

ESTUDIO GEOLOGICO DEL MOLIBDENO EN CHUQUICAMATA - CHILE

JOSÉ AMBRUS W. *

HÉCTOR SOTO P. *

RESUMEN.—La mineralización de molibdeno en Chuquicamata está asociada genéticamente con la fase temprana de alteración hidrotermal de carácter sericítico.

Las vetas de cuarzo de esta etapa contienen la mayor parte de la mineralización primaria en forma de molibdenita, mientras que la disseminación en las zonas circundantes se debe a una removilización posterior.

La mineralización secundaria está representada por la oxidación de molibdenita a molibdatos sobre el nivel del “techo de los sulfuros” y por un posible enriquecimiento en molibdenita supergena, junto con la presencia de un sulfuro doble de Cobre-Molibdeno en cuya determinación precisa se trabaja actualmente.

SUMMARY.—The mineralization of molybdenum in Chuquicamata is genetically associated to the early sericitic hydrothermal alteration stage. The early quartz veins from this stage contain most of the primary molybdenite, and the disseminations to the surroundings areas are due to posterior removal effects.

The secondary mineralization is represented by oxidation of molybdenite to molybdates above the “top of sulphides” level, and by the possibility of a secondary enrichment of molybdenite in the sulphide zone together with the presence of a Copper-Molybdenum sulphide. Some efforts are being made in order to confirm this last hypothesis.

CONCLUSIONES

La mineralización del molibdeno en Chuquicamata se atribuye a la fase temprana de alteración hidrotermal de tipo sericítico, manifestada por tres tipos de vetas de cuarzo: vetillas con sutura central, “vetas azules” y “vetas compuestas”; estas estructuras contienen mineralización primaria de molib-

* Departamento de Geología. Compañía de Cobre, S. A. Chuquicamata - Chile.

deno en forma de molibdenita, pero existe mineralización primaria fuera de ellas, especialmente en superficies de fracturas y ocurrencias anómalas en estructuras hidrotermales tardías; en ambos casos se concluye que el molibdeno se ha removilizado a partir de sus estructuras propias.

La oxidación del molibdeno en la parte superior del yacimiento ocurre como transformación de la molibdenita en molibdatos que en general son poco solubles en agua y mantienen su distribución primaria. El techo de sulfuros de cobre coincide a grandes rasgos con la base de la oxidación del molibdeno, pero debido a las diferencias entre los campos de estabilidad de cobre y molibdeno en condiciones supérgenas, se puede encontrar molibdenita sobre el techo de sulfuros, como también óxidos de molibdeno dentro de la zona de sulfuros. Los minerales oxidados más importantes son lindgrenita y ferromolibdita, pero casi todos los demás molibdatos están presentes en pequeñas cantidades, incluyendo otros minerales capaces de retener molibdeno, especialmente chenevixita y algunas limonitas.

No se tiene absoluta certeza de un pequeño enriquecimiento secundario en molibdeno, pero hay diversos argumentos que sostienen esa posibilidad. Este enriquecimiento se manifestaría como molibdenita supérgena y un sulfuro doble de cobre-molibdeno.

Se describe la distribución del molibdeno en el yacimiento, dando a conocer su extensión aproximadamente paralela a la Falla Oeste tanto en la horizontal como la vertical; se observa en el yacimiento una zona de alta ley de molibdeno de extensión y ley suficientes para considerarlo como un yacimiento de molibdeno contenido en uno mayor de cobre.

Se han intentado algunas correlaciones entre leyes de cobre y molibdeno encontrándose una tendencia muy general de aumento de la ley de Mo al aumentar la ley de Cu, pero desde un punto de vista estadístico la correlación es tan baja que se pueden considerar independientes. Se tuvo más éxito al correlacionar la ley de Mo con distintos tipos de roca, pudiéndose determinar que las leyes más altas se encuentran en las rocas de cuarzo-sericita, leyes bastante uniformes en el Pórfido Oeste y el Pórfido Este no tiene influencia sobre la ley de Mo; además, las leyes de Mo decrecen bruscamente en las zonas de alteración potásica.

Desde el punto de vista metalúrgico, hay diversos motivos de carácter mineralógico que producen fuertes pérdidas en la recuperación, especialmente los óxidos de molibdeno contenidos en el mineral sulfurado, la granulometría extremadamente fina de algunas molibdenitas, oxidación superficial de minerales y la dificultad de separar en algunos casos la molibdenita de sulfuros de cobre.

El renio en el yacimiento está relacionado con la molibdenita, con conte-

nidos del orden de 200 ppm en MoS_2 puro, pero se ha podido comprobar su existencia en otros minerales; se puede esperar en cualquier roca del yacimiento contenidos del orden de 1.5 ppm, con una pequeña concentración en sulfuros puros, que llega a 4.5 ppm.

INTRODUCCION

Chuquicamata es uno de los pórfidos cupríferos más espectaculares del mundo desde el punto de vista de su contenido de cobre y es ese el motivo de la escasa atención que se ha prestado a su contenido de molibdeno, a pesar de que se obtiene como subproducto de la concentración de cobre hace 15 años. Desde 1958, Chuquicamata produce entre 2 y 5 millones de toneladas cortas anuales de concentrado de molibdenita.

Las reservas y leyes de molibdeno en el yacimiento tienen tal importancia, que haciendo abstracción del cobre, una parte de Chuquicamata podría ser considerado como yacimiento de molibdeno. Este se concentra especialmente en una banda paralela a la Falla Oeste, de 1.700 mts. de longitud, un ancho medio de 70 mts. y una profundidad aún no determinada. En esta zona se ha reconocido aproximadamente 100 millones de toneladas de 0.12 % de Mo. A esto hay que agregar que la banda mencionada está contenida en la parte más rica en cobre del yacimiento y es una de las áreas donde la explotación será más intensa en los próximos 20 años. Sin embargo, el molibdeno está presente en la mayor parte de las reservas conocidas de cobre, pero con una ley media aproximada de 0.04 % Mo, siendo 0.06 % Mo la ley que explotará la mina como subproducto en los próximos 10 años.

Estas cifras demuestran que Chuquicamata no sólo es excepcional como yacimiento de cobre, sino que se sitúa como uno de los yacimientos de cobre-molibdeno más importantes del mundo (Tabla I).

Este trabajo, elaborado en la División de Geología de Chuquicamata, tiene por finalidad definir los recursos presentes y futuros de molibdeno en el yacimiento y establecer las características mineralógicas que inciden en el proceso de su recuperación. Parte considerable de la información aquí expuesta es de conocimiento general de geólogos y metalurgistas desde hace varios años, pero se pretendió hacer un compendio de estos conocimientos para su aplicación integral.

Para la realización de este trabajo, los autores contaron con la cooperación de geólogos, ingenieros metalurgistas y químicos de la Empresa, a quienes están sinceramente agradecidos.

Yacimiento *	Localidad	Reservas de Cu	Ley Cu **	Ley Mo **
Almalyk	Uzbekstan, URSS	?	0.72	0.01
Bingham	Utah, USA	$> 500 \times 10^6$ tons	0.74	0.036
Chino	New Mexico, USA	$< 500 \times 10^6$ tons	1.02	0.01
CHUQUICAMATA	Antof., Chile	$> 500 \times 10^6$ tons	1.80	0.06
El Teniente	O'Higgins, Chile	$> 500 \times 10^6$ tons	1.56	0.02
Inspiration	Arizona, USA	$< 500 \times 10^6$ tons	1.02	0.01
Kadzharan	Armenia, URSS	?	1.50	0.15
Salvador	Atacama, Chile	$< 500 \times 10^6$ tons	1.45	0.03
Toquepala	Perú	$< 500 \times 10^6$ tons	1.20	0.02

TABLA I

Contenidos de cobre y molibdeno de los principales pórfidos cupríferos

EL MOLIBDENO EN LOS PORFIDOS CUPRIFEROS

Entre los elementos que acompañan al cobre en los pórfidos cupríferos, el molibdeno es habitualmente el de mayor importancia desde el punto de vista económico y en muchos yacimientos de este tipo ha dejado de ser un subproducto de la explotación del cobre, para transformarse en un co-producto de tal importancia que numerosos yacimientos no serían económicamente explotables sin el beneficio del molibdeno.

Aproximadamente la tercera parte de la producción mundial de molibdeno procede de los pórfidos cupríferos y Chile ocupa el cuarto lugar entre los productores, después de Estados Unidos, Canadá y Unión Soviética. Se ha estimado que Chile posee casi el 20 % de las reservas mundiales conocidas de este metal (SHERIDAN, 1970); junto con la Unión Soviética, se sitúa en segundo lugar después de Estados Unidos, cuya reserva se aproxima al 60 % de las reservas mundiales.

* Según SUTULOV, 1970, excepto yacimientos chilenos.

** Leyes de cobre y Molibdeno estimadas de la producción.

Tanto la mayor parte de las reservas, como la totalidad de producción de Chile proviene de los pórfidos cupríferos, siendo el único gran productor de este elemento que no cuenta con minas de molibdeno en producción (Tabla II).

	Producción de Mo (1970) (Millones de Lbs.)	Pórfidos cupríferos	Otras fuentes
Estados Unidos	93,5	30 %	70 %
Canadá	20,0	6 %	94 %
Unión Soviética	20,0	50 %	50 %
Chile	8,5	100 %	—

TABLA II

Procedencia del molibdeno de los productores mayores

La presencia de molibdeno en la mayoría de los pórfidos cupríferos ha sido observada desde las etapas más tempranas de la investigación de estos yacimientos, pero sólo en el año 1933 se planteó la posibilidad de recuperarlo como subproducto de la flotación del cobre en Cananea, México, donde el contenido de MoS_2 era relativamente alto (KELLEY, 1935). En esa época, Climax Molybdenum Company aportaba alrededor del 90 % del molibdeno producido en el mundo, pero en breves años se empezó a recuperar molibdeno de otros pórfidos cupríferos, siendo El Teniente el primero que lo hizo en Sudamérica, en el año 1939. En Chuquicamata, se comenzó solamente en 1958, debido a la dificultad de recuperar el molibdeno de los minerales oxidados que se explotaban anteriormente.

Si bien la presencia de molibdeno ha sido considerada como un rasgo típico de la mineralización primaria de los pórfidos cupríferos (BATEMAN, 1957; CREASEY, 1966, etc.), su abundancia y proporción respecto a los minerales de cobre presentan considerables variaciones.

KESLER (1973) separó los pórfidos cupríferos en yacimientos de cobre-molibdeno y en yacimientos de cobre-oro. La asociación Cu-Mo es más frecuente en los yacimientos ubicados en zonas continentales, yacimientos que comúnmente presentan mayor tonelaje en cobre y son algo más antiguos que los de la asociación Cu-Au. Estos últimos abundan más en arcos de islas, generalmente con menor tonelaje en cobre y su edad más frecuente es de

30 a 40 millones de años, comparada con 40 a 80 millones de años que es la edad de la mayoría de los yacimientos de Cu-Mo.

Los pórfidos cupríferos chilenos presentan la asociación cobre-molibdeno, excepto el yacimiento de Andacollo, que podría considerarse de cobre-oro o mixto. En este yacimiento, la relación Au-Mo es del orden de 1/10 al 1/100, mientras en Chuquicamata, considerado yacimiento de cobre-molibdeno la relación Au-Mo es del orden de 1/10.000.

La abundancia de molibdeno en pórfidos cupríferos chilenos se acentúa hacia el norte del país y se conoce un yacimiento, el prospecto de Copaquire, Iquique, donde el molibdeno parece tener importancia económica similar a la del cobre.

Los grandes yacimientos de molibdeno de Estados Unidos y México, por otra parte, presentan una serie de similitudes con los pórfidos cupríferos, especialmente desde el punto de vista genético. Climax, Colorado, que produce una parte considerable del molibdeno mundial, se presenta en forma de un extenso stockwork mineralizado en rocas plutónicas intermedias de "intrusión múltiple", con un modelo de alteración similar a un pórfido cuprífero (WALLACE, et al, 1968). Los rasgos comunes con los pórfidos cupríferos son tan abundantes que se puede asumir que la única diferencia sería la ausencia casi total de cobre en las soluciones hidrotermales, sustituida por la presencia de la asociación molibdenita-huebnerita, que en los pórfidos cupríferos sería una curiosidad.

En los pórfidos cupríferos la aparición de la molibdenita va ligada a fases bien definidas del desarrollo hidrotermal; en la mayoría de los casos, la molibdenita se presenta en vetillas de cuarzo hidrotermal y/o en fracturas del stockwork; la molibdenita diseminada en la roca es siempre escasa. En la mayoría de los yacimientos, la mineralización de molibdeno es un episodio temprano en la mineralización del depósito, apareciendo junto con calcopirita o bornita de las etapas hidrotermales más tempranas. Es el caso de algunos yacimientos norteamericanos: Bingham Canyon, Utah (PETERS, et al, 1966), tiene la mineralización de molibdenita especialmente en superficie de fracturas, asociada con bornita de la zona central del yacimiento. En Morenci (MOOLICK, 1966), San Manuel (THOMAS, 1966) y Esperanza (LYNCH, 1966), la asociación es calcopirita-molibdenita, en vetillas de cuarzo y fracturas, de las etapas tempranas de la mineralización hipógena, relacionada con la zona de alteración de biotita-ortoclasa (ROSE, 1970). En el yacimiento de Morococha, Perú (PASTOR, 1970), la molibdenita se describió como un producto hidrotermal anterior a la mineralización de cobre y se presenta también acompañando vetillas de cuarzo.

En los pórfidos cupríferos chilenos la molibdenita también tiende a apa-

recer en las etapas tempranas de mineralización, a excepción de Potrerillos y Río Blanco, donde su aparición es tardía, como se verá a continuación.

La molibdenita puede ser en algunos casos un producto intermedio y hasta tardío de mineralización hipógena en pórfidos cupríferos, pero se suele mantener su relación con las venillas de cuarzo hidrotermal. En Inspiration (OLMSTEAD AND JOHNSON, 1966) está ligada a piritita hidrotermal en cuarzo, de fase posterior a la mineralización cuprífera. En Safford (ROBINSON AND COOK, 1966) la molibdenita es de una generación francamente tardía y se presenta en vetas de cuarzo acompañada por tetrahedrita y galena.

