co, Ni, As, Cr, Mo, W, Zr, Ga, Sc, Ge, Nb) determinados en su conjunto mediante técnicas de emisión espectrográfica, de los cuales los seis primeros han sido controlados en forma independiente por métodos de absorción atómica y colorimetría. Se ha utilizado un equipo Jarrell-

Ash 1,5 m cd, cuyos límites inferiores de detección, variables según el nuclido-analito considerado, son los siguientes: As, Fe=500 ppm; Ca, Mg, Zn=200 ppm; Sb, Sr=100 ppm; Cd, W=50 ppm; Ge, La, Nb, Ti, Zr=20 ppm; B, Ba, Bi, Cr, Ga, Mn, Pb, Sc, Sn, V, Y=10 ppm; Co, Ni=5 ppm; Be, Cu, Mo=2 ppm y Ag=1 ppm. La responsabilidad analítica es de los laboratorios de Skyline, USA (SEA) y CMASA, Argentina (EAA+MVH). El estudio ha incorporado, también, 169 muestras generales (composite) de interior de mina en El Aguilar y Oriental, que representan cada una de ellas una unidad promediada -del piso al techo- de la sección mineralizada principal en el tramo superior de la Formación Cuarcitas Aguilar. Estas muestras compuestas comprenden promedios de espesores que oscilan entre 101 y 2 m, sin considerar cambios litológicos o diferentes tipos de menas e incluyen 1.014 muestras individuales. Se han analizado únicamente por Pb, Zn, y Ag, con métodos de vía húmeda y con el fin de mostrar, mediante curvas de isovalores en contenidos metálicos, la tendencia de las concentraciones. Estos análisis se han realizado en el laboratorio de la Compañía Minera Aguilar. La distribución del muestreo en el yacimiento es amplia e implica todo el laboreo minero existente hasta el año 1988 -incluidos los testigos de las diamantinas de exploración- con una extensión longitudinal de 2.200 m, entre superficie y el nivel 24, lo cual equivale a 860 metros de extensión vertical (Fig. 2).

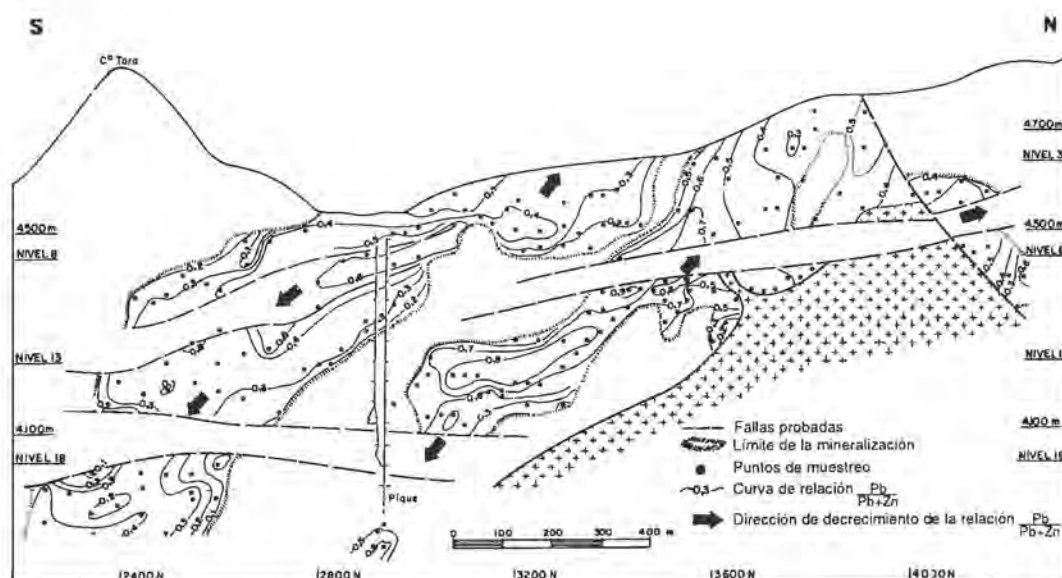


FIG. 2. Perfil longitudinal de la mina El Aguilar, 2.200 m en sentido norte-sur por 860 m de labores en profundidad, que muestra las curvas geoquímicas de isovalores para la relación $Pb/Pb+Zn$, con los límites de los cuerpos de mena y los puntos de muestreo.

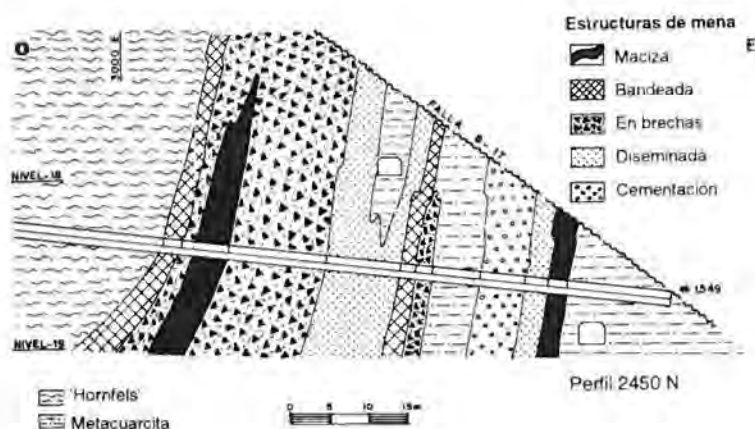


FIG. 3. El perfil transversal 2050 N de la mina El Aguilar representa una sección geológica seleccionada por su baja deformación relativa y por una sucesión estratigráfica característica de tipos de mena o estructuras de la mineralización. Esta sección fue perforada por el sondeo de exploración No. 1.549 y se analizaron sus testigos para obtener un perfilaje geoquímico completo.

DATOS ANALÍTICOS Y DISTRIBUCIÓN DE ELEMENTOS

En el Apéndice, la tabla 1 muestra el contenido de los diferentes elementos analizados en relación con las rocas portadoras y los tipos estructurales de la mineralización. Se indican los valores medios y la desviación estándar. Sus datos se han graficado en los cuadros 1 y 2, con la excepción de Zr, W, Ge, Nb, Sc y Ga, elementos cuyos umbrales analíticos y varianzas no resultan significativos para los factores considerados. Es posible advertir la distribución de los elementos químicos restantes en una columna generalizada, perteneciente a la sección favorable y mineralizada de la Formación Cuarcitas Aguilar o sus niveles estratigráficos equivalentes de la Formación Padrioc. El orden de los elementos, tanto en la tabla como en los cuadros, tiende a reflejar sus afinidades paragenéticas en relación a las fuentes geoquímicas posibles de estos depósitos minerales.

Un perfil transversal detallado en la coordenada 2450 N de El Aguilar (Fig. 3) muestra la respuesta geoquímica a lo largo de una perforación exploratoria (sondaje No. 1.549) mediante los gráficos de la figura 4a-c. La elección de este perfil obedece a la escasa deformación tectónica del sector y a la excelente sucesión litológica o de tipos de mena. Esta sucesión es muy característica del yacimiento y se encuentra casi completa.

Las variaciones más notables de esta sección mineralizada se aprecian hacia el tope, con el incremento en los contenidos de Ba, Mg, Mn, Sr, Ti y Pb en las proximidades del contacto con las corneanas o 'hornfels' correspondientes al tramo superior de la

Formación Padrioc. Estas corneanas manifiestan también un enriquecimiento preferente en B, Sc, Ga, Co, Ni, V e Y. El tramo central del perfil muestra una cuarcita calcárea con rodonita y mineralización metalífera de tipo diseminado, en la cual es muy visible la anomalía en Ca, Mg, Cu, Ag, As, Sb y es menos acusado el amplio pico central de Mn. El arsénico tiene correlación positiva con la presencia de arsenopirita. Hacia la base existe una concentración relativa de Ca, Mg, Be y Sn. La composición mineralógica de las menas de estructura maciza es compatible con los contenidos de elementos principales. Los contenidos químicos de los conglomerados intraformacionales -sea en el yacente o en el resto del yacimiento- pueden ser variables, pero muestran una correlación clara con la asociación mineral predominante (esfalerita/zinc, pirrotina-pirita/hierro, galena/plomo, o muy ocasionalmente, calcopirita/cobre), tanto en la matriz como en los clastos.

La relación cobalto/níquel en las menas promedia 1,5 para el conjunto de los tipos estructurales de mineralización. En el perfil 2450N, la variación es discontinua, con valores extremos de 0,08 y 1,0 y una media de 0,35 (Fig. 4b). Al presente, la información analítica no es la adecuada para valorar su significado (Mercer, 1976), pero en el futuro sería conveniente investigar esta relación en pirita, con la intención de poder asociar ciertas menas a uno de los tres episodios metasomáticos (Mn-Fe) conocidos en el distrito desde el Tremadociano al Cenozoico (Sureday y Martín, 1990b).

La figura 5 ilustra las relaciones porcentuales entre Pb y Zn que vinculan las tendencias promedio de la producción histórica con los recursos medidos actuales y el comportamiento por niveles de estas



FIG. 4. Los gráficos a-c ilustran los contenidos geoquímicos de la sección estratigráfica mineralizada de la figura 3. Se indican, del piso al techo, los tipos litológicos analizados: Cu: cuarcita, Mz: maciza, Di: diseminada, Cg: conglomerado (cementación), Bx: en brechas, Ba: bandeada, Cr: corneana.

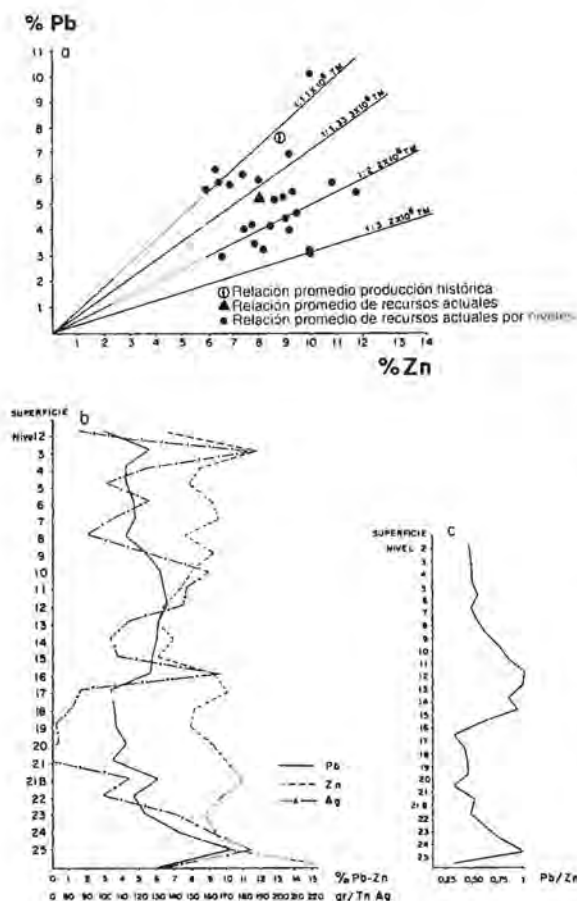


FIG. 5. Los diagramas a, b y c representan los contenidos metálicos de las menas de Pb/Zn, discriminados por los niveles de la explotación minera en El Aguilar.

relaciones. Es posible apreciar la explotación selectiva de las menas plumbo-argentíferas por sobre las zincíferas durante largos años de explotación, tendencia que se refleja de modo preferente en los niveles que albergan las menas bandeadas y macizas, con altas relaciones Pb/Pb+Zn. La distancia entre niveles es de 40 m (Figs. 5b, c). El desplazamiento de la relación promedio de la producción histórica hacia la relación promedio de las reservas actuales (Fig. 5a) indica la evolución de las operaciones mineras en el tiempo cuando queda entre un tercio y la cuarta parte del volumen original de menas en el yacimiento. La composición de los recursos minerales remanentes es acompañada recientemente por una mayor venta relativa de concentrados de zinc conforme a las variaciones que ha sufrido la cotización de los metales en el mercado.

INTERPRETACION DE RESULTADOS E IMPLICANCIAS GEOLOGICAS

La geoquímica general de las rocas en la sección estratigráfica mineralizada de la Formación Padrioc y su equivalente metamórfico cretácico Formación Cuarcitas Aguilar, con especial énfasis sobre las minas El Aguilar y Oriental, muestra la correlación positiva que existe entre los elementos metálicos, por un lado, y los minerales portadores o las estructuras de la mineralización, por el otro. En el distrito minero de la sierra de Aguilar, la valoración del comportamiento del manganeso sobre dos niveles de control en la Formación Padrioc y sus equivalentes metamórficos dentro del yacimiento, destaca su importancia metalogénica asociada con la ubicación de las bocas de emisión hidrotermal en el fondo marino de la época. Ellas se encuentran también muy próximas a las mayores lagunas de salmueras sulfuradas densas. Estos son los lugares de sedimentación final de los fluidos portadores de las menas, localizados por la posición de las estructuras mineralizadas estratiformes del tipo bandeada y de cementación, estas últimas coincidentes con los conglomerados de la Formación Padrioc.

Los halos de manganeso configuran una propiedad bien documentada en relación con varios depósitos estratiformes de plomo y zinc, como ser Meggen en Europa Central (Gwosdz y Krebs, 1977) o Tynagh en Irlanda (Russell, 1974). Estudios mineralógicos orientados a delimitar su dispersión proceden de Sudáfrica y de los Alpes Orientales (Stumpf, 1979). La presencia y la distribución del manganeso es importante como indicador genético en la mayor parte de los sistemas hidrotermales asociados al volcanismo submarino. Destacados ejemplos proceden de los depósitos contemporáneos del Mar Rojo, donde la emisión de soluciones hidrotermales en el fondo marino ha generado importantes acumulaciones de fango enriquecido en metales (Pb, Zn, Cu, Fe, Mn), bajo la forma de lagunas con salmueras sulfuradas densas alargadas paralelamente al eje del 'rift' (Bischoff y Manheim, 1969). En los depósitos mayores -Atlantis II Deep- los halos manganésiferos se extienden hasta 10 km desde las bocas de emisión. Otras anomalías de manganeso proceden de la dorsal centroatlántica (Scott *et al.*, 1974), del 'rift' de Galápagos (Lonsdale, 1977; Edmond *et al.*, 1982) y del 'rift' oriental africano (Degens y Stoffers, 1977).

Las curvas de isovalores para los contenidos metálicos principales (Pb y Zn, Fig. 2), revelan las

mayores concentraciones de menas plumbíferas. La presencia dominante del plomo coincide también con los máximos de otros metales (Cu, Sb, Ag) y refleja una estrecha correspondencia entre galena-calcopirita-bourmonita-pirargirita-freibergita en los tipos de mena maciza, 'skarn'. En cambio, el zinc muestra una correlación positiva con cadmio a través de esfalerita, sin dejar de tener correspondencia global con el Pb en la columna generalizada del yacimiento (Cuadro 1). La concentración de otros metales (Ba, Fe, Ti, Y) es compatible con su posición distal en los halos hidrotermales, y en los perfiles verticales se concentran hacia el techo de la unidad mineralizada (Cuadro 1). Esta acumulación acontece en el 'cap rock', o sombrero de rocas pelíticas que protege del agua de mar el depósito mayor de metales básicos, en la fase final del episodio metalogénico. La acumulación de Mg en la fase final (Cuadro 2) puede interpretarse como un metasomatismo magnesiano deutérico, en régimen de mezcla, citado en el tope de varios depósitos hidrotermales ubicados en centros submarinos en expansión (Zierenberg *et al.*, 1993). Esta distribución geoquímica es utilizada en la exploración de sistemas mixtos de mineralización submarina (Whitehead y Govett, 1974; Goodfellow y Wahl, 1976; Adair, 1992).