En Chile, en el yacimiento de Potrerillos (RUIZ, et al, 1965), la molibdenita aparece en venillas de cuarzo aún posteriores a la mineralización tardía de enargita en calcita. Sería la mineralización de molibdeno más joven descrita en un pórfido cuprífero. El yacimiento de Río Blanco es otro caso en que la molibdenita cristalizó después de los minerales de cobre y es seguida por una última fase de cristalización de piritita (URQUETA, 1969).

En resumen, la mineralización hipógena de molibdeno en pórfidos cupríferos no parece tener una posición definida en los esquemas generalizados de mineralización de estos yacimientos, pero ocupa una etapa bien definida en cada yacimiento. La cristalización temprana o tardía puede estar influida entre otras causas por la migración del molibdeno durante un metasomatismo potásico (WALLACE, et al, op. cit.), hasta una removilización mecánica por esfuerzos tectónicos, que puede llevar la molibdenita a planos de fracturas y hacerla coexistir con minerales de formación más tardía. El origen del molibdeno en las soluciones hidrotermales debe buscarse en las mismas fuentes que el cobre y demás elementos presentes en estas soluciones. Su relativa escasez en la corteza terrestre y su concentración sistemática en los pórfidos cupríferos es una buena herramienta para la investigación del origen de los elementos metálicos de estos yacimientos.

MINERALOGIA DEL MOLIBDENO EN PORFIDOS CUPRIFEROS

La mineralogía hipógena del molibdeno en los pórfidos cupríferos es extremadamente simple; se reduce casi exclusivamente a molibdenita (MoS_2), que cristaliza sola o en ganga de cuarzo, muy excepcionalmente en contacto o entrecrecida con otros minerales hipógenos.

También se ha descrito, pero muy subordinada a la molibdenita cristalizada, molibdenita coloforme (SUTULOV, 1970), que en algunos casos podría corresponder a jordisita (MoS_2) que es una variedad coloidal amorfa al examen de rayos X, de molibdenita (RAMDOHR, 1969).

En la zona de enriquecimiento supérgeno, la molibdenita es muy resistente al reemplazo por las soluciones mineralizantes y raras veces se la encuentra en contacto con calcosina o covelina. Hasta la fecha sólo en un pórfido cuprífero se ha descrito la ocurrencia de molibdeno supérgeno (CLARK AND SILLITOE, 1969), en el yacimiento de Potrerillos; el mineral corresponde a "Castaingita" ($\text{CuMo}_2\text{S}_{5-x}$) y se ha dado como un producto de la reacción de molibdenita hipógena con djurleita supérgena (UYTENBOGAARDT AND BURKE, 1971).

La oxidación de la molibdenita en la zona de oxidación de los pórfidos cupríferos da lugar a una gama algo más variada de minerales, aunque mucho menos extensa que los oxidados de cobre. El nivel de oxidación de los sulfuros de cobre y molibdeno se asemeja a grandes rasgos, pero los óxidos de molibdeno tienen la particularidad de ser muy resistentes a la lixiviación, debido a que son solubles sólo en medios extremadamente ácidos o extremadamente alcalinos; de este modo, la zona de oxidación de los pórfidos cupríferos suele tener una distribución de molibdeno semejante a la que se observaría en la zona de sulfuros, pero naturalmente el molibdeno presente no está en forma de molibdenita, sino como óxido, mientras el cobre de la misma zona ha sido lixiviado y redepositado en la zona de cementación. La exploración geoquímica de estos yacimientos se acostumbra hacer analizando relaciones Mo/Cu, y en algunas oportunidades la baja movilidad supergénica del molibdeno ha sido la causa principal del hallazgo de pórfidos cupríferos.

Los minerales de molibdeno que se encuentran en las zonas de oxidación son generalmente sus formas pentavalentes y hexavalentes, derivadas de la reacción de ácido molíbdico (H_2MoO_4) con diferentes cationes que dan lugar a molibdatos (BLOOM, 1966). En las rocas lixiviadas el ion MoO_4 reacciona con el hierro trivalente que caracteriza esta zona, dando lugar a ferromolibdita (ocre de molibdeno): $\text{Fe}(\text{MoO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$. El Plomo es tan excelente precipitante para el molibdeno que por pequeña que sea la cantidad de este elemento en el yacimiento, se formará wulfenita: PbMoO_4 ; (MCKINSTRY, 1948); la alteración supérgena de las rocas en la zona de oxidación puede producir liberación de calcio de los feldespatos y se forma powelita: CaMoO_4 . En pórfidos cupríferos puede llegar a tener bastante importancia la lindgrenita: $\text{Cu}_3(\text{MoO}_4)_2(\text{OH})$, descrita por primera vez en Chuquicamata (PALACHE, 1936).

El óxido azul de molibdeno, ilsmanita, de fórmula aproximada $\text{Mo}_3\text{O}_8(\text{H}_2\text{O})(\text{H}_2\text{SO}_4)$ es un producto intermedio de oxidación que se presenta en pátinas sobre molibdenita, pero es químicamente inestable y pronto da lugar a los molibdatos estables (SUTULOV, *op. cit.*).

Además, el molibdeno tiene posibilidades de fijarse en varios minerales y aún en algunos óxidos de cobre como chenevixita (JARRELL, 1944).

Se ha observado en distintos yacimientos la presencia de molibdenita por encima del nivel de sulfuros, en zonas que no son compatibles con su campo de equilibrio; una razón para esta ocurrencia es que los molibdatos cubren y protegen de la oxidación ulterior a la molibdenita, impidiendo su oxidación total. El mayor o menor fracturamiento de las rocas y exposición y forma de los granos de molibdenita hipógena pueden hacer variar esta oxidación parcial (MICHELL, 1945). Esta molibdenita con oxidación incipiente se ha encontrado también por debajo del techo de sulfuros en algunos yacimientos, dando margen a una zona de minerales mixtos de molibdeno, donde ocurre principalmente molibdenita oxidada superficialmente a molibdatos.

MINERALIZACION DE MOLIBDENO EN CHUQUICAMATA

MINERALIZACIÓN PRIMARIA

La aparición de molibdeno en el yacimiento se atribuye a la fase temprana de la alteración hidrotermal de tipo sericítico que siguió a la etapa de alteración potásica.

La actividad hidrotermal temprana se manifiesta en el yacimiento por tres tipos de estructuras y todas ellas son portadoras de molibdeno primario. Sin embargo, existe mineralización primaria de molibdeno en otras estructuras posteriores, que se interpreta como aporte por removilización a partir de los primeros.

La mineralización primaria de molibdeno se encuentra en las siguientes estructuras:

Vetillas de cuarzo con sutura central

Se han descrito en un principio como un tipo particular de vetillas hidrotermales de la fase de alteración hidrotermal destructiva (LANGERFELDT, 1964), que no fueron correlacionadas con las "vetas azules" (WATERMAN, 1951), ni se estableció su relación de edad respecto a las vetillas tempranas de filiación magmática.

Son estructuras pequeñas, generalmente no exceden de 20 cm. de largo y su ancho varía de 0.1 a 0.5 cm. Son vetillas de cuarzo microcristalino que presentan una línea central de sutura que vista al microscopio demuestra crecimiento del cuarzo desde los bordes hacia el centro de la vetilla. Esta línea central está generalmente rellena por minerales de alteración y/o supérgenos, tales como caolín, alunita, sulfuros supérgenos de cobre o limonitas.

En la mayoría de los casos tienen un estrecho halo de alteración que afecta la roca caja; generalmente, este halo es sericítico, pero se ha encontrado ocasionalmente halo alcalino, propio de las vetillas relacionadas con alteración potásica. Desde un punto de vista genético, se pueden situar en una época de transición entre la alteración potásica y la alteración sericítica destructiva, es decir, son vetillas de filiación hidrotermal temprana.

La molibdenita se presenta por lo general dispersa en forma de pequeños cristales euhedrales en el cuarzo en las inmediaciones de la vetilla. En comparación con los otros dos tipos de estructuras hidrotermales tempranas, este tipo de vetillas contiene escasa mineralización de molibdeno. Otros minerales primarios que suelen estar relacionados con este tipo son: pirita y calcopirita, siempre en pequeña cantidad. Es frecuente observar molibdenita de grano muy fino relacionada con el estrecho borde sericítico de algunas de estas vetillas, y se deposita alrededor de cristales de cuarzo. La granulometría extremadamente fina de esta mineralización ($< 1 \mu$) ha impedido establecer si se trata de la variedad coloidal de molibdenita llamada "jordisita".

En ningún caso se ha observado molibdenita rellenando la sutura central de este tipo de vetillas de cuarzo, y la mineralización decrece hacia el centro de la vetilla. Esto prueba que el aporte de molibdeno se produjo en la fase temprana de la inyección de la vetilla de cuarzo.

"Vetas azules"

Desde el comienzo de las investigaciones geológicas del yacimiento, estas estructuras se relacionaron con la molibdenita; en un tiempo se pensó que constituían una modalidad especial de las vetillas de cuarzo-sericita (LÓPEZ, 1939) pero aún en las partes superiores de la zona de oxidación del yacimiento pronto se individualizó como "vetas de cuarzo-molibdeno" (JARRELL, 1937). La denominación de "veta azul" se empezó a usar sólo cuando hubo estudios más detallados en las zonas de mineral sulfurado. WATERMAN (1951) distinguió "vetas grises" (grey quartz stage) y "vetas azules" (blue quartz stage) y describió estas últimas como posteriores y portadoras de más molibdenita que las primeras. En estudios posteriores, sin embargo, la distinción entre "vetas grises" y "vetas azules" se fue haciendo más confusa a medida que se aportaron más datos a los ya conocidos. En la actualidad se conoce toda una gama de estados intermedios entre las "vetas grises" y "azules" de Waterman, prevaleciendo la denominación última para todas.

Las "vetas azules" son vetillas de pocos centímetros de ancho a filones de algunos metros de espesor, de cuarzo microcristalino de textura pseudo-

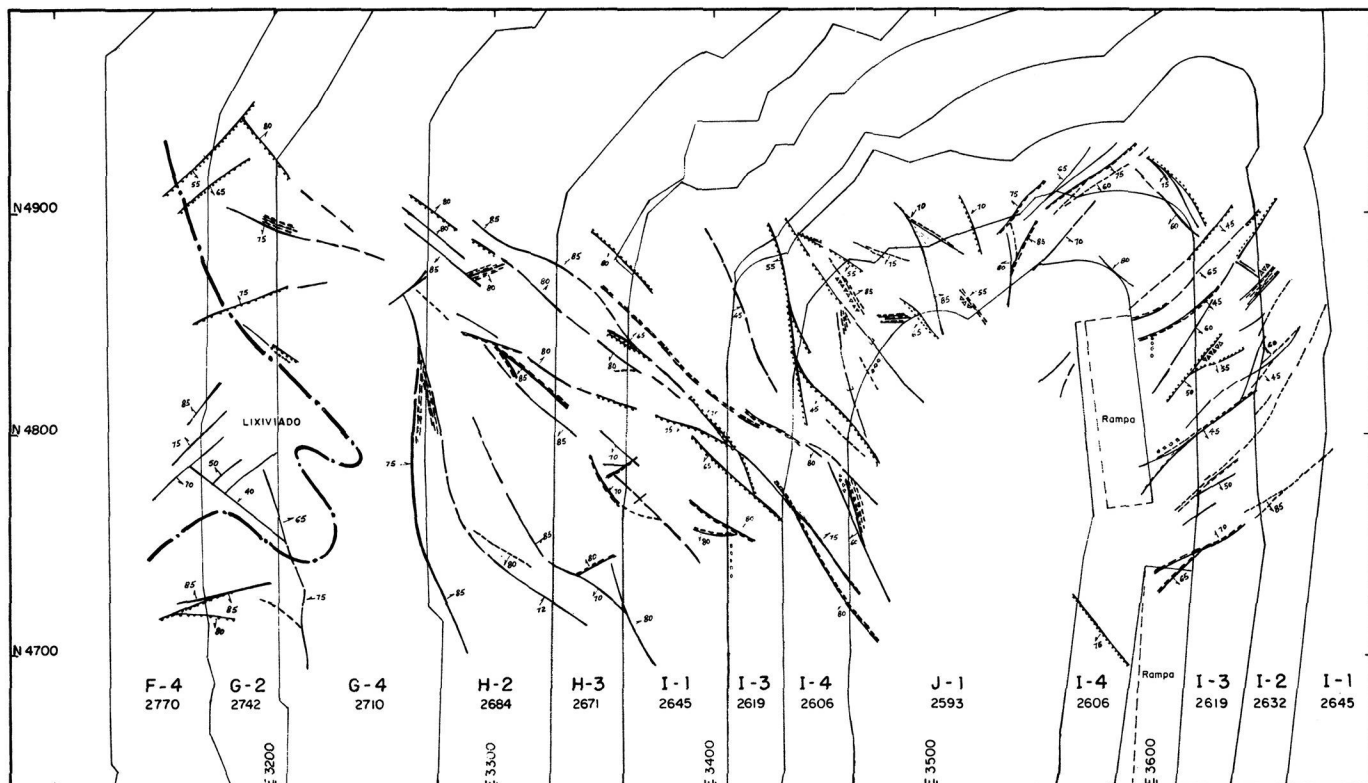
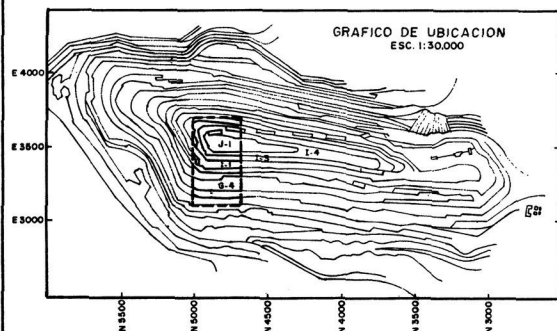


Figura 1

TIPOS Y RELACIONES ESTRUCTURALES DE MINERALIZACION PRIMARIA DE Mo.