El diseño de las envolventes de los isovalores Pb/P+Zn es consistente con la localización de las chimeneas de emisión en el tramo central del yacimiento, en correspondencia con la ubicación de las estructuras en brechas y vetiformes, anómalas por sus contenidos de Pb, Ag, Cu y Sb. A ello se suma la geometría y localización de los sistemas de fisuras tensionales oblicuas entre las coordenadas 3050 y 3100, especialmente en el nivel 14 de la mina. Smee y Bailes (1986) interpretan unos diseños similares, con curvas de máximos en $Pb/(Pb+Zn)=0,8$, como indicadores de la posición de las fuentes hidrotermales metalíferas en el yacimiento Jason (South Zone), Yukón, Canadá. El decrecimiento de la relación Pb/Zn a partir del foco de valor máximo es un fenómeno común en ambos depósitos y concuerda con las previsiones del modelo (Large, 1983).

En cuatro de los más importantes yacimientos estratiformes australianos de plomo y zinc -McArthur, Mount Isa, Squirrel Hills y Broken Hill- se ha demostrado que el contenido de mercurio es independiente del metamorfismo regional posterior de los depósitos y de su intensidad (Ryall, 1981). Sin embargo, las concentraciones localizadas de Hg reflejan su volatilización a partir de los halos primarios y su enriquecimiento secundario en las menas removilizadas, se-

gún pautas propias de la historia evolutiva de cada depósito. En El Aguilar, un estudio del contenido de Hg en los testigos de las diamantinas 707 y 709 (coordenadas 2700 N) se destaca con valores muy elevados, de 3-4 ppm, por sobre un tenor de fondo sedimentario de 0,04 ppm y una clásica correlación positiva con esfalerita (Zn). En este yacimiento no se descarta la influencia del metamorfismo de contacto y la tectónica en la migración de mercurio y su redistribución, pero los datos son insuficientes y el tema merece futuras investigaciones.

Con mucha frecuencia, los depósitos estratiformes de plomo y zinc, del tipo 'sedex', presentan variaciones zonales verticales y horizontales en la distribución de metales. La zonación se manifiesta en las dos direcciones principales de la pila estratigráfica (Large, 1977; van den Boom *et al.*, 1980). Su diseño geométrico se relaciona con el punto o boca de emisión de las soluciones hidrotermales metalíferas, a partir del cual los respectivos sulfuros precipitan en sentido periférico y en orden de solubilidades crecientes (Barnes, 1975). La sucesión lateral común es $Cu \rightarrow Pb \rightarrow Zn \rightarrow Ba$ y la sucesión vertical $Cu \rightarrow Zn \rightarrow Pb$, en donde el Fe suele ser variable a través del sistema zonal. Si bien esta zonación gruesa de sulfuros está controlada por el movimiento de los fluidos hidrotermales y no es exclusiva de los depósitos 'sedex', en estos últimos el Cu tiende a ocupar el área central y el Fe, las zonas distales. Allí precipitó como pirita framboidal o sulfuros de hierro coloidales, cuyas texturas características forman frecuentes palimpsestos en los sectores de bajo grado metamórfico. La relación excéntrica decreciente de Pb/Zn, reconocida en importantes depósitos (Rammelsberg, Silvermines, Tynagh, Mount Isa, McArthur River, Sullivan, Tom, entre otros), es una constante que avala esta regla. En Mina El Aguilar, la zonación lateral marca una tendencia decreciente de la relación Pb/(Pb+Zn) hacia el sur y el norte de un área central delimitada entre las coordenadas 3000 y 3400 N (Figs. 2, 7). De igual modo, las zonas centrales con mineralización maciza de calcopirita-pirrotina (OCA-370, 10-A-379 ST, 13-380-DN, 13-305-XCW) denotan la concentración inmediata de los sulfuros menos solubles (el Fe suele ocupar también el centro del sistema zonal en Sullivan y en Rammelsberg). El área central de El Aguilar presenta un contenido muy elevado de Pb y Cu en los tipos de mineralización vetiformes y en brechas. En los extremos distales del sistema, el Fe y el Ba incrementan de modo visible al sur (C-18 y Blancaflor) o al norte (minas Pirita, Oriental y Esperanza). Algunas

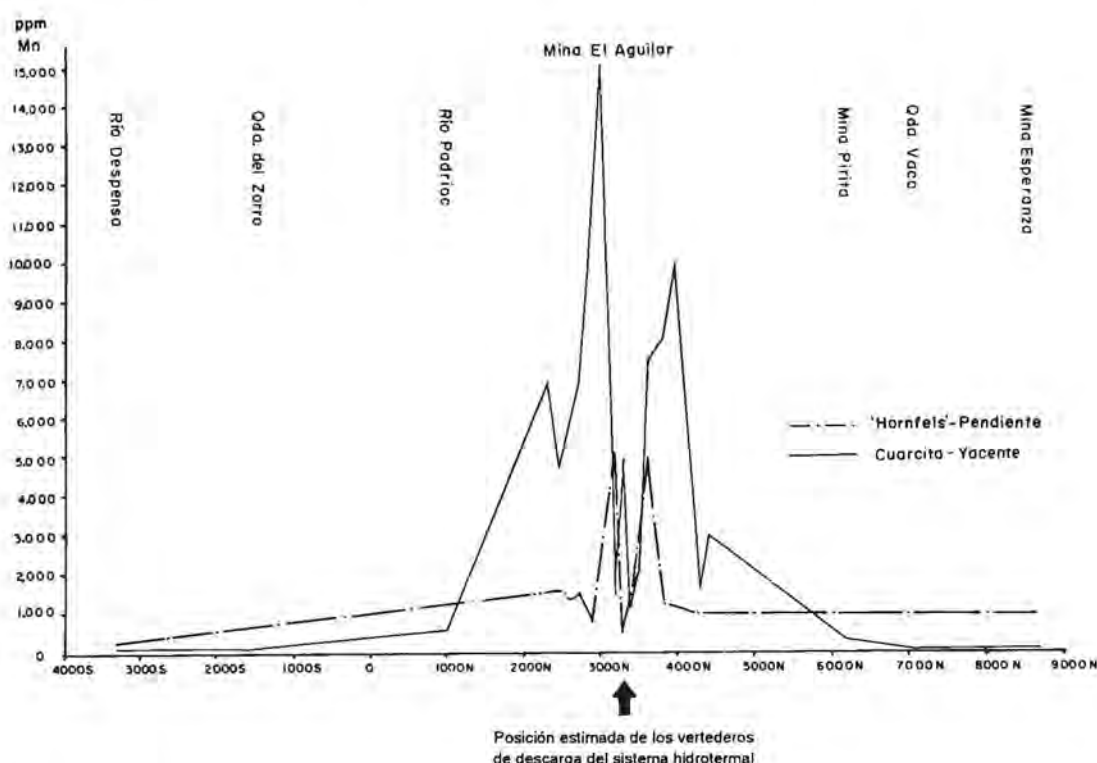


FIG. 6. Perfil geoquímico longitudinal norte-sur, sobre el flanco oriental de la sierra de Aguilar, muestra los contenidos de manganeso de la Formación Padrioc, entre el río Despensa y la mina Esperanza. Las curvas representan dos líneas de muestreo ubicadas en el piso (cuarcitas) y en el techo (corneanas), respectivamente, de la unidad estratigráfica mineralizada en la mina El Aguilar. Su diseño ilustra la extensión del halo de manganeso en el fondo marino del Tremadociano inferior. Se indica la localización estimada de los vertederos del sistema hidrotermal, en posición coincidente con otras evidencias complementarias.

anomalías abiertas en las curvas de isovalores ($Pb/Pb+Zn=0,4$ y $0,6$) en coordenadas 2300 y 4300 N, hace sospechar la existencia de otros centros de emisión, con sus pozas de entrapamiento, satelitarios al sistema principal.