FRATURAS Y FALLAS PRINCIPALES: Obsérvese que estas fracturas tienden a mantener cierto paralelismo con las estructuras que contienen mineralización de Mo. En algunos casos las fallas segmentan a "Vetas Azules" y "Vetas Compuestas".

VETAS AZULES: Se localizan en las partes más ricas en Mo del Área.

VETAS COMPUESTAS: Se relacionan especialmente a las "Vetas Azules"; observe la irregularidad de estas estructuras, su fuerte fectonización y su relación con zonas brechizadas.

VETAS MAYORES DE SULFUROS: En su mayoría corresponden a vetas tardías que cortan a las estructuras mineralizadas con Mo; observe su relación con el esquema estructural general y su notable continuidad en los distintos bancos.

ZONAS BRECHIZADAS: Generalmente asociadas a las "Vetas Compuestas", los fragmentos brechizados son de cuarzo.

TECHO DEFINITIVO DE LOS SULFUROS: Sobre esta línea, la roca se presenta lixiviada. La molibdenita es escasa y esta parcialmente oxidada y asociada a limonitas.

MOLIBDENITA EN SUPERFICIES DE FRATURAS: En parte diseminada en roca de caja, observe su concentración en las proximidades de "Vetas Azules" y "Vetas Compuestas".

LIMITE DE LOS BANCOS: A fecha Mayo, 1973

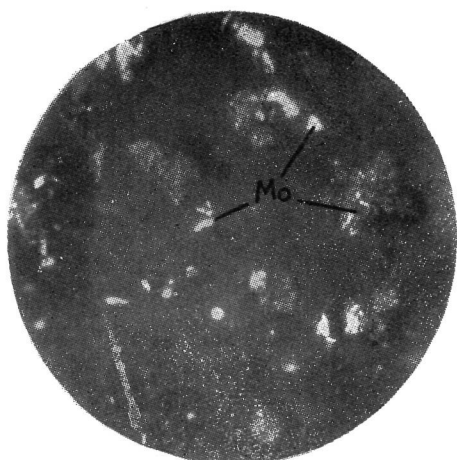


LÁMINA 1.—Molibdenita (Mo) dispersa en interior de "Veta Azul". Aumento 200 X, nícoles paralelos, objetivo Epiplan 8/0.2 Pol.

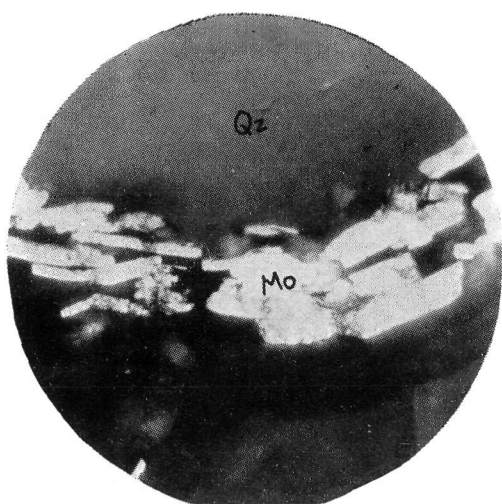


LÁMINA 2.—Molibdenita (Mo) en fractura abierta en cuarzo (Qz) de "Veta Azul". Aumento 625 X, nícoles paralelos, objetivo Epiplan 40/85 Pol Oel.

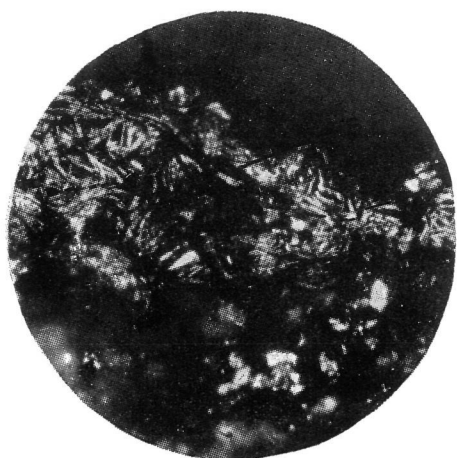
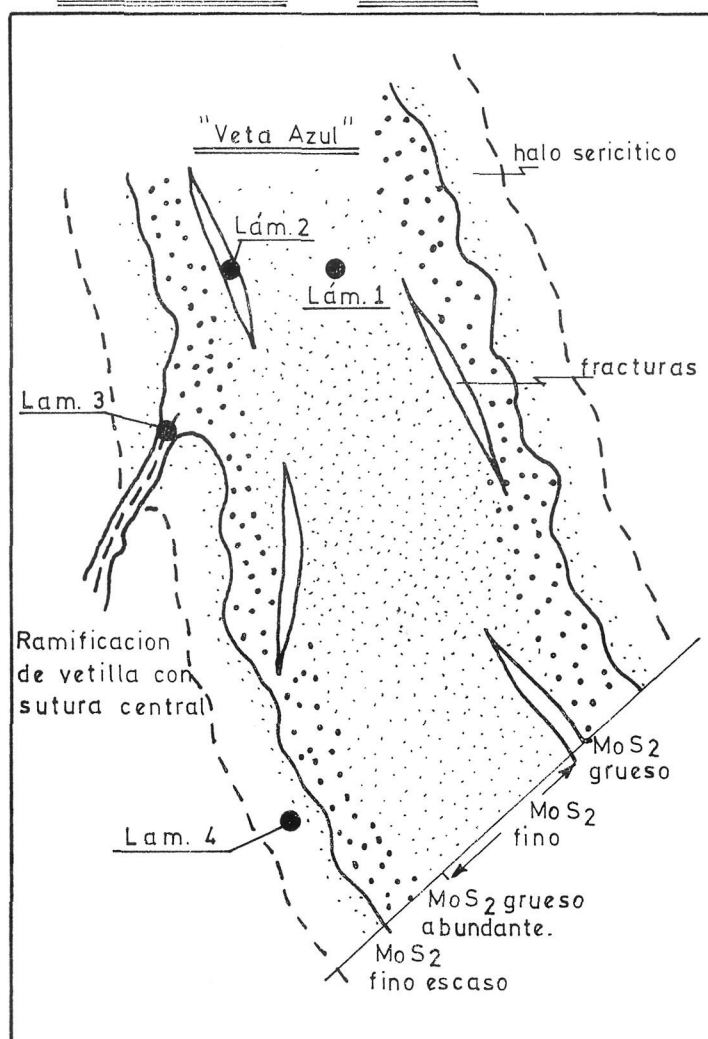


LÁMINA 3.—Ramificación de vetilla de cuarzo con sutura central (S.C.) a partir de "Veta Azul" (V. Az.). Aumento 250 X, nícoles paralelos, objetivo Epiplan 16/0.40 Pol Oel.

"VETA AZUL" TÍPICA



Ubicación láminas 1, 2, 3 y 4

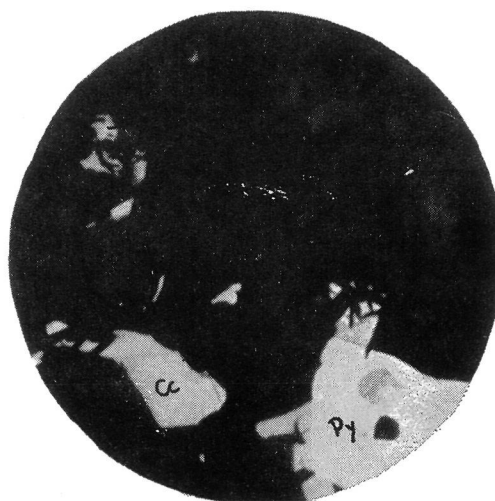


LÁMINA 4.—Molibdenita (Mo) en halo de "Veta Azul"; mineralización de pirita (Py) y calcosina (Cc.). Aumento 125 X, nícoles paralelos, objetivo Epiplan 8/0.4 Pol Oel.

aplítica, que en el yacimiento ocupan una amplia banda paralela a la Falla Oeste, en forma de haces y segmentos fallados de diferentes rumbos; su buzamiento suele ser sinuoso y cercano a la vertical y persisten considerablemente a lo largo de su rumbo y en la vertical (Fig. 1).

La apariencia en el terreno de estas vetas es de filones compactos de cuarzo afanítico con cajas bien definidas, de color gris acerado a gris-azul; este color está dado en parte por la molibdenita contenida, que en muchos casos no es observable a simple vista. Es posible que la "molibdenita en dispersión coloidal en cuarzo" (BANDY, 1931) correspondiera a una interpretación errada sobre la forma de ocurrencia de la molibdenita en las "vetas azules". Cabe destacar que el color gris o azul de estas estructuras no sólo se debe a la molibdenita contenida, sino a la presencia de mineralización cuprífera de las asociaciones pirita-calcosina, calcopirita-covelina y pirita-covelina que contribuyen en gran medida a la coloración de la veta.

El molibdeno en las "vetas azules" se presenta en forma de cristales de molibdenita entre $10\ \mu$ a 1 mm., dispersos en el cuarzo, pero generalmente concentrados hacia los bordes de la veta, donde se observan agrupaciones de cristales entrecrecidos. Otros minerales primarios comunes en estas estructuras son pirita y calcopirita, con escasos contactos de molibdenita (Lámina 1).

En los bordes de las "vetas azules" se observa halo destructivo de cuarzo-sericita, si bien el ancho del halo es siempre menor que el ancho de la veta; en esta zona se observa escasa mineralización de molibdeno (Lámina 4) excepto si hay fracturamiento intenso; en este caso la mineralización es similar al tipo que se describirá más adelante como "Mineralización en superficies de fracturas". Lo mismo ocurre en fracturas abiertas que pueden existir en el interior de la "veta azul" (Lámina 2).

Localmente se han observado relaciones de corte entre las "vetas azules" y las vetillas con sutura central, siendo las "vetas azules" posteriores a éstas; en otros casos se ha observado fusión de ambos tipos de estructura, dando impresión de inyección simultánea. También se han descrito "vetas azules" que presentan ramificaciones finas de vetillas de cuarzo con sutura central (Lámina 3). Como caso especial de "vetas azules", en las zonas más profundas del yacimiento se ha observado un tipo de vetas de cuarzo no descritas en la zona actualmente expuesta en la mina (AMBRUS, 1972); caracterizados por un contenido excepcionalmente alto de molibdeno y ausencia casi total de otros sulfuros. Son vetas masivas de cuarzo de color blanco, de textura coloforme, sin halo de alteración hidrotermal visible, en que la molibdenita se presenta en guías compuestas por pequeños cristales euhedrales. En algunas de estas vetas se ha observado pequeños cristales de estibnita.

"Vetas Compuestas"

Corresponden a estructuras generalmente grandes de 0.5 a varios metros de espesor, compuestas por sistemas de "vetas azules" adyacentes; su aspecto es parecido a las "vetas azules", pero el cuarzo tiene aspecto brechoso, el interior de la veta presenta varias estrías paralelas en sus bordes, y son menos regulares que en las "vetas azules". Otra característica de estas vetas es un halo sericítico bastante bien desarrollado, aunque no tanto como en las vetillas hidrotermales propiamente tales. En trabajos recientes (TOBEY, 1971) se ha considerado a las "vetas compuestas" como "vetas azules" tectonizadas, pero en estudios anteriores (LANGERFELDT, 1964, op. cit.), se había establecido su relación con las "masas de cuarzo" (quartz pods), que se relacionarían a las áreas de "megabrecha" descritas en la zona occidental del yacimiento. Ambas interpretaciones pueden ser correctas desde el punto de vista genético, pero las características mineralógicas de estas estructuras aconsejan describirlas aparte. En efecto, la molibdenita contenida en este tipo de vetas, además de presentarse en diseminación fina, tiende a situarse en sus bordes y en las fracturas del interior de la veta en forma de agregados policristalinos gruesos; vista al microscopio, la molibdenita se observa como haces enlazados de cristales tabulares.

En la zona de fuerte enriquecimiento supérgeno, las "vetas compuestas" ofrecen las estructuras abiertas o brechizadas que son apropiadas para la deposición de calcosina o covelina; de esta manera, las zonas de "vetas compuestas" tienen también alta ley en cobre y constituyen zonas en que la molibdenita puede estar en contacto con minerales supérgenos de cobre.

Al igual que las "vetas azules", estas estructuras tienden a ser largas y profundas, pero comúnmente se presentan dislocadas y segmentadas por la tectónica posterior. Localmente se ha observado que se correlacionan espacialmente con masas irregulares de cuarzo, generalmente brechoso, que contienen una mineralización similar (Fig. 1).

Molibdeno en superficie de fracturas

Además de la mineralización primaria de molibdeno asociada a estos tres tipos principales de cuarzo hidrotermal temprano, se observa molibdenita en superficie de fracturas, no relacionada con el cuarzo; esta ocurrencia es especialmente marcada en proximidades de "vetas azules" y "vetas compuestas" y aunque no se ha hecho una evaluación cuantitativa de este tipo de mineralización, se estima que alrededor de un tercio de la molibdenita presente en el yacimiento se encuentra en superficie de fracturas. Aquí la molibdenita se presenta en masas gruesas, haces curvos de cristales, a

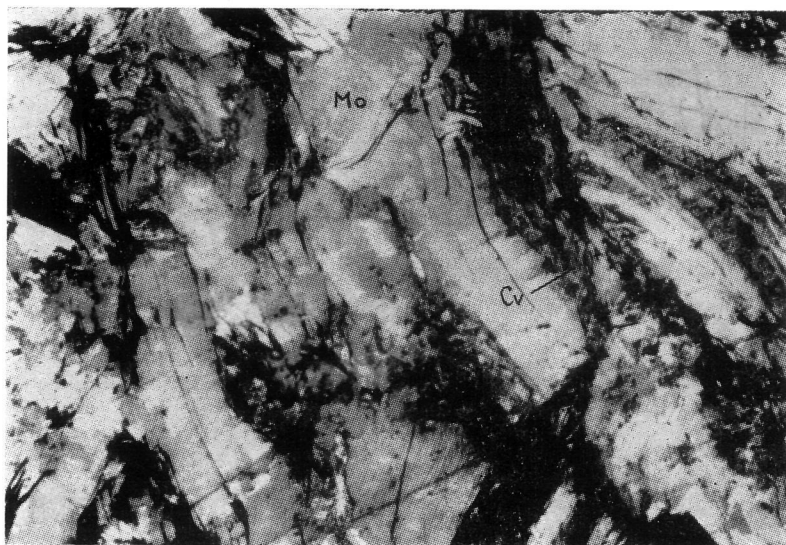


LÁMINA 5.— Molibdenita (Mo) en cristales tabulares enlazados y curvos en superficie de fractura. Se observa covelina (Cv) en los bordes de algunos cristales. Aumento 250 X, nicoles paralelos, objetivo Epiplan 16 / 0.40 Pol Oel.