El calcio y el magnesio se distribuyen en estrecha asociación con las menas del 'skarn' (Cuadro 2). Parece evidente que existen, al menos, dos tipos de calizas sedimentarias paleozoicas: una biogénica en relación a matas algales y estructuras estromatolíticas (Sureda y Armstutz, 1981) y otra hidatogénica muy vinculada con exhalitas ('chert', baritina, óxidos de manganeso y hierro) (Sureda y Martín, 1990a). Esas dos poblaciones diferentes de calcitas surgen también en los análisis isotópicos $\delta^{13}C$ y $\delta^{18}O$ (Gemmell *et al.*, 1992). En ambos casos, las calizas son siempre elementos litológicos menores en el ambiente deposicional de la Formación Padrioc. Sin embargo, han sido rocas muy receptivas frente a los episodios metasomáticos, tanto en los halos hidrotermales

paleozoicos como durante el metamorfismo de contacto mesozoico. El límite del halo hidrotermal manganesífero sobre los protolitos calcáreos, se destaca en la aureola metamórfica del Granito Aguilar bajo la forma de una paragénesis mineral contrastada. La asociación wollastonita, grosularia, diópsido, tremolita del 'skarn' del cerro Toro está libre de manganeso y fuera de la influencia del halo. En cambio, el 'skarn' del OCB-306 (rodonita, bustamita, marmatita, alabandina, espesartina, hedenbergita, johannsenita, actinolita-Mn, pirosmalita) denota su presencia y el pico geoquímico de manganeso y hierro. La figura 6 ilustra la respuesta regional del Mn, desde un perfil norte-sur con 13 km de largo, entre el río Despensa y la mina Esperanza. Las muestras se han tomado sobre dos líneas paralelas, coincidentes con los planos estratigráficos que, en El Aguilar, representan el techo (corneanas) y el piso (cuarcitas) de la subunidad mineralizada de la Formación Padrioc. Las curvas se cruzan, con valores muy altos cerca de

las bocas de emisión hidrotermal y un fondo geoquímico casi normal para los tiempos iniciales del sistema geotérmico en el 'rift' irúyico. Al término del episodio metalogénico, los valores han menguado cerca de las fuentes, pero la contaminación hipogénica ha incrementado el fondo geoquímico regional.

La influencia metasomática del Granito Aguilar se percibe en los contenidos de berilio, bismuto, estaño y lantano, en fuerte correspondencia con las menas del 'skarn' y con el tipo vetiforme. En cambio la situación del boro, molibdeno y arsénico es algo ambigua, con una amplia respuesta geoquímica asociada a las menas diseminadas, en brechas y bandeas. Sin embargo, una mineralogía muy definida (turmalina, magnetita, molibdenita, ludwigita, arsenopirita, escapolita, vesubianita, helvina, axinita, wolframita) se halla circunscrita a la distribución espacial de los cuerpos magmáticos del Cretácico Inferior. En el caso particular de molibdenita, el bajo valor isotópico del azufre ($\delta^{34}\text{S}=+8\text{‰}$) en relación a los sulfuros 'sedex' paleozoicos, vincularía sus fuentes de origen a las rocas graníticas mesozoicas (Gemmell *et al.*, 1992). Según estos autores, algunas vesubianitas en El Aguilar tienen contenidos muy elevados de La, Ce, Nd y Pr, con valores hasta el 20% en peso de óxidos

de tierras raras para la variedad verde y zonada de este mineral. Ello coincide bien con el pico de La para los tipos vetiformes y 'skarn' de las estructuras mineralizadas (Cuadro 2). En este sentido, es muy conocida la asociación de las tierras raras con los granitos alcalinos y las carbonatitas del 'rift' preandino en la Provincia Metalogénica del Bermejo (Sureda *et al.*, 1986; 1989; Lurgo y Zappettini, 1989), contexto geológico mayor al cual pertenece el Granito Aguilar.

LOS DATOS GEOQUÍMICOS EN LA GENESIS DE EL AGUILAR

La figura 7 resume los principales factores genéticos que influyen en los depósitos estratiformes de plomo y zinc de El Aguilar. Es una visión esquemática del movimiento de elementos químicos durante la historia geológica del yacimiento, de acuerdo a los datos disponibles hoy. En las comarcas ocupadas actualmente por la sierra de Aguilar, la paleogeografía del Cámbrico Superior mostraba una línea costera muy próxima, con antepaís hacia el suroeste y un ambiente estable de plataforma marina caracterizado por sedimentos clásticos maduros, en su mayor parte ortocuarcitas. Las fuerzas extensivas del 'rift'

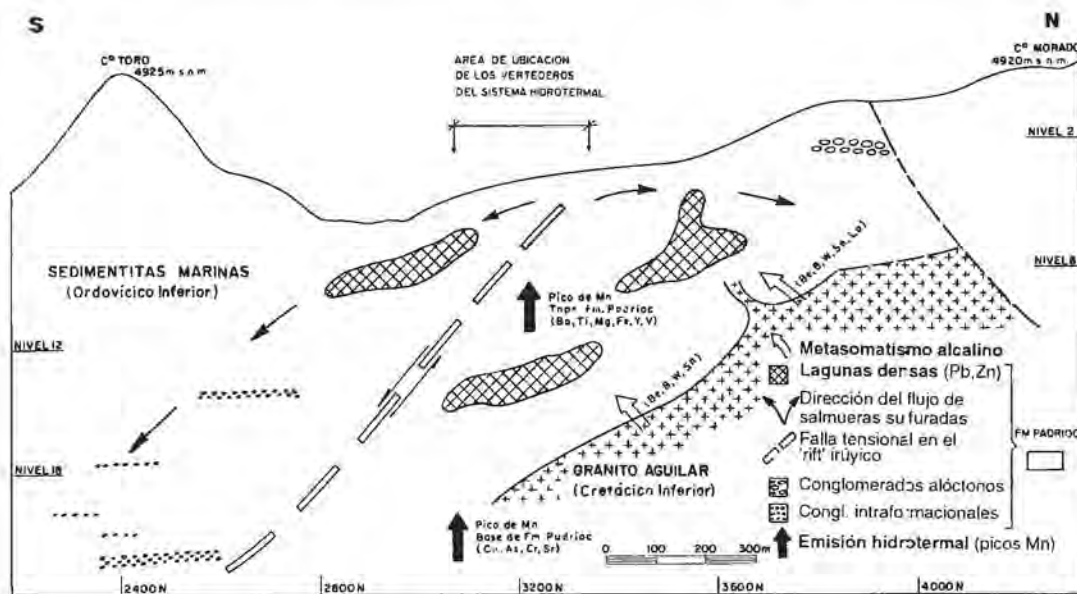


FIG. 7. Este bosquejo metalogénico de la mina El Aguilar muestra, en dos episodios principales, aquellos factores con incidencia en el aporte de elementos químicos a sus depósitos minerales de plomo y zinc. En el Paleozoico, un episodio sedimentario-exhalativo ha formado el yacimiento con el ingreso del mayor volumen de metales a la cuenca de la Formación Padrioc, durante el desarrollo del 'rift' irúyico. En el Mesozoico, un episodio de metamorfismo de contacto y metasomatismo ha modificado en parte la paragénesis mineral y las texturas de los depósitos metalíferos. Se aprecia una incorporación limitada de elementos químicos durante el emplazamiento del Granito Aguilar en el 'rift' preandino.

irúyico favorecieron el colapso de estas plataformas y el ingreso de elementos hipogénicos a las nuevas cuencas del Ordovícico Inferior. Fallas gravitacionales directas limitan cuencas menores de tercer orden, cuencas en rápida subsidencia y colmatadas por sedimentos de grano grueso, feldespáticos, con abundancia de conglomerados y trazas fósiles intramareales. El episodio metalogénico ha comenzado a lo largo de estas fracturas con emisiones hidrotermales submarinas, acompañadas por un halo característico de manganeso. El piso de la columna estratigráfica mineralizada registra valores máximos para **Mn, As, Cr y Sr**. Durante este episodio, las bocas de emisión se han desplazado algo hacia el norte actual y su derrame ha alimentado preferentemente los sedimentos inconsolidados y las lagunas metalíferas densas con **Pb, Zn, Cu, Ag, Sb y Cd**. Al finalizar la actividad del sistema geotermal, la solución mineralizante se ha enriquecido comparativa-

mente en **Ba, Ti, Fe, Y, B y Mg**. Un ambiente sedimentario transgresivo, intramareal deltaico, avanza hacia el antepaís y cubre los depósitos metalíferos mayores con sedimentos finos, pelíticos, enriquecidos en estos elementos. Tras un prolongado *hiatus*, durante la fase Araucana del ciclo tectónico Andino, el aporte metasomático de los granitos cretácicos es claro para **Be, Bi, Sn y tierras raras**. La adición coetánea de **Mo, As y B** puede ser importante, pero no parece exclusiva de los episodios mesozoicos.

Estos estudios geoquímicos, junto a detalladas investigaciones estructurales, han posibilitado la tarea de ampliar las reservas en el sector austral del yacimiento -por debajo del Nivel 23- y de guiar con éxito la exploración en la mina Esperanza y en el prospecto Río Grande. También sugiere nuevas líneas de investigación para precisar los episodios con significado metalogénico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores manifiestan su reconocimiento a la Compañía Minera Aguilar S. A. por las autorizaciones otorgadas para realizar y publicar este trabajo. Asimismo al CONICET y al Consejo de Investigación (UNSA), Argentina, por sus respaldos al PID 3648/92 y al Programa 393, respectivamente. De igual modo, agradecemos a los evaluadores Dres. Jorge Oyarzún,

Fernando Henríquez, Milka de Brodtkorb, Víctor Ramos y Luís Fontboté de la Revista Geológica de Chile, quienes han contribuido a una mejor presentación de su versión definitiva. Esta es una contribución al IGCP Project 342: Age and isotopes of South American Ores.

REFERENCIAS

- Aceñolaza, F.G. 1968. Geología estratigráfica de la región de la sierra de Cajas, departamento de Humahuaca, provincia de Jujuy. *Asociación Geológica Argentina, Revista*, Vol. 23, No. 3, p. 207-222.
- Aceñolaza, F.G. 1992. El Sistema Ordovícico en Latinoamérica. In *Paleozoico Inferior de Latinoamérica* (Gutiérrez Marco, J.G.; Saavedra, J.; Rábano, I.; editores). *Universidad de Extremadura*, Vol. 1, p. 85-118.
- Adair, R.N. 1992. Stratigraphy, structure and geochemistry of the Halfmile Lake massive-sulfide deposit, New Brunswick. *Exploration and Mining Geology*, Vol. 1, No. 2, p. 151-166.
- Ahlfeld, F. 1955. Geologie der Blei-zinklagerstätte Aguilar, Argentinien. *Zeitschrift für Erzbergbau und Metallhüttenwesen*, Vol. 8, No. 12, p. 1-6.
- Alonso, R.N.; Malanca S.; Sureda, R.J. 1982. Consideraciones sobre el Ordovícico en la sierra de Aguilar, Jujuy, Argentina. *Instituto de Ciencias Geológicas, Revista*, No. 5, p. 15-37.
- Angelelli, V. 1971. Geología de los yacimientos metalíferos argentinos. In *Símpoio Nacional de Geología Económica*, No. 1, *Actas*, Vol. 1, p. 141-150.
- Angelelli, V. 1984. Yacimientos metalíferos de la República Argentina. *Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires*, Vol. 1, No. 2, 704 p.
- Barbieri, M.; Sureda, R.J.; Argañaraz, P. 1989. Datos isotópicos preliminares $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ sobre baritinas del tramo central de la provincia metalogénica Quiaqueña, Paleozoico inferior, República Argentina. In *Congreso Geológico Argentino*, No. 10, *Símpoio Procesos Metalogénicos* (1987), *Serie Correlación Geológica*, No. 3, p. 109-122.
- Barnes, H.L. 1975. Zoning of ore deposits; types and causes. *Royal Society of Edinburgh, Transactions*, Vol. 69, No. 13, p. 298-311.