LÁMINA 6.— Contactos "casuales" de molibdenita (Mo) con covelina (Cv) en una fractura. Aumento 250 X, nicoles paralelos, objetivo Epiplan 16 / 0.40 Pol Oel.

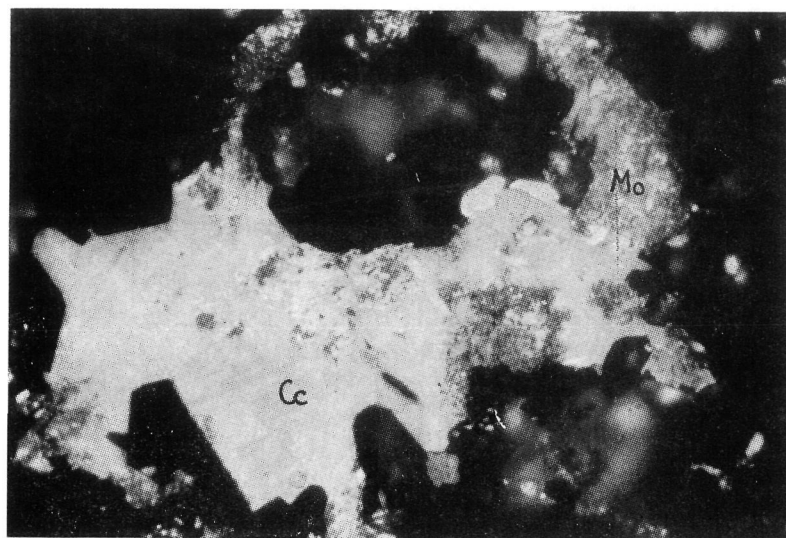
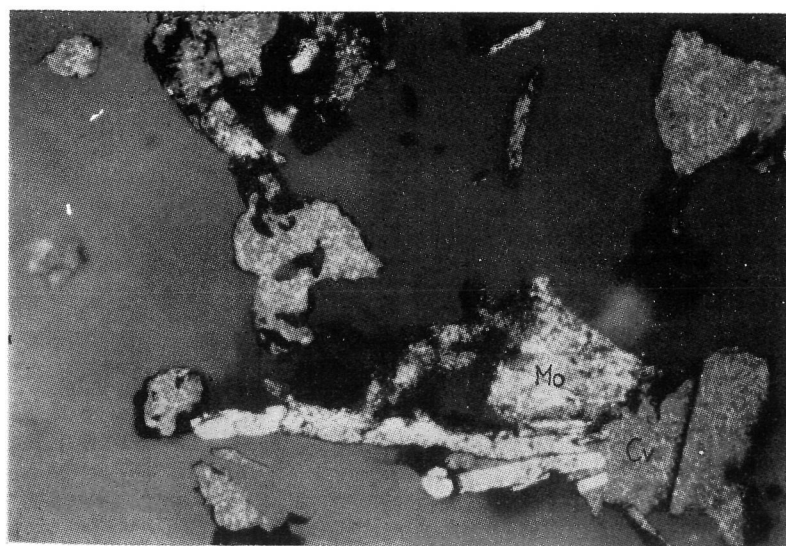


LÁMINA 7.— Enlazamiento estrecho de cristales de molibdenita (Mo) y calcosina (Cc) en una fractura. Aumento 625 X, nicoles paralelos, objetivo Epiplan 40 / 0.85 Pol Oel.

menudo con superficie brillante y estrías de falla y ocasionalmente masas de molibdenita plegadas o segmentadas. Estos hechos indican movimiento a lo largo de esas fracturas y la molibdenita se ha adaptado a las condiciones de la estructura mediante deformación plástica. El origen de esta molibdenita puede ser por removilización desde "vetas azules", debido a esfuerzos tectónicos (Lámina 5).

Este tipo de fracturas, generalmente abiertas, constituyen un ambiente favorable para la depositación de soluciones supérgenas de cobre, de manera que es en estas condiciones cuando más posibilidades hay de contactos entre molibdenita y minerales de cobre, especialmente calcosina y covelina. Estos contactos pueden ser "casuales" (Lámina 6), o enlazamientos estrechos de cobre-molibdeno (Lámina 7). En ambos casos es notoria la ausencia de reacción entre los minerales de cobre y molibdenita, dando la impresión de que no existe tendencia de las soluciones cupríferas a depositarse sobre molibdenita.

Se ha examinado la posibilidad de que la molibdenita en fracturas impregne la roca de caja más allá del borde de la fractura, encontrándose indicios de introducción de molibdenita en la caja, pero sólo a través de pequeñas fracturas.

Ocurrencias anómalas

Existen otras ocurrencias de molibdenita que se consideran anómalas; se ha observado que ciertas vetas tardías, con mineralización de enargita-luzonita y pirita, al cortar "vetas azules" incorporan algo de su molibdenita, que en este caso se presenta con la textura que se le observa en las superficies de fractura, pero en contacto con minerales de generación más tardía. También se ha observado fragmentos de cuarzo incorporados a estas vetas tardías, que corresponden a la "veta azul" (Lámina 8).

Este fenómeno también se ha observado en vetillas hidrotermales de cuarzo-sericita-pirita, e incluso se ha descrito arrastre de molibdenita a lo largo de pequeñas fallas que segmentan alguna estructura portadora de molibdenita (Lámina 9). Estas ocurrencias se deben a la extrema plasticidad de la molibdenita y se puede considerar como casos especiales de mineralización de molibdeno en fracturas debido a removilización.

Oxidación del molibdeno

La distribución del molibdeno en la zona de oxidación de Chuquicamata es notoriamente parecida a su distribución en la zona de sulfuros; los contenidos totales de molibdeno por debajo y encima del techo de sulfuros de

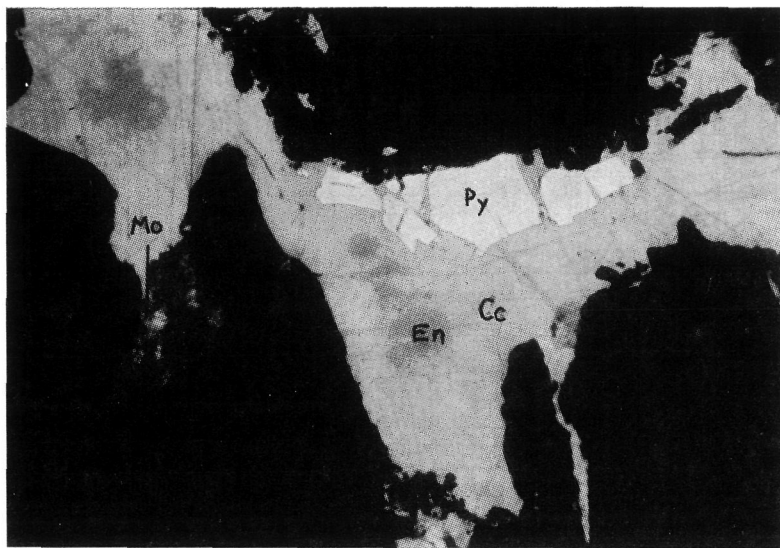


LÁMINA 8.—Ocurriencia anómala de molibdenita (Mo) en una veta tardía de enargita (En), pirita (Py) y calcosina supérgena (Cc). Aumento 250 X, nicoles paralelos, objetivo Epiplan 16/0.40 Pol Oel

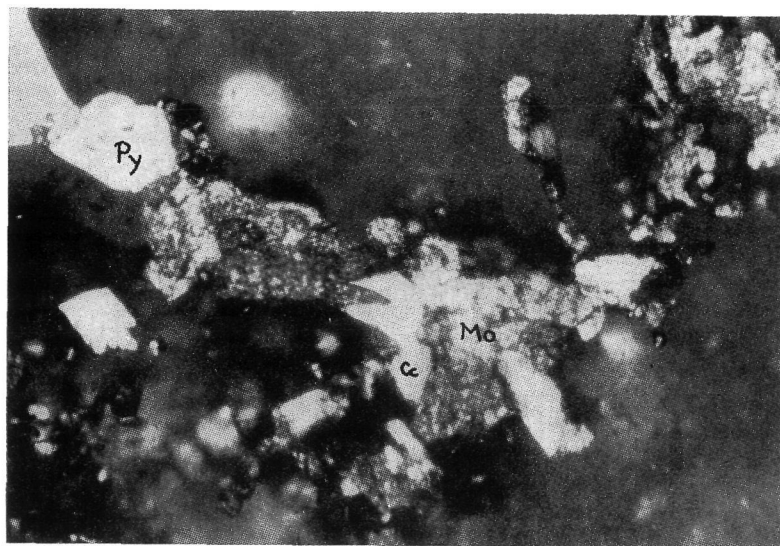
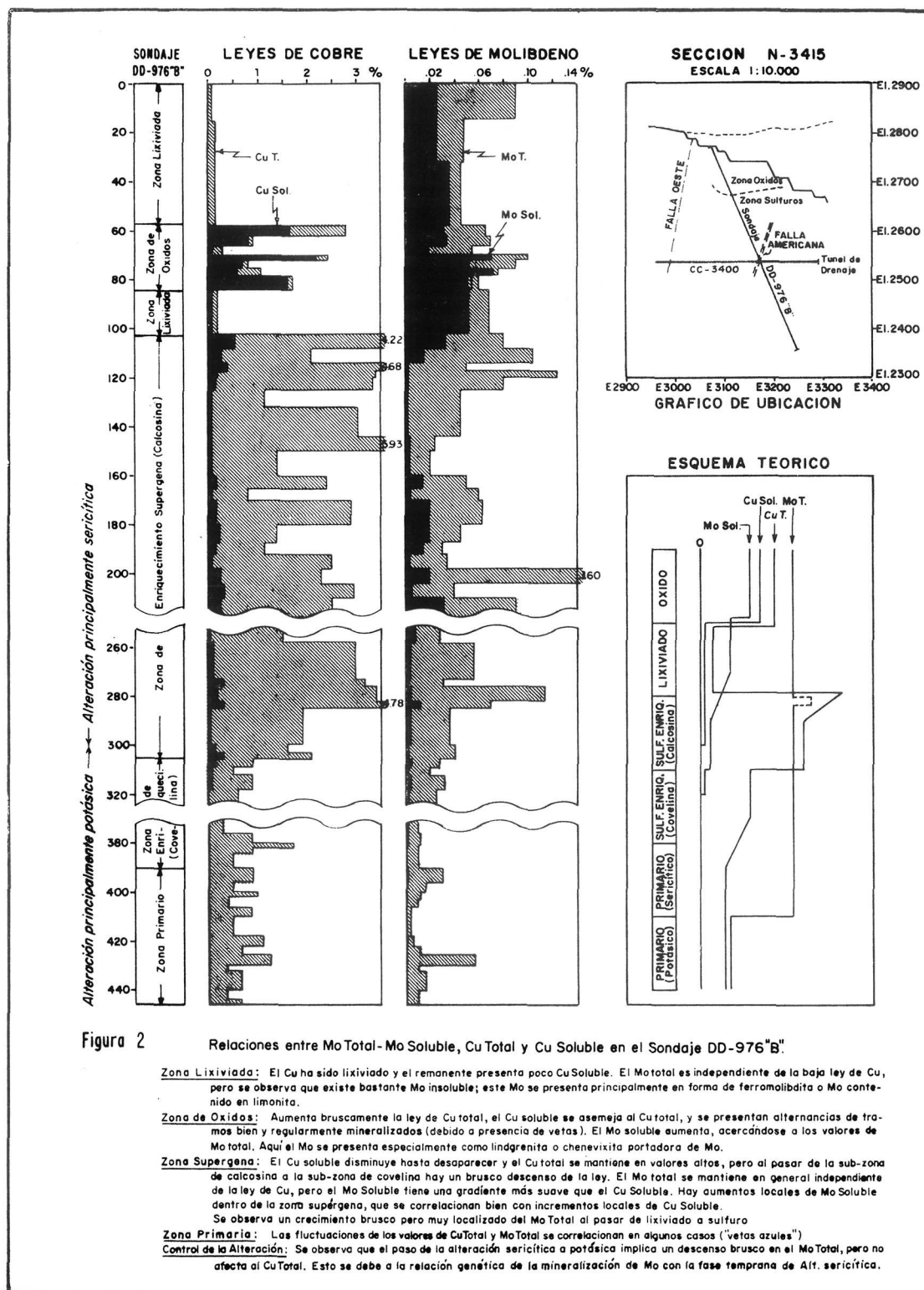


LÁMINA 9.—Ocurriencia anómala de molibdenita (Mo) en vettilla hidrotermal de la fase de cuarzo-sericita, donde coexiste con pirita (Py) y calcosina supérgena (Cc). Aumento 250 X, nicoles paralelos, objetivo Epiplan 16/0.40 Pol Oel

cobre se mantienen en líneas generales, con algunas anomalías locales. Sin embargo, desde el punto de vista mineralógico, la diferencia es notable: mientras en la zona de sulfuros hay una clara predominancia de molibdenita, en la zona de oxidación prevalecen los minerales oxidados de molibdeno y

otros minerales oxidados que en diferentes formas retienen molibdeno. Con este hecho se confirma aquí el comportamiento de este elemento en otros yacimientos del mundo, en el sentido de que la molibdenita es fácilmente



oxidable en el ambiente propio de zonas de oxidación, pero los minerales oxidados resultantes tienen poca solubilidad y por lo tanto no sufren migración importante por efecto de las aguas meteóricas que percolan hacia la zona de cementación.