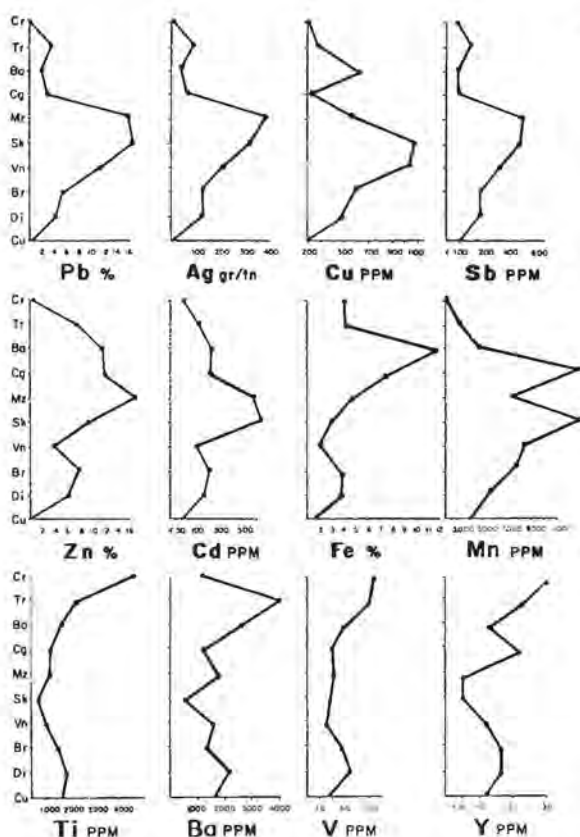
- Bischoff, J.L.; Manheim, F.T. 1969. Economic potential of the Red Sea heavy metal deposits. In *Hot Brines and Recent Heavy Metal Deposits in the Red Sea* (Degens, E.T.; Ross, D.A.; editors). Springer Verlag, p. 535-541.
- Brodtkorb, M.K.; Lanfranco, J.J.; Sureda, R.J. 1978. Asociaciones minerales y litología del yacimiento Aguilar, provincia de Jujuy, República Argentina. *Asociación Geológica Argentina, Revista*, Vol. 33, No. 4, p. 277-298.
- Brown, J.S. 1941. Factors of composition and porosity in lead-zinc replacements of metamorphosed limestone. *American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, Technical Publications*, Vol. 144, p. 250-263.
- Brown, J.S. 1962. Ore leads and isotopes. *Economic Geology*, Vol. 57, p. 673-720.
- Coira, B.L.L. 1973. Resultados preliminares sobre la petrología del ciclo eruptivo concomitante con la sedimentación de la Formación Acoite, Abra Pampa, provincia de Jujuy, Argentina. *Asociación Geológica Argentina, Revista*, Vol. 27, No. 1, p. 85-88.
- Coira, B.L.L. 1975. Ciclo efusivo ordovícico registrado en la Formación Acoite, Abra Pampa, provincia de Jujuy, Argentina. In *Congreso Iberoamericano de Geología Económica*, No. 2, Actas, Vol. 1, p. 37-56.
- Degens, E.T.; Stoffers, P. 1977. Phase boundaries as an instrument for metal concentration in geological systems. In *Time and Stratabound Ore Deposits* (Klemm, D.D.; Schneider, H.J.; editors). Springer Verlag, p. 25-45.
- Edmond, J.M.; Von Demm, K.; McDuff, R. 1982. The chemistry of the hot springs on the East Pacific Rise and the dispersal of their effluents. *Nature*, Vol. 297, p. 187-191.
- Galliski, M.A.; Viramonte, J.G. 1988. Cretaceous paleorift in northwestern Argentina. Petrological approach. *Journal of South American Earth Sciences*, Vol. 1, No. 4, p. 329-342.
- Gemmell, J.B.; Zantop, H.; Meinert L.D. 1992. Genesis of the Aguilar zinc-lead silver deposit, Argentina: contact metasomatic vs. sedimentary exhalative. *Economic Geology*, Vol. 87, No. 8, p. 2085-2112.
- Goodfellow, W.D.; Wahl, J.L. 1976. Waters extracts on volcanic rock detection of anomalous halos at Brunswick No. 12 and Heath Steele B-zone massive sulphide deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, Vol. 6, p. 35-56.
- Gustafson, L.B.; Williams, N. 1981. Sediment-hosted stratiform deposits of copper, lead and zinc. In *Economic Geology; Seventy-fifth Anniversary Volume; 1905-1980* (Skinner, B.J.; editor). *Economic Geology Publications Co.*, p. 139-178.
- Gwosdz, W.; Krebs, W. 1977. Manganese halo surrounding Meggen ore deposit, Germany. *Institute of Mining and Metallurgy, Transactions*, Vol. 86, p. B73-B77.
- Harrington, H.J. 1937. On some Ordovician fossils from Northern Argentina. *Geological Magazine*, Vol. 74, No. 3.
- Harrington, H.J.; Leanza, A.F. 1957. Ordovician trilobites of Argentina. *University of Kansas Press, Special Publication*, Vol. 1, p. 261.
- Large, D. 1977. Chemical evolution and zonation of massive sulphide deposits in volcanic terrains. *Economic Geology*, Vol. 72, p. 549-572.
- Large, D. 1983. Sediment-hosted massive sulphide lead-zinc deposits; an empirical model. In *Sediment-hosted stratiform lead-zinc deposits* (Sangster, D.F.; editor). *Short Course Handbook*, No. 9, p. 1-29.
- Linares, E. 1968. Geología isotópica del azufre del yacimiento Aguilar, provincia de Jujuy. *Jornadas Geológicas Argentinas*, No. 3, Actas, Vol. 2, p. 191-199.
- Linares, E.; Latorre, C.O. 1975. La edad del granito Aguilar, provincia de Jujuy, Argentina. In *Congreso Iberoamericano de Geología Económica, English Summary*, Vol. 1, No. 2, p. 91-98.
- Lonsdale, P. 1977. Deep-tow observations at the mounds abyssal hydrothermal field, Galapagos Rift. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 36, p. 92-110.
- Lurgo, C.S.; Zappettini, E.O. 1989. Hallazgo de carbonatitas en el área de Castro Tolay, provincia de Jujuy. *Asociación Argentina de Geólogos Economistas, Revista*, No. 7, p. 37-93.
- Martín, J.L.; Malanca, S.; Sureda, R.J. 1987. La fauna graptolítica de la sierra de Aguilar, Jujuy, Argentina. Algunos comentarios sobre las formaciones ordovícicas. In *Congreso Latinoamericano de Paleontología*, No. 4, Actas, Vol. 2, p. 599-619.
- Martín, J.L.; Malanca, S.; Sureda, R.J. 1989. Nuevos hallazgos paleontológicos en el Ordovícico de la sierra de Aguilar, Jujuy, Argentina. Implicancias estratigráficas y consideraciones geológicas. In *Congreso Geológico Boliviano*, No. 8, Bodas de Plata (1986), *Servicio Geológico Boliviano, Actas*, Vol. 1, p. 32-58.
- Mercer, W. 1976. Minor elements in metal deposits in sedimentary rocks; a review of the recent literature. In *Handbook of strata-bound and stratiform ore deposits; I. Principles and general studies* (Wolf, K.H.; editor). *Elsevier Publications Co.*, Vol. 2, p. 1-27.
- Moya, M.C. 1988. Lower Ordovician in the southern part of the Argentine Eastern Cordillera. In *The Southern Central Andes. Contributions to Structure and Evolution of an Active Continental Margin* (Bahlburg, H.; Breitreuz, C.; Giese, P.; editors). *Springer Verlag, Lecture Notes in Earth Sciences*, Vol. 17, p. 71-86.
- Moya, M.C.; Malanca, S.; Monteros, J.A.; Cuerdo, A. 1994. Bioestratigrafía del Ordovícico Inferior en la Cordillera Oriental argentina basada en graptolitos. *Revista Española de Paleontología*, Vol. 9, No. 1, p. 91-104.
- Omarini, R.H.; Baldi, B. 1984. Sedimentología y mecanismos deposicionales de la Formación Puncoviscana (Grupo Lema, Precámbrico-Cámbrico) del norte argentino. In *Congreso Geológico Argentino*, No. 10, Actas, Vol. 1, p. 383-398.
- Omarini, R.H.; Sureda, R.J. 1993. Evolución geodinámica y configuración paleogeográfica en los Andes centrales del Proterozoico superior al Paleozoico Inferior: modelos, alternativas y problemas. In *Congreso Geológico Argentino*, No. 12, Actas, Vol. 3, p. 291-307.
- Ramos, V.A. 1986. El diastrofismo oclítico: un ejemplo de tectónica de colisión durante el Paleozoico en el