La base de la zona de oxidación para el cobre y el molibdeno, aunque se asemejan a grandes rasgos, no coinciden; la presencia de molibdenita en la parte inferior de la zona de oxidación del cobre y la presencia de óxidos de molibdeno en la parte superior de la zona de sulfuros se manifiesta en todos los puntos del yacimiento que se investigaron. Este hecho se comprueba a través de la coexistencia de alto porcentaje de Mo insoluble con alto porcentaje de Cu soluble y alto porcentaje de Mo soluble con Cu insoluble (Fig. 2). Además de la evidencia química, esto se puede comprobar visualmente.

La explicación físico química para este fenómeno es que las curvas de óxido-reducción para los sistemas Mo^{+4} — Mo^{+5} — Mo^{+6} — O^2 (TITLEY AND ANTHONY, 1961) y Cu-Fe-S-O (GARRELS, 1960) se cortan en un punto de pH 5,5, condición fácilmente alcanzable en un proceso de oxidación natural de un yacimiento y esto posibilita la coexistencia de molibdenita estable en la zona de óxidos de cobre, así como óxidos de molibdeno con sulfuros de cobre (Fig. 3).

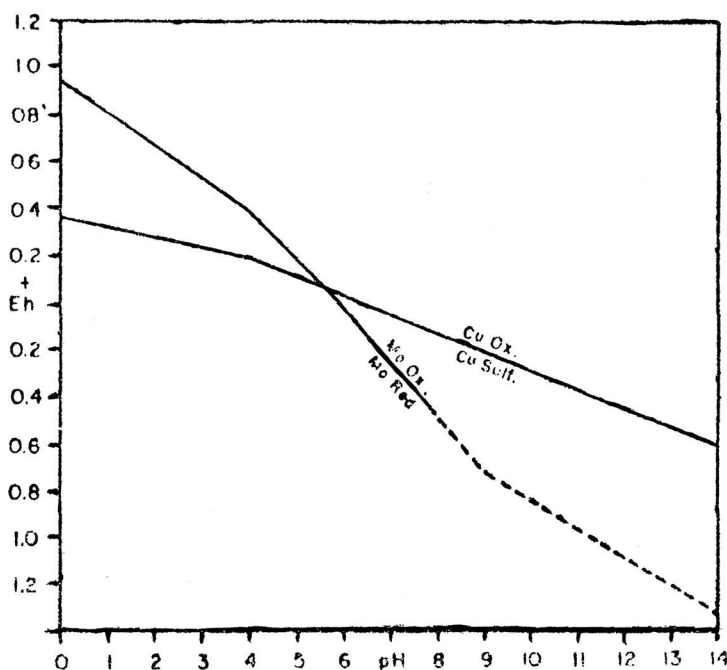


FIG. 3

Curvas de óxido-reducción para los sistemas Cu-Fe-S-O y Mo^{+4} — Mo^{+5} — Mo^{+6} — O respectivamente, a 25°C y 1 atm. de presión. Obsérvese que al cortarse las curvas a un pH $\sim$ 5.5 (condiciones supérgenas normales), se puede presentar cualquier combinación de tipo Cu Ox - Mo sulf. o Mo Ox - Cu sulf.

La presencia del molibdeno soluble por debajo del techo de la zona de cementación se manifiesta por la existencia de relleno de lindgrenita en algunas fracturas, coincidentes o contiguas a las que presentan mineralización gruesa de molibdenita; este tipo de molibdenita es la que presenta la mayor exposición a la oxidación.

Sobre el techo de la zona de cementación, en cambio, el molibdeno existente en forma de sulfuro se presenta bajo la forma de molibdenita como remanente en "vetas azules" y cuando está en superficie de fracturas se encuentra protegida por una pátina verdosa de mineral oxidado, especialmente lindgrenita.

Minerales portadores de Mo en la zona de oxidación.—La lindgrenita, $\text{Cu}_3(\text{MoO}_4)_2(\text{OH})$, aunque posiblemente no haya sido el mineral de molibdeno más abundante de la zona oxidada del yacimiento, es el que más a menudo se observa asociado a molibdenita y es, por lo tanto, el más importante desde el punto de vista de sus implicaciones metalúrgicas. En Chuquicamata se suele encontrar en forma de pátinas verde pálidas sobre molibdenita o cuarzo; solo excepcionalmente se han encontrado cristales tabulares de color verde oliva relleno de huecos o fracturas. Este mineral es considerablemente más abundante en zonas donde hay minerales oxidados de cobre que en las zonas lixiviadas propiamente tales; ésto se debe a su relativa solubilidad en ambiente ácido. JARREL (1937), experimentó con la solubilidad de este mineral con miras a su recuperación a escala industrial de las soluciones de la Planta de Oxidos de Chuquicamata, obteniendo disoluciones de 98 a 99 % en H_2SO_4 en concentración de 64 a 68 g/l. Sin embargo, la práctica demostró que a escala industrial la lindgrenita, así como los demás minerales de molibdeno, resultaba mucho más difícil de disolver. La solubilidad promedio del Mo en los óxidos que se explotaron entre 1929 y 1937 fue sólo de 30 %.

En las zonas lixiviadas, en lugar de lindgrenita se suele encontrar ferromolibdita $\text{Fe}(\text{MoO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$. Este mineral se presenta como manchas o pátinas de color amarillo y no se han observado cristales. Se encuentra asociado con limonitas pardo-rojizas y cuarzo brechoso. En las rocas lixiviadas que descansan sobre la zona de alta ley de la zona oeste del yacimiento, se ha observado que este mineral es localmente bastante abundante.

La ferromolibdita es un mineral considerablemente estable en condiciones naturales. Su máxima estabilidad es a un $\text{Ph}=3.2$ (CARPENTER, 1968), pero sólo se solubiliza a pH extremadamente bajos. En el otro extremo, con pH muy alcalino se descompone solubilizando el ion $(\text{MoO}_4)^=$. Esto sólo ocurre a pH 6.2; al pH bajos el producto solubilizado es el ion molibdato ácido monovalente $(\text{HMoO}_4)^-$, (BHAPPY, 1964, in CARPENTER, op. cit.).

A pesar de que en diversos yacimientos de molibdeno del mundo este mineral es el principal de la zona de oxidación, no se ha encontrado aún un

método apropiado para su aprovechamiento industrial. En Chuquicamata se hicieron en el pasado algunos intentos, pero fracasaron aún a escala de laboratorio. Actualmente no se hace ningún almacenamiento especial para los estériles de cobre que tienen alto contenido de Mo en forma de ferromolibdita.

Los demás molibdatos que se conocen en Chuquicamata son muy escasos; se encuentra Wulfenita, PbMoO_4 , en que el plomo es aportado por vetas de mineralización tardía, Powelita, CaMoO_4 , en que el calcio podría proceder de yeso o descomposición de feldespatos; sin embargo, ambos minerales son más bien curiosidades mineralógicas.

Por otra parte, algunas limonitas, especialmente la jarosita, son capaces de retener cantidades considerables de molibdeno, hasta un 1 % Mo en el mineral puro (JARREL, op. cit.). Aunque estos contenidos son mucho menores al de los minerales de molibdeno propiamente tales, la gran abundancia de limonitas en la zona lixiviada del yacimiento condiciona que una parte considerable del molibdeno contenido en la zona de oxidación se encuentre en esa forma.

Otros minerales capaces de retener ciertas cantidades de molibdeno son el "Copper Wad", mezcla amorfa de óxidos de cobre, hierro y manganeso. Sin embargo, la afinidad más curiosa del molibdeno es con chenevixita, $\text{Cu}_2\text{Fe}_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot (\text{OH})_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, que puede contener hasta 4.3 % Mo (JARREL, op. cit.). La chenevixita es un producto de la oxidación de la enargita y se presenta en las zonas oxidadas del flanco occidental de Chuquicamata como masas y agregados amorfos y cristalinos finos de color verde amarillento característico, localizado como relleno de vetas de generación tardía oxidados, acompañado por sericita, óxidos de hierro y minerales de arcilla. La chenevixita no sólo tiene la propiedad de retener molibdeno, sino también otros cationes, especialmente plata.

ENRIQUECIMIENTO SECUNDARIO DEL MOLIBDENO

La existencia de enriquecimiento supérgeno de molibdeno es un problema que sólo se ha abordado en los últimos años en estudios mineralógicos de distintos yacimientos del mundo. En base a los antecedentes que se tienen, sólo en Potrerillos se ha establecido con seguridad hasta la fecha.

En Chuquicamata se observó ya en 1938 que el molibdeno "presenta un crecimiento abrupto inmediatamente encima e inmediatamente debajo del techo de sulfuros (zona mixta), especialmente si hay una cubierta gruesa de material lixiviado sobre el mineral sulfurado" (WEISSENBORN, 1938).

Sin embargo, el único mineral de molibdeno sulfurado que se ha observado en el yacimiento es molibdenita, que habitualmente se ha considerado un mineral primario.

En estudios realizados en los últimos años se ha observado que el rango genético de la molibdenita es mucho más amplio de lo que se pensaba en un principio, en que se asociaba la presencia de este mineral solamente a las fases pneumatolíticas de pegmatitas ácidas. Se ha observado formación de molibdenita de origen exhalativo (Valle de los 10.000 humos), molibdenita asociada a actividad hidrotermal de muy baja temperatura (Mansfelder Rücken) y RAMDOHR (1969), sugiere que el molibdeno presente en ciclo sedimentario, de origen biogénico, se encontraría en forma de molibdenita.

De esta forma, aunque no se ha establecido campos de estabilidad de molibdenita en condiciones supérgenas, no se puede excluir la posibilidad de que parte de la molibdenita contenida en la zona de cementación de algunos yacimientos sea de origen supérgeno.

En Chuquicamata, la relación establecida por Weissenborn se ha seguido observando sistemáticamente (Fig. 2), el crecimiento de las leyes de molibdeno en las condiciones señaladas tiene pequeña extensión en el sentido vertical, generalmente no más de 10 metros y el aumento de ley de esa zona es del orden de 50 %. Es evidente que de existir dicho enriquecimiento supérgeno, su extensión e intensidad no pueden ser grandes, debido a la escasa solubilidad de los minerales oxidados de molibdeno, necesarios para el ciclo de lixiviación-cementación.

Las evidencias mineralógicas que apoyan esta posible molibdenita supérgena son pobres; se ha observado en algunos casos agregados finos de cristales de molibdenita cubriendo parcialmente a minerales supérgenos de cobre (Lámina 10); además, en los primeros metros de la zona de cementación, la molibdenita se presenta en muchos casos como agregados muy finos de cristales que engloban cristales mayores (Lámina 11). En algunos casos se observan cristales enlazados de molibdenita con calcosina o covelina supérgena, pero esta evidencia es aún más débil que las anteriores.

En esta zona, señalada como posiblemente supérgena, estudios recientes de microscopía demostraron la existencia de un mineral estrechamente asociado a la molibdenita, en cristales de tamaño no superior a 4 micrones, que presentan un color amarillento y una dureza mayor que la molibdenita. Se clasificó tentativamente como "Castaingita" (CuMo_2S_5) pero aún no se tiene una determinación definitiva para este mineral.

DISTRIBUCION DEL MOLIBDENO EN CHUQUICAMATA

Para obtener una buena apreciación de la distribución del molibdeno en el yacimiento, se ha elegido tres bancos y cinco secciones con las que se describirá las características generales de esta mineralización.

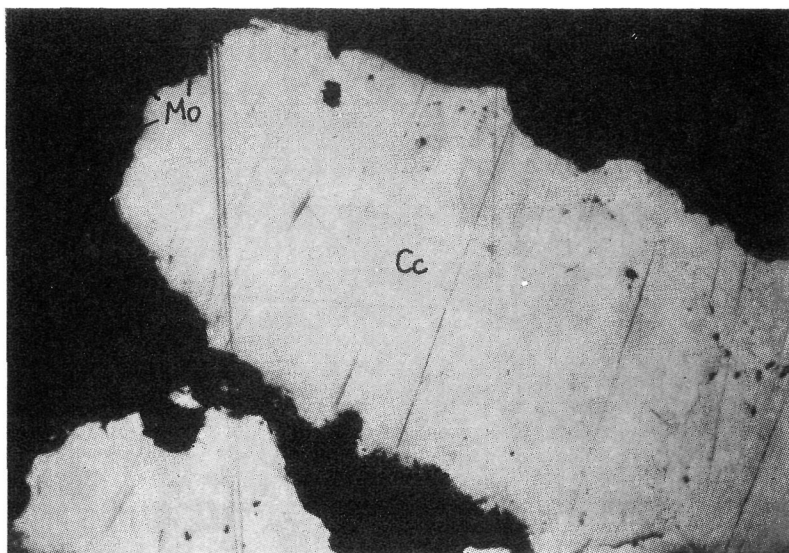


LÁMINA 10.—Molibdenita (Mo) en cristales finos rodeando parcialmente a cristales de calcosina supérgena (Cc). Aumento 250 X, nicoles paralelos, objetivo Epiplan 16/0.40 Pol Oel.

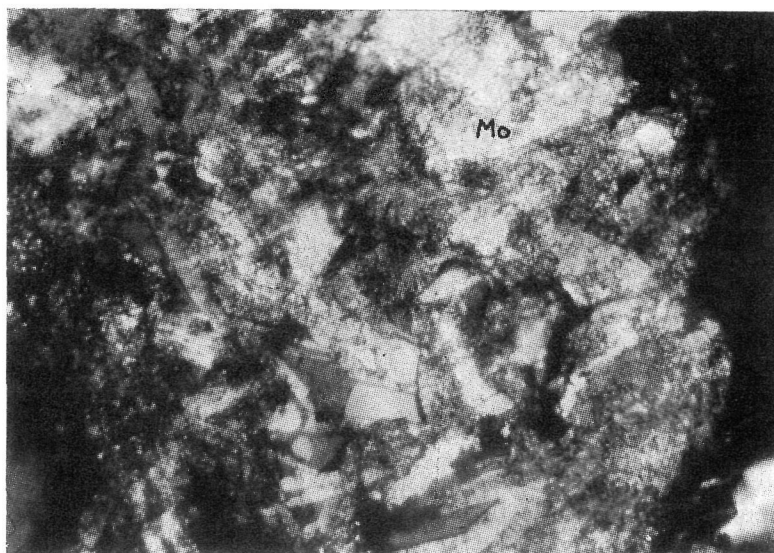


LÁMINA 11.—Cristales de molibdenita englobados por molibdenita de grano fino; se observa oxidación parcial. Esta ocurrencia es común cerca del techo de sulfuros. Aumento 800 X, nicoles paralelos, objetivo Epiplan Pol Oel

Los bancos elegidos son I-1 (cota 2645), J-1 (cota 2593) y K-1 (cota 2541, nivel del túnel de drenaje). En la figura 4 se muestra la ubicación de estos bancos en relación al perfil actual de la mina.

Las secciones analizadas corresponden a cortes este-oeste, en las coordenadas N-2900, N-3400, N-3900, N-4400, N-4900. En la figura 4 se muestra la ubicación de estos perfiles de la mina.

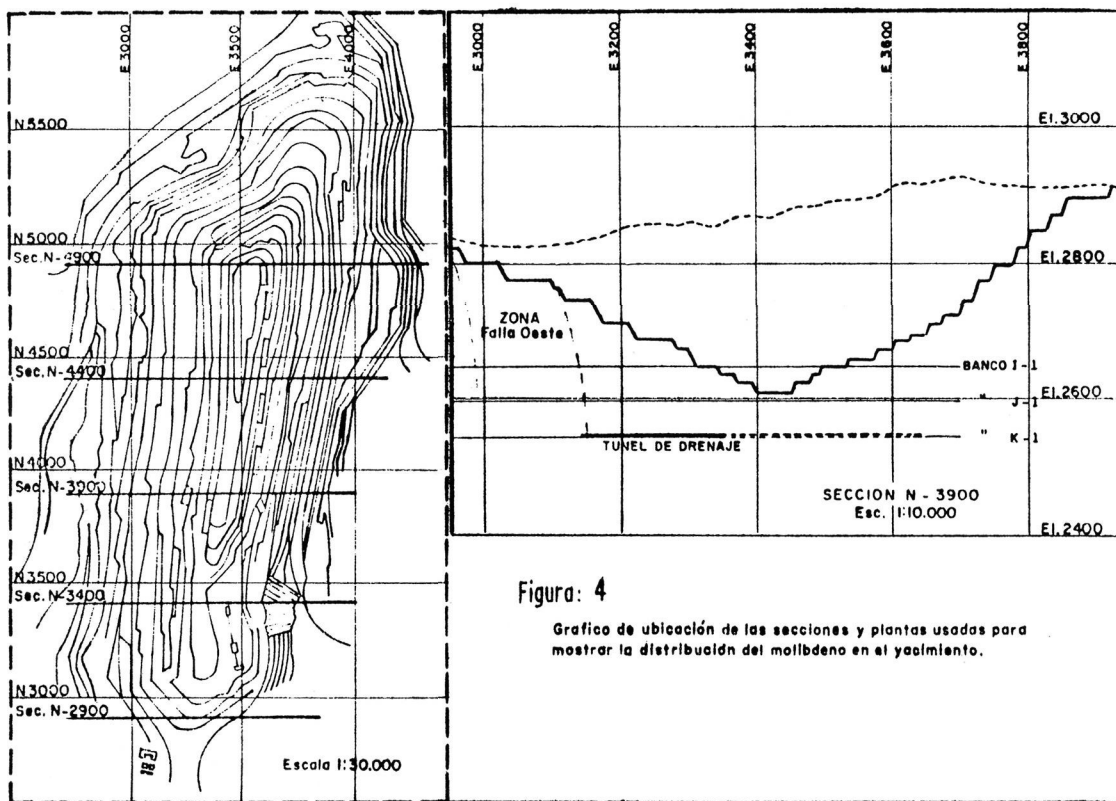


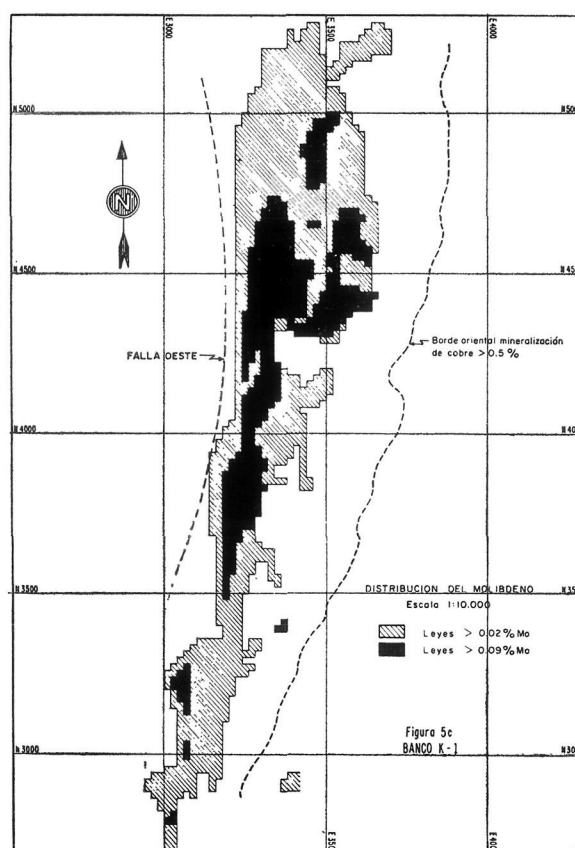
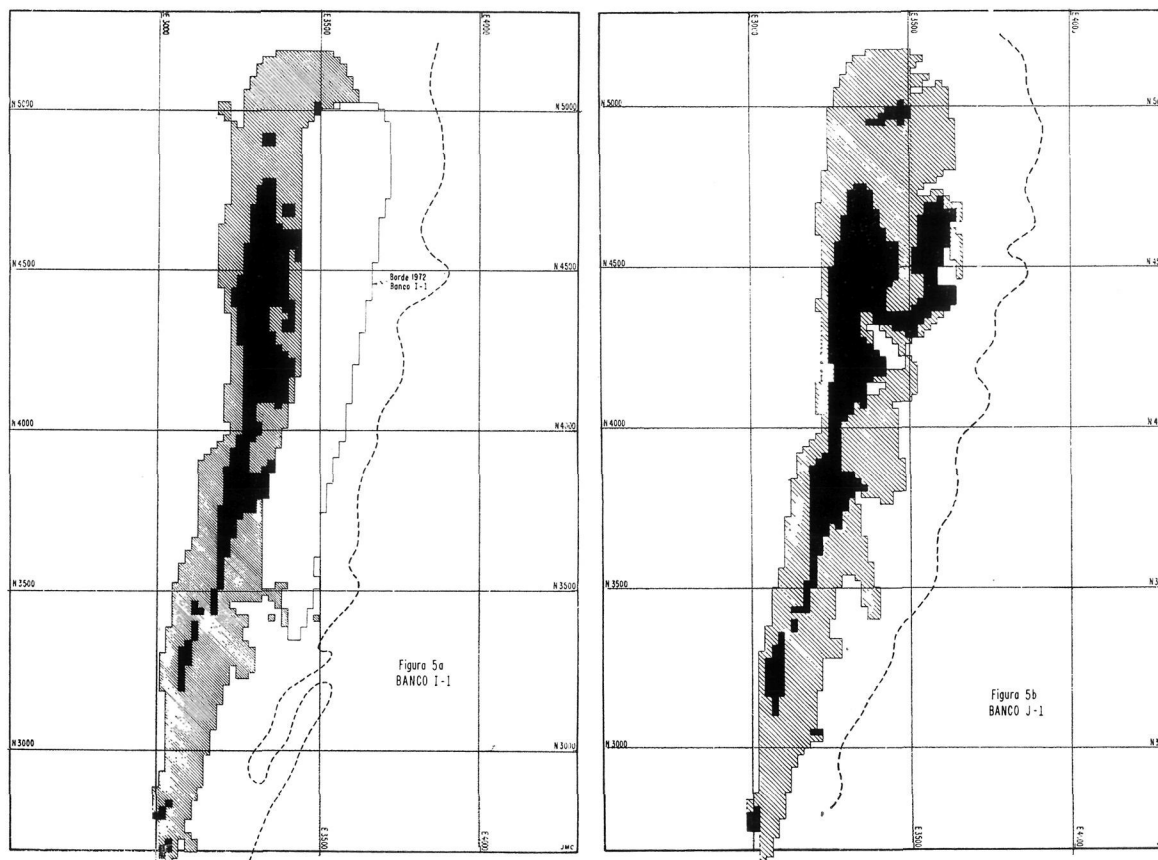
Figura: 4

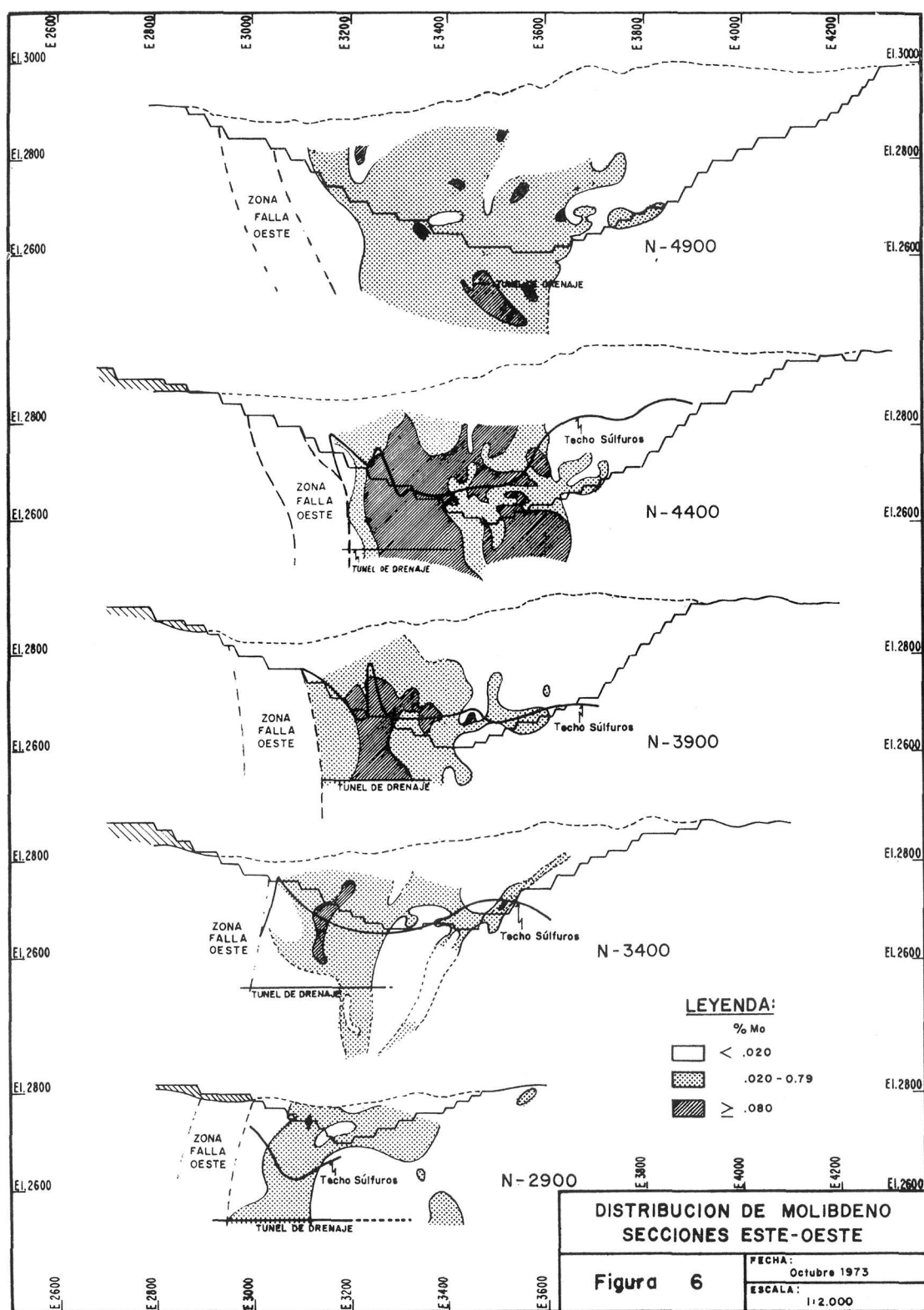
Grafico de ubicación de las secciones y plantas usadas para mostrar la distribución del molibdeno en el yacimiento.

Si observamos la distribución del molibdeno en planta (Fig. 5), se puede apreciar que la mineralización más intensa ocupa una banda casi vertical aproximadamente paralela a la Falla Oeste; hacia el norte de la coordenada N-4300, la faja se amplía para determinar una forma de herradura abierta hacia el norte, terminando la mineralización de alta ley aproximadamente en la coordenada N-4750. Más al norte aparece una zona de alta ley (coordenada N-4900 a 5000), que crece en profundidad. Hacia el sur, la banda de alta ley se estrecha, manteniendo su paralelismo con la Falla Oeste, y de la coordenada N-3500 al sur se hace intermitente, aunque se siguen encontrando pequeñas zonas de alta ley prácticamente hasta el término del yacimiento por el sur.

Se observa claramente que si bien la zona de alta ley mantiene su ancho en profundidad, el margen este de la mineralización de baja ley tiende a cerrarse hacia el oeste en los bancos inferiores, manteniendo cierto paralelismo con el límite oriental de la mineralización cuprífera.

Sólo en pocos puntos la mineralización útil está en contacto con la Falla Oeste y en ningún caso es cortada por ésta. Este es un argumento de peso para definir la Falla Oeste como una estructura premineral.





Si analizamos la distribución de molibdeno en secciones (Fig. 6), se manifiesta en todas las secciones una tendencia de estrechamiento en profun-

didad de los márgenes de mineralización útil, mientras las zonas de alta ley persisten o se ensanchan hacia abajo. Esto permite suponer que en las partes más profundas del yacimiento habrían contactos bruscos entre mineralización de alta ley con zonas estériles en el borde oriental del yacimiento.

En las partes superiores del yacimiento, se pone en evidencia la independencia de las leyes de molibdeno por encima y debajo del techo de sulfuros, fenómeno que ya se explicó anteriormente.