- noroste argentino. *Instituto de Geología y Minería, Revista*, Vol. 6, No. 13-18.
- Rapela, C.W.; Coira, B.L.L.; Toselli, A.J.; Saavedra, J. 1992. El magmatismo del Paleozoico Inferior en el sudoeste de Gondwana. *In Paleozoico Inferior de Iberoamérica* (Gutiérrez Marco, J.G.; Saavedra, J.; Rábano, J.; editores). *Universidad de Extremadura*, Vol. 1, p. 21-68.
- Russell, M.J. 1974. Manganese halo surrounding the Tynagh ore deposit, Ireland; a preliminary note. *Institute of Mining and Metallurgy, Transactions*, Section B, Vol. 83, No. 810, p. B65-B66.
- Ryall, W.R. 1981. The forms of mercury in some Australian stratiform Pb-Zn-Ag deposits of different regional metamorphic grades. *Mineralium Deposita*, Vol. 16, p. 425-435.
- Salfity, J.A. 1982. Evolución paleogeográfica del Grupo Salta (Cretácico-Eocénico). *In Congreso Latinoamericano de Geología*, No. 5, Actas, Vol. 1, p. 11-26.
- Salfity, J.A.; Malanca, S.; Brandán, M.; Monaldi, C.R.; Mo-ya, M.C. 1984. La fase Guandacol en el norte de la Argentina. *In Congreso Geológico Argentino*, No. 9, Actas, Vol. 1, p. 555-567.
- Salfity, J.A.; Omarini, R.H.; Baldi, B.; Gutiérrez, W. 1975. Consideraciones sobre la evolución geológica del Precámbrico y el Paleozoico del norte argentino. *In Congreso Latinoamericano de Geología Económica*, No. 2, Actas, Vol. 4, p. 341-362.
- Sánchez, M.C.; Salfity, J.A. 1990. Litofacies del Grupo Mesón (Cámbrico) en el oeste del valle de Lerma (Cordillera Oriental, Argentina). *In Congreso Geológico Argentino*, No. 11, Actas, Vol. 2, p. 129-132.
- Scott, M.R.; Scott, R.B.; Rona, P.A.; Butler, L.W.; Naivek, A.J. 1974. Rapidly accumulating manganese deposit from the median valley of the Mid-Atlantic Ridge. *American Geophysical Union, Geophysical Research Letters*, Vol. 1, p. 355-358.
- Smee, B.W.; Bales, R. J. 1986. The use of lithochemical patterns in wall rock as a guide exploration drilling at the Jason lead-zinc-silver-barium deposits, Yukon Territory. *Journal of Geochemical Exploration*, Vol. 25, p. 217-230.
- Spencer, F.N. 1950. The geology of the Aguilar lead-zinc mine, Argentine. *Economic Geology*, Vol. 45, No. 5, p. 405-433.
- Stipanick, P.N.; Linares, E. 1969. Edades radiométricas determinadas para la República Argentina y su significado geológico. *Academia Nacional de Ciencias*, Vol. 47, No. 1, p. 51-96.
- Stumpfl, E.F. 1979. Manganese haloes surrounding metamorphic stratabound base metal deposits. *Mineralium Deposita*, No. 14, p. 207-217.
- Sureda, R.J. 1988. La provincia metalogénica Quiaqueña: reseña de sus depósitos minerales en el Ordovícico de los Andes Centrales. *In Simposio Nacional de Yacimientos Minerales, Petróleo y Fuentes de Energía*, Actas, Vol. 1, p. 1-73. Arequipa, Perú.
- Sureda, R.J. 1994 (En prensa). Ullmannita, NiSbS, en las coronas de reacción de la interfase breithauptita-pirrotina, mina El Aguilar, Jujuy. *In Reunión de Mineralogía y Metalogenia*, No. 2, Actas, La Plata, Argentina.
- Sureda, R.J.; Amstutz, G.C. 1981. Neue Untersuchungen über die schichtgebundenen Pb-Zn Lagerstätten in der Sierra de Aguilar, Provinz Jujuy, Argentinien. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie*, Vol. 1, No. 3, 4, p. 494-504.
- Sureda, R.J.; Martín, J.L. 1990a. El Aguilar mine: an Ordovician sediment-hosted stratiform lead-zinc deposit in the Central Andes. *In Stratabound ore deposits in the Andes* (Fontboté, L.; Amstutz, G.C.; Cardozo, M.; Cedillo, E.; Frutos, J. editors). *Springer Verlag, Special Publication*, No. 8, p. 161-174.
- Sureda, R.J.; Martín, J.L. 1990b. Mina El Aguilar, Jujuy, Argentina: un depósito sedex ordovícico, con metamorfismo de contacto sobreimpuesto, en la Provincia Metalogénica Quiaqueña. *Asociación Argentina de Geólogos Economistas, Revista, Publicación Especial, Homenaje al 80º Aniv. Prof. Ing. V. Angelelli*, Vol. 1, p. 78-92.
- Sureda, R.J.; Avila Salinas, W.; Marquillas, R.A. 1989. La Provincia Metalogénica del Bermejo: un análisis preliminar de sus depósitos minerales en Argentina y Bolivia. *In Depósitos Minerales del Cretácico de América Latina, Simposios sobre el Cretácico de América Latina*. Proyecto IGCP 242 (Brotkorb, M.K.; Schalamuk, I.B.; editores). *Instituto de Geología Aplicada*, p. B25-B48. La Plata.
- Sureda R.J.; Galliski, M.A.; Argañaraz, P.; Daroca, J. 1986. Aspectos metalogénicos del noroste argentino (provincias de Salta y Jujuy). *Universidad Nacional de Salta, Capricornio*, Vol. 1, p. 39-96.
- Sureda, R.J.; Pérez, H.D.; Martín, J.L.; Flores, F.J. 1992. Exploración y desarrollo en un depósito sedex (Zn, Pb, Ba) de la sierra de Aguilar: Mina Esperanza, Jujuy, Argentina. *In Congreso Nacional*, No. 4, y *Congreso Latinoamericano de Geología Económica*, No. 1, Actas, Vol. 1, p. 135-147. Córdoba, Argentina.
- Turner, J.C.M. 1960. Estratigrafía de la sierra de Santa Victoria y adyacencias. *Academia Nacional de Ciencias, Boletín*, Vol. 41, No. 2, p. 161-196.
- Van den Boom, G.; Finlow-Bates, T.; Klau, W.; Kottrup, G.; Large, D.E.; Rehder, S. 1980. Stratiform Cu-Pb-Zn Deposits. *Geologisches Jahrbuch*, Vol. 40, p. 1-205.
- Whitehead, R.E.S.; Govet, G.L.S. 1974. Exploration rock geochemistry-detection of trace element halos at Heath Steele mines (N.B. Canada) by discriminant analysis. *Journal of Geochemical Exploration*, Vol. 3, p. 371-386.
- Zierenberg, R.A.; Korki, R.A.; Morton, J.L.; Bouse. 1993. Genesis of massive sulfide deposits on a sediment-covered spreading center, Escanaba Trough, Southern Gorda Ridge. *Economic Geology*, Vol. 88, No. 8, p. 2069-2098.

APENDICE

INFORMACION GEOQUIMICA

Mediante una tabla y dos cuadros, se ilustra la tendencia geoquímica general de la mina El Aguilar que emerge de los datos obtenidos en esta investigación. Cada cuadro muestra doce diagramas con la variación en el contenido de otros tantos elementos (en % o en ppm según el caso) que acontece entre la diferente litología o tipos estructurales de mena de un perfil estratigráfico generalizado. En este perfil, la sucesión reconocida y adoptada como la más representativa en el depósito mineral, desde el piso al techo del manto es como sigue: Cu: cuarcitas; Di: diseminada; Br: en brechas; Vn: vetiforme; Sk: 'skarn'; Mz: maciza; Cg: conglomerados (cementación de la mesostasis); Ba: bandeada; Tr: transición (mixto entre bandeada y corneana); Cr: corneanas.



Cuadro 1. Reúne los elementos de filiación sedimentaria-exhalativa introducidos en la Formación Padrioc durante el Tremadociano inferior. Los ocho diagramas iniciales (Pb, Ag, Cu, Sb, Zn, Cd, Fe y Mn) son elementos que se incorporan mayoritariamente en los sucesos principales de emisión hidrotermal y muestran una notable cohesión paragenética frente al ensamble mineral de las menas. Los cuatro últimos diagramas (Ti, Ba, V, Y) e inclusive el Fe, son elementos que tienden a concentrarse con las emisiones finales, al término del episodio metalogénico.

Cuadro 2. Reúne los elementos introducidos por metasomatismo en el yacimiento durante el Cretácico Inferior, aquellos que aparentan una doble procedencia o bien son de interpretación incierta. Los cuatro diagramas iniciales (Mg, Sr, Ca, La) son elementos asociados a las rocas del 'skarn', donde el Ca proviene de protolitos paleozoicos, pero La parece incorporarse con las tierras raras desde el granito. Los diagramas medios (Sn, Bi, Be, B) son elementos metasomáticos típicos. Los diagramas finales (Co-Ni, As, Cr, Mo) son elementos de respuesta doble o indefinida, si bien As y Mo suelen acompañar las paragénesis metasomáticas.