En la parte sur del yacimiento (Fig. 6, secciones N-2900 y N-3400), las zonas de alta ley se encuentran confinadas a la Falla Americana, que prácticamente controla la mineralización de molibdeno. Hacia el norte esta estructura desaparece ramificándose en "cola de caballo", pero la mineralización se ensancha formando la banda que se describió anteriormente (sección N-3900).

La sección N-4400 muestra la aparición de la rama oriental de alta ley y se puede prever que en profundidad los dos brazos tienden a unirse en uno solo. En la sección N-4900 los dos brazos de alta ley ya desaparecen, pero se manifiesta una parte de una zona de alta ley que sólo cobra importancia en profundidad.

Aunque hay una marcada tendencia general a la verticalidad, en todas las secciones se observa una grosera disposición de paralelismo al buzamiento de la Falla Oeste.

CORRELACION CON OTROS ELEMENTOS DEL YACIMIENTO

Las curvas de distribución de frecuencias de las leyes de molibdeno (Fig. 7), son de dos tipos: una curva log-normal que corresponde a la distribución propia del molibdeno y una curva hiperbólica que representa al molibdeno obtenido en el yacimiento de cobre. Esta segunda curva, que representa las reservas calculadas, es típica para los casos en que se analiza la distribución de un fenómeno en un espacio mayor que la distribución propia del fenómeno. En este caso, el espacio considerado es el yacimiento de cobre. La curva log-normal, en cambio, representa la distribución de la mineralización de molibdeno dentro de los márgenes del yacimiento de molibdeno y su absoluta regularidad demuestra que la mineralización de molibdeno se puede considerar, desde un punto de vista estadístico como un fenómeno independiente de la mineralización de cobre.

Se ha realizado un análisis de correlación entre las leyes de molibdeno con distintas variables del yacimiento, especialmente con leyes de cobre y tipos de roca. El objetivo fue establecer relaciones de tipo genético de la mineralización de molibdeno con otros fenómenos y obtener estimaciones de

carácter general sobre la intensidad de la mineralización de molibdeno en zonas donde se tiene poca información acerca de la distribución.

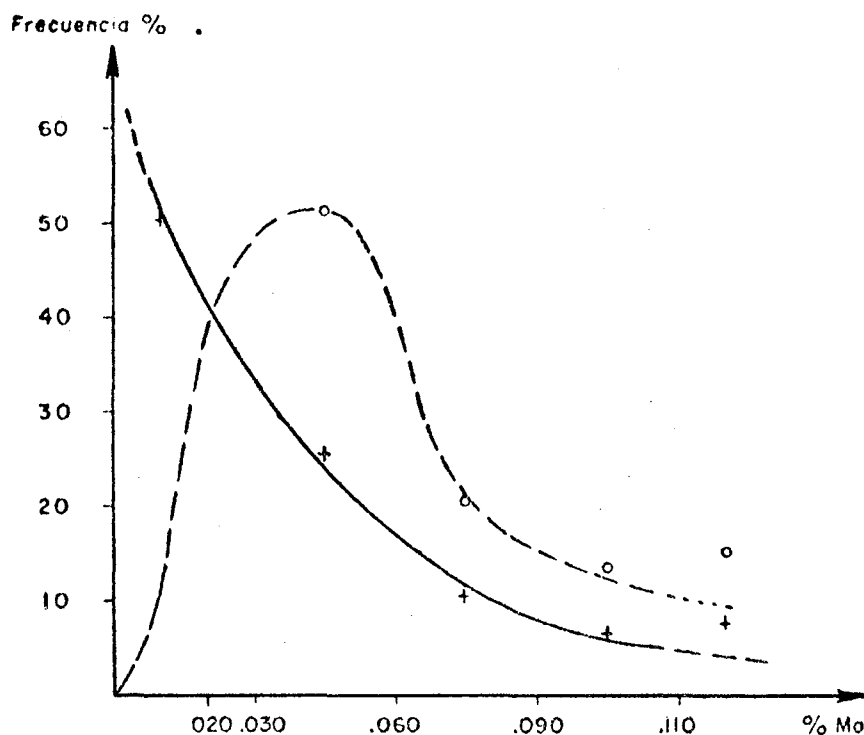


FIG. 7

Curvas de distribución de frecuencias de leyes de Mo para Mo contenido en el yacimiento de cobre (curva trazada con línea llena) y para el Mo contenido en los márgenes de la mineralización de Mo (curva segmentada). Obsérvese que la primera es un segmento de hipérbola y la segunda una curva log-normal. El valor anómalo en ambos casos en leyes superiores a 0,110 % Mo significa que se podrían fijar más rangos > 0,110 % Mo

Correlación molibdeno-cobre

Para este análisis se tomaron 1.032 datos correspondientes a compuestos analizados por cobre total y molibdeno total, en que cada dato representa 14.674 toneladas cortas, es decir, el análisis es válido para aproximadamente 15 millones de toneladas que fueron extraídas de la mina desde 1971.

En la Tabla III se anota el resultado global del análisis.

Se puede concluir que no existe correlación lineal entre leyes de Cu y Mo. Las leyes de Cu ($\bar{X} = 2.06$; $\sigma^2 = 1.68$) demuestran una fuerte dispersión, debido en parte a la naturaleza bimodal de la curva de distribución del cobre (Fig. 8). Las leyes de Mo, en cambio ($\bar{X} = 0.070$; $\sigma^2 = 0.002$), demuestran que los valores de Mo se agrupan en una curva unimodal de escasa dispersión, con los valores agrupados en torno de la media (Fig. 9).

Ley Media Cu	2.06 %
Varianza Cu	1.68
Ley Media Mo	0.070 %
Varianza Mo	0.002
Covarianza Cu - Mo	0.009
Coeficiente de correlación lineal	0.161

TABLA III

Análisis de correlación entre leyes de Cu y Mo
Datos empleados: 1.032

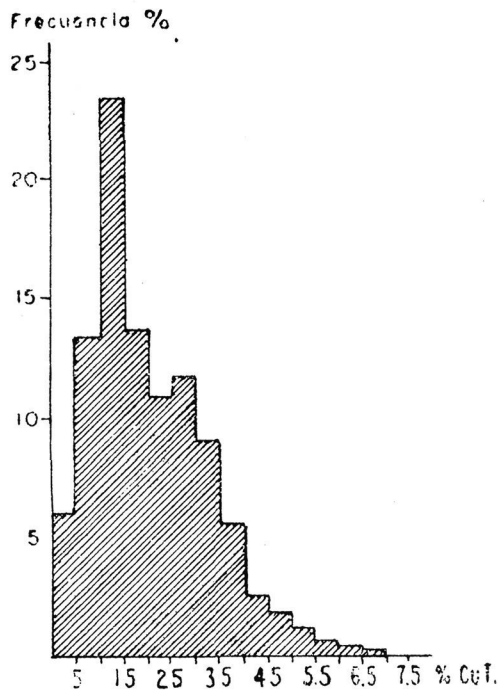


FIG. 8

Histograma de frecuencias de leyes de Cu, calculado con 1.032 datos, equivalentes a 15×10^6 tons. extraídos de la mina entre los años 1971 y 1973.

La curva de distribución es log. normal, pero bimodal. El aumento de la frecuencia es una ley de 2.5-3.0 % Cu se debe a la zona de intenso enriquecimiento en calcosina que deforma la curva de distribución.

Se obtiene una media de 2.06 con una varianza $\sigma^2 = 1.68$.

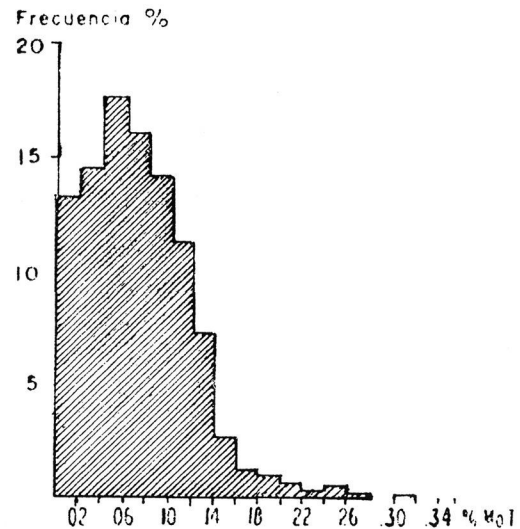


FIG. 9

Histograma de frecuencias de leyes de Mo, calculado con 1.032 datos, equivalentes a 15×10^6 tons. extraídos de la mina entre los años 1971 y 1973.

La curva de distribución obtenida es unimodal, respeta la ley log.-normal. La distribución presenta una media de 0.070 y una varianza $\sigma^2 = 0.002$.

Realizando un análisis de correlación más detallado, se estudió la distribución de las leyes de Mo contenidas en distintos rangos de leyes de Cu (Figs. 10 y 11) y a la distribución de las leyes de Cu contenidas en distintos rangos de leyes de Mo.

En el primer caso (Fig. 10), se puede observar una tendencia muy general de aumento de las leyes de Mo al aumentar las leyes de Cu, pero la varianza es tan alta que esta relación sólo tiene un significado genético. En efecto, las estructuras que produjeron la mineralización de molibdeno también aportaron cierta mineralización cuprífera y esta aparente dependencia se obtiene por superposición de mineralización de cobre sobre una mineralización de molibdeno-cobre.

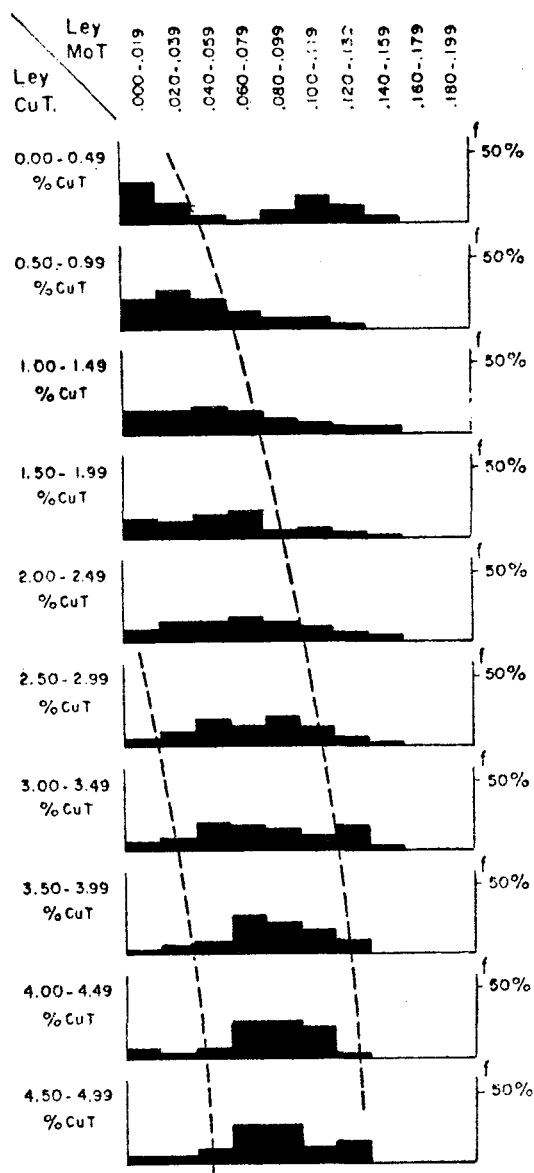


FIG. 10

Cuadro de correlación de Mo en función de Cu, en que se presentan histogramas de frecuencias de leyes de Mo para distintos rangos de leyes de Cu.

Se observa que existe una tendencia muy general de aumento de leyes de Mo al aumentar las leyes de Cu, pero la varianza de las distribuciones resulta demasiado alta para establecer alguna relación de tipo $\% Mo = f(\% Cu)$.

Al analizar el motivo de que el histograma correspondiente a Cu entre 0.00 y 0.49 % es bimodal, se concluyó que la primera moda (.000-.019) corresponde a roca estéril y la segunda (.100-.119) a roca lixiviada de la parte occidental del yacimiento.

En el análisis de dependencia de Cu del Mo (Fig. 11), se puede observar que hay una completa independencia y las leyes de cobre no dependen de las leyes de molibdeno.

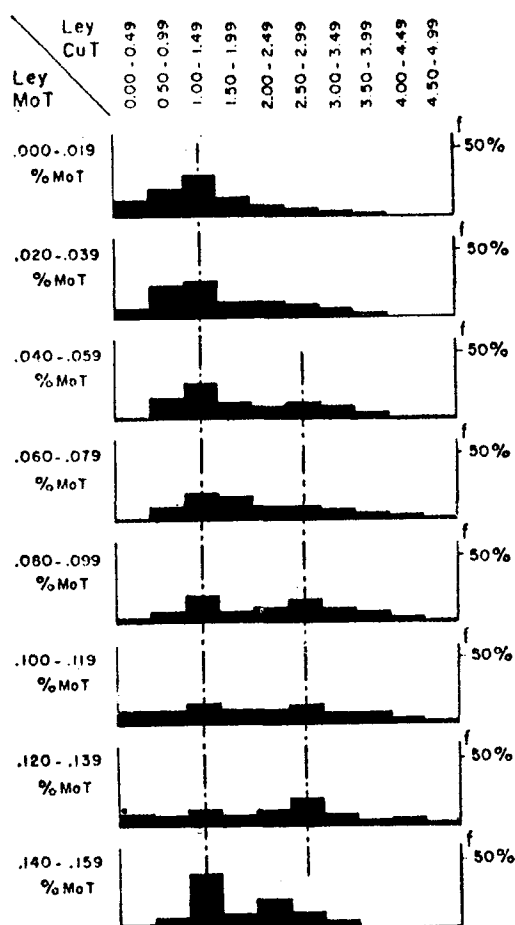


FIG. 11

Cuadro de correlación de Cu en función de Mo, en que se presentan histogramas de frecuencias de leyes de Cu para distintos rangos de leyes de Mo.

Se puede observar la completa independencia del Cu, con lo que se concluye que $\% Cu = f(\% Mo)$.

La no aparición de la segunda moda (2.50-2.99 % Cu) para las leyes bajas de Mo se debe a que los valores de Mo .039 son marginales, fuera de la zona de enriquecimiento de calcosina, que es la causante de la segunda moda.