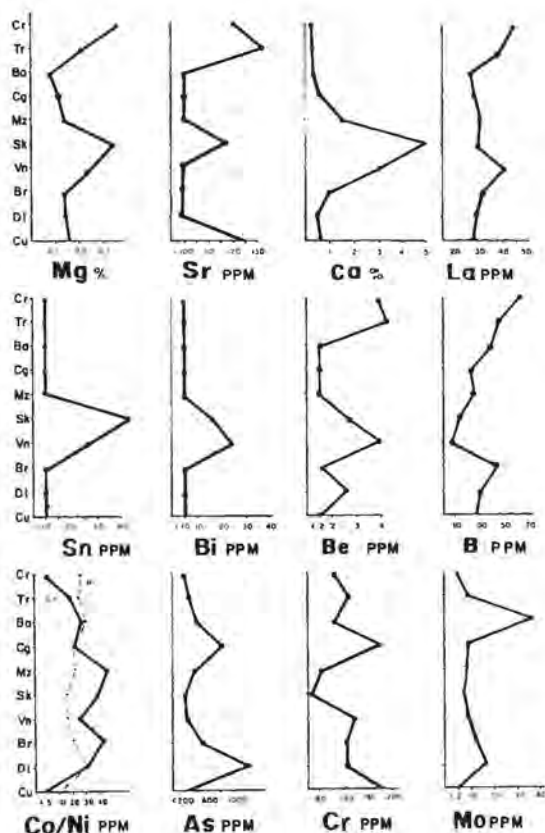


TABLA 1. LAS COLUMNAS REPRODUCEN LOS DATOS ANALÍTICOS PROMEDIADOS PARA CADA UNA DE LAS UNIDADES LITOLÓGICAS Y LOS TIPOS ESTRUCTURALES DE LA MINERALIZACIÓN QUE SE HAN SELECCIONADO COMO TÍPICOS DE ESTE YACIMIENTO 'SEDEX' ORDOVÍCO. EN CADA COLUMNA, EL ORDEN VERTICAL ES EL ESTRATIGRÁFICO. SE INDICAN LOS VALORES MEDIOS Y LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR. LA SUCESIÓN DE LOS ELEMENTOS QUÍMICOS TIENDE A REFLEJAR LAS AFINIDADES PARAGENÉTICAS Y LOS PROCESOS METALOGÉNICO IDENTIFICADOS EN EL AGUILAR.

EST.	Pb(%)		Ag (ppm)		Cu (ppm)		Sb (ppm)	
	χ	σ	χ	σ	χ	σ	χ	σ
Cr	0,19	0,13	11	28	142	299	<100	0
Tr	3,78	2,94	98	81	278	225	133	47
Ba	1,96	1,23	35	34	632	1.316	<100	0
Cg	2,72	0,81	54	34	215	28	<100	0
Mz	15,98	13,16	381	211	588	1.069	523	211
Sk	16,33	11,55	309	207	1.072	1.603	496	591
Vn	10,76	6,22	209	74	1.004	576	325	153
Br	5,13	3,61	117	76	578	488	165	89
Di	4,07	4,05	118	154	474	424	190	164
Cu	0,34	0,33	10	11	166	147	<100	0
*	7,59	4,30	165	67	605	517	<254	179

EST.	Zn(%)		Cd (ppm)		Mn (ppm)		Fe (%)	
	χ	σ	χ	σ	χ	σ	χ	σ
Cr	0,22	0,17	<50	0	1.318	2.665	4,01	0,64
Tr	7,72	6,84	130	102	3.041	1.446	4,08	2,18
Ba	11,18	4,88	224	116	4.851	3.258	11,93	3,28
Cg	12,02	3,07	220	143	13.560	4.027	7,45	5,30
Mz	17,10	7,31	592	493	7.326	4.944	4,88	3,76
Sk	9,44	7,51	610	1.072	13.647	17.769	2,80	2,05
Vn	3,77	2,11	115	50	8.280	6.218	1,90	1,32
Br	7,87	4,29	218	128	7.412	6.455	3,88	1,84
Di	5,79	4,13	166	133	5.340	4.500	3,81	2,64
Cu	0,31	0,43	<50	0	3.904	4.505	1,20	0,67
*	9,36	1,88	284	325	7.932	4.666	5,09	1,20

EST.	Ti (ppm)		Ba (ppm)		V (ppm)		Y (ppm)	
	χ	σ	χ	σ	χ	σ	χ	σ
Cr	4.425	1.379	1.270	629	107	49	30	10
Tr	2.416	606	4.116	3.549	95	30	22	5
Ba	1.727	578	2.563	2.488	50	38	13	6
Cg	1.300	509	1.140	546	32	16	22	14
Mz	1.228	791	1.651	2.432	38	23	<10	0
Sk	722	505	503	456	32	31	10	6
Vn	1.202	839	1.581	2.838	28	13	12	4
Br	1.574	735	1.267	1.198	51	33	16	9
Di	1.919	1.356	2.196	2.904	62	65	16	10
Cu	1.820	1.049	1.540	1.925	31	19	12	5
*	1.511	260	1.877	1.087	48	15	<15	4

continuación tabla 1

EST.	Mg (%)		Sr (ppm)		Ca (%)		La (ppm)	
	χ	σ	χ	σ	χ	σ	χ	σ
Cr	0,35	0,12	122	49	0,123	0,066	43	16
Tr	0,20	0,15	133	47	0,166	0,063	38	12
Ba	0,06	0,04	<100	0	0,082	0,056	26	11
Cg	0,09	0,05	<100	0	0,260	0,133	28	11
Mz	0,13	0,02	<100	0	1,628	2,538	30	11
Sk	0,32	0,25	119	148	5,320	2,824	29	12
Vn	0,23	0,15	<100	0	2,760	2,023	41	11
Br	0,11	0,08	<100	0	0,808	1,560	32	13
Di	0,12	0,12	<100	0	0,381	0,606	29	13
Cu	0,13	0,07	125	52	0,635	0,785	28	11
*	0,15	0,06	<106	49	1,419	1,080	31	0

EST.	Sn (ppm)		Bi (ppm)		Be (ppm)		B (ppm)	
	χ	σ	χ	σ	χ	σ	χ	σ
Cr	<10	0	<10	0	3	1,83	64	27
Tr	<10	0	<10	0	4	1,21	46	28
Ba	<10	0	<10	0	<2	0,00	37	22
Cg	<10	0	<10	0	<2	0,00	20	15
Mz	<10	0	<10	0	<2	0,00	24	18
Sk	43	49	17	23	2	1,65	13	8
Vn	28	41	24	23	3	5,37	10	1
Br	<10	0	<10	0	<2	0,00	43	40
Di	<10	0	<10	0	2	1,44	28	18
Cu	<10	0	<10	0	<2	0,00	26	22
*	<16	19	<12	9	<2	1,71	28	11

EST.	Co (ppm)		Ni (ppm)		As (ppm)		Cr (ppm)		Mo (ppm)	
	χ	σ	χ	σ	χ	σ	χ	σ	χ	σ
Cr	<5	0	24	11	<200	0	110	39	<2	0
Tr	19	14	20	8	266	110	128	42	8	6
Ba	24	26	28	17	330	241	107	57	36	30
Cg	20	17	20	6	740	697	190	156	9	8
Mz	45	41	19	19	250	105	80	61	8	8
Sk	37	57	13	15	<200	0	66	62	7	9
Vn	25	28	16	13	210	30	145	35	7	6
Br	43	43	18	13	475	520	131	91	10	9
Di	31	32	26	20	1,273	2,545	132	64	15	16
Cu	<5	0	9	13	<200	0	182	93	<2	0
*	30	13	20	4	<468	795	122	35	12	7

* media y desviación estándar del horizonte mineralizado completo (Σ global de todas la subunidades) χ valores medios σ desviación estándar

FOTOGRAFIAS

Fotografía 1. Mina El Aguilar, Jujuy, Argentina. Vista panorámica invernal del yacimiento, orientada hacia el NW, en el tramo superior de la quebrada del río Padrioc y a 4.500 m s.n.m.



Fotografía 2. Mina El Aguilar, Jujuy, Argentina. Vista panorámica estival del yacimiento sobre el valle del río Padrioc. A la derecha el Granito Aguilar y e contacto con las cuarcitas cla-ras de la Formación Padrioc. Al fondo y a la izquierda, las corneanas del techo y otras rocas oscuras de las unidades estratigráficas superiores.