La no aparición de la segunda moda (2.50-2.99 % Cu) para leyes bajas de Mo se debe a que los valores de Mo .039 son marginales, fuera de la zona de enriquecimiento de calcosina que es la causante de esa segunda moda.

Correlación Mo - Tipo de Roca

Se analizó la intensidad de la mineralización de molibdeno en los principales tipos de roca que componen el yacimiento: Pórfido Este, Pórfido Oes-

te y Roca de Cuarzo-Sericita. No se hizo con el Pórfido Banco, debido a que se tiene poca información de leyes de Mo en las zonas que ocupa, pero según los datos que se tienen, el molibdeno es muy escaso en esa roca.

Para este análisis se usaron 629 datos, equivalentes aproximadamente a 9 millones de toneladas cortas, pertenecientes al banco I-3. Se construyeron tres curvas de distribución de frecuencias (Fig. 12), de las que se pueden obtener algunas conclusiones valiosas:

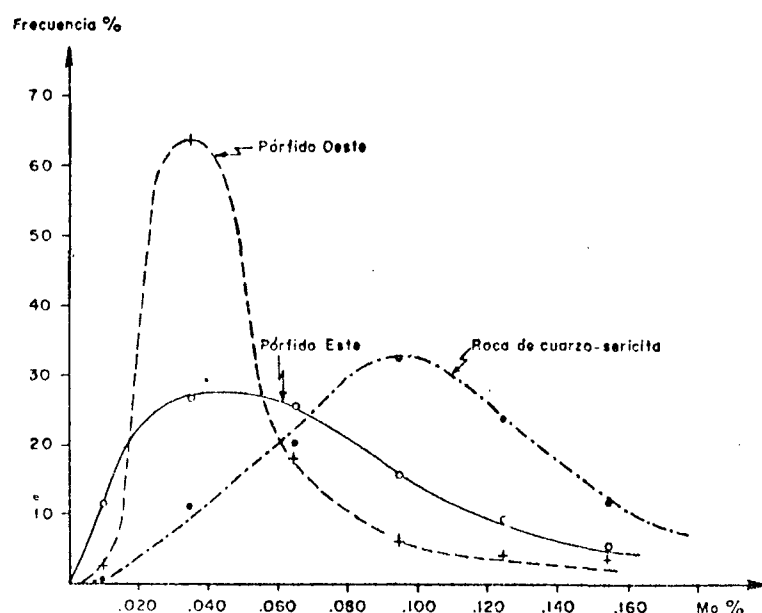


FIG. 12

Curvas de distribución de frecuencias de leyes de Mo en distintos tipos de roca. Se observa que la varianza más baja está en el Pórfido Oeste, pero los valores de Mo más altos se encuentran en la roca de cuarzo-sericita. Número de datos usados: 629

El Pórfido Oeste presenta una mineralización de molibdeno bastante pareja, pero de baja ley (63 % de los casos entre .020 y 0.050 Mo). Esto demuestra que la mineralización de molibdeno tiene una cierta dependencia genética del Pórfido Oeste, cuyas soluciones residuales de carácter hidrotermal temprano pueden haber aportado una cierta cantidad de molibdeno "background".

Quizás esto esté relacionado con la observación relativamente frecuente de vetillas de cuarzo con sutura central en el Pórfido Oeste.

El Pórfido Este, en cambio, no parece estar relacionado con ninguna intensidad especial de mineralización de molibdeno, como lo demuestra la alta varianza de la curva de distribución (68 % de los casos entre .020 y .080 %

Mo). El comportamiento de esta roca durante la mineralización de molibdeno fue posiblemente pasiva.

En la roca de Cuarzo Sericita, las leyes de molibdeno tiene una varianza tan alta como en el Pórfido Este, pero los valores se concentran en torno de una media mucho más alta (76 % de los casos entre .050 y .140 % Mo). Este hecho comprueba claramente que existe una relación genética entre la mineralización de molibdeno y la alteración sericítica, que por su parte es la que produce la roca Cuarzo-Sericita a partir de cualquier tipo de pórfido. Se puede concluir que hay alta probabilidad de encontrar leyes de molibdeno superiores al promedio en las zonas de alteración sericítica intensa.

Aunque no se hizo un análisis específico de la mineralización de molibdeno respecto a los diferentes tipos de alteración hidrotermal, numerosas observaciones demuestran que las leyes de Mo decaen bruscamente al entrar en zonas de alteración potásica, situándose en leyes medias cercanas a 0.01 % Mo (Fig. 2).

MINERALIZACION DE RENIO EN CHUQUICAMATA

Se incluye este capítulo en el presente trabajo debido a la relación entre el molibdeno y el renio en los pórfidos cupríferos y debido al alto interés que este elemento raro presenta por su enorme valor en el mercado. Este estudio es solamente de carácter preliminar y se limita a llamar la atención sobre la presencia del elemento en el yacimiento para su posible futura recuperación y a resumir las ideas que en base a una limitada cantidad de datos se tiene sobre su ocurrencia en Chuquicamata.

PRECIO DEL RENIO EN EL MERCADO

Debido a la escasez de este metal, que se produce principalmente como subproducto del molibdeno que se recupera de los pórfidos cupríferos, se estima que su precio tiende a mantenerse sobre US \$ 500 por libra de Re metálico en los próximos 25 años (RENO, 1970). Los precios actuales del Re metálico en polvo se transan en forma libre entre productor y consumidor y oscilan entre US \$ 580 y US \$ 650 por libra, dependiendo el precio de la cantidad disponible. En barras y láminas, su precio es del orden de US \$ 750 a US \$ 1.580 por libra.

RECURSOS Y DEMANDA DE RENIO

Se ha estimado que los recursos explotables mundiales del renio ascienden sólo a 1 millón de libras, de las cuales 150.000 estarían en Chile, que ocuparía el tercer lugar en este rubro, después de Estados Unidos y Rusia (RENO, op. cit.).

La demanda actual asciende a unas 5.200 libras anuales, siendo Estados Unidos el principal consumidor, seguido por Unión Soviética y Alemania Federal. Cabe destacar que más del 50 % de la producción mundial pasa a formar parte del stock de Estados Unidos.

Se estima que el consumo mundial en el año 2000 oscilará entre 3.500 y 6.100 libras anuales; sin embargo, la demanda está limitada por la escasa cantidad de metal disponible en el mundo.

CONTENIDO EN PRODUCTOS DE DISTINTOS YACIMIENTOS

La casi totalidad de los yacimientos que producen molibdeno, sea como producto principal, coproducto o subproducto, presentan en sus concentrados una cantidad variable de Re, que oscila entre 2 y 1.650 ppm Re.

En la Tabla IV se indica la concentración de Re en algunos yacimientos de Estados Unidos, Rusia y Chile.

Yacimientos	ppm Re 100 % MoS ₂	Observaciones
U.S.A.		
Climax, Colorado	2-5	Yacimiento Mo
Questa, N. Mex.	12	Yacimiento Mo
Mc Gill, Nevada	1.650	Pórf. Cu
Bingham, Utah	360	Pórf. Cu
Chino, N. Mex.	800	Pórf. Cu
Bagdad, Arizona	200	Pórf. Cu
U.R.S.S.		
Akchatausk	7	Yacimiento Mo
Kounrad	510	Pórf. Cu
Almalyk	290	Pórf. Cu
Kadzaran	300	Pórf. Cu
Aigedzor	1.000	Pórf. Cu
CHILE		
Chuquicamata	200	Promedio 1972 - 73
El Salvador	570	Sutulov, 1970
Andacollo	160	I, muestra, 1973
El Teniente	440	Sutulov, 1970

TABLA IV

Contenido de Re en 100 % MoS₂ de algunos yacimientos de U.S.A., U.R.S.S. y Chile

Existe una tendencia general de que las molibdenitas de yacimientos de molibdeno solo, tales como Climax, Questa, etc., tengan contenidos menores a 10 ppm Re, mientras las molibdenitas de pórfidos cupríferos contienen normalmente sobre 150 ppm Re.

Entre los yacimientos chilenos, aunque Chuquicamata tiene un contenido menor a El Salvador y El Teniente, hay que destacar que la cantidad de molibdenita producida es bastante mayor por lo que el contenido total de Renio entregado en los concentrados de MoS_2 puede ser incluso superior al de las otras minas.

MINERALOGÍA DEL RENIO

POPLAVKO (1962), ha descrito el único mineral de renio natural conocido hasta ahora: dzhezkazgnita, CuReS_4 , pero no se tiene conocimiento de la aparición de este mineral en otros yacimientos.

En la mayoría de los casos, el renio está sustituyendo al molibdeno en la molibdenita debido a su radio iónico similar ($\text{Re}^{4+} = 0.74 \text{ \AA}$, $\text{Mo}^{4+} = 0.70 \text{ \AA}$) y a su electronegatividad parecida ($\text{Re} = 1.46$, $\text{Mo} = 1.30$).

La estructura cristalina del MoS_2 y del ReS_2 , por otra parte también son similares, de modo que existe la posibilidad de sustitución isomórfica entre ambos iones (MORRIS AND SHORT, 1969).

Se ha comprobado, sin embargo, la existencia de renio en otros minerales, especialmente minerales primarios de cobre, en los que también estaría en forma de sustitución iónica.

Aunque se tiene escaso conocimiento acerca del comportamiento geoquímico de este elemento en condiciones naturales de oxidación, se ha comprobado que los minerales oxidados de molibdeno contienen menos renio que la molibdenita original, lo que hace suponer que existe una separación del Re durante la oxidación de la molibdenita. Los óxidos de renio son solubles en agua formando ácido perrénico, HReO_4 , tanto en condiciones ácidas como alcalinas (MORRIS AND SHORT, op. cit.).

OCURRENCIA DE Re EN EL YACIMIENTO

Se ha estudiado en forma preliminar la presencia de renio en el yacimiento de Chuquicamata, realizando análisis químicos de diferentes estructuras y buscando su correlación con otros tipos de mineralización.

Como era de esperar, existe relación entre el renio y el molibdeno y las estructuras que lo contienen. Sin embargo, se ha podido concluir que existen concentraciones de renio en otros minerales, que hasta ahora no se han podido individualizar. Asimismo, en los estudios microscópicos no se ha

podido establecer hasta la fecha ningún mineral parecido al que en otros lugares se ha definido como sulfuro de Mo-Re.

Al hacer una correlación de leyes de Mo-Re (Fig. 13), se observa que todos los valores analizados se encuentran sobre la recta teórica representada por la ecuación $\text{Re (ppm)} = 1/4 \text{ Mo}(\%)$, que es la relación aproximada de Re-Mo de los concentrados de molibdenita de Chuquicamata suponiendo que no hay renio fuera de la molibdenita en el concentrado. Se observa que no hay relación Mo-Re debido a la gran dispersión de los valores. Se concluye que fuera de la molibdenita hay renio en otros minerales (o minerales de Re?), cuya distribución es independiente de la molibdenita, aunque podría estar relacionada con las estructuras hidrotermales tempranas.

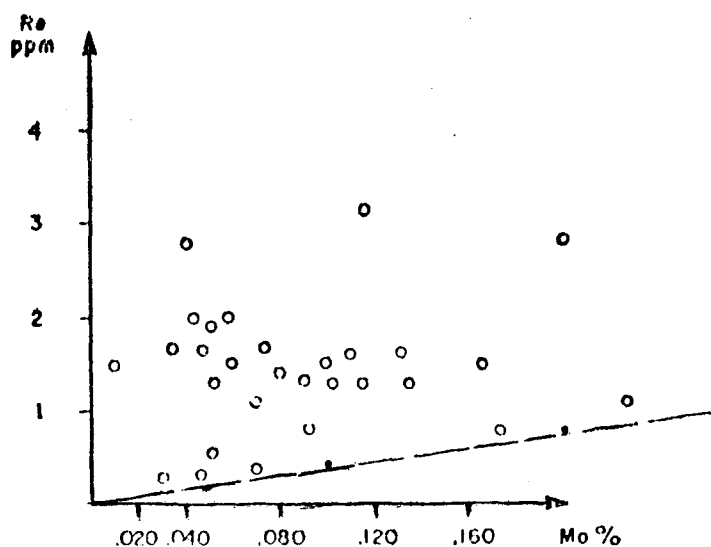


FIG. 13

Gráfico de relación entre leyes de Mo y Re. La recta trazada representa el incremento teórico de Re contenido en MoS_2 en cuyo extremo se obtendría 200 ppm Re en 100 % MoS_2 . Obsérvese que ningún valor analizado cae por debajo de esta recta, lo que significa que todas las muestras analizadas contienen Re fuera de la molibdenita

Se ha tratado de encontrar la fuente de este exceso de renio en algunos sulfuros realizando la separación de estos minerales por medios mecánicos; los análisis se hicieron también por Se, debido a la correlación Re-Se observada en el yacimiento de Kadzharan, Armenia, por Faramazyán, 1961 (MORRIS AND SHORT, *op. cit.*). Los resultados se exponen en la Tabla V.

Se observa que el contenido de Re es bastante parejo en todos los sulfuros, sin una concentración especial de ninguno, pero tampoco está ausente en ninguno de los casos. El contenido máximo se observó en una mezcla de calcopirita-covelina (4.5 ppm Re) y el mínimo en las muestras de covelina pura (1.8 ppm Re). Se concluye que el contenido máximo de mineral puro debe ser en calcopirita cosa que se ha observado en otros yacimientos del mundo.

Mineral	Número muestras	ppm Re	ppm Se
Calcosina	12	4.2	4.5
Covelina	3	1.8	3.7
Calcopirita - Covelina	7	4.5	25.9
Enargita - Luzonita	11	2.6	6.6
Pirita	2	3.8	3.0

TABLA V

Contenidos de Re y Se en los principales sulfuros de Chuquicamata

La correlación Re-Se sólo se observa en el caso de la calcopirita, que contiene la cantidad máxima de selenio y renio, pero la correlación, si existe, no es de tipo lineal como en Kadzharan. Además, se observa en Chuquicamata que la mayor cantidad de selenio sigue el curso de los minerales de cobre, concentrándose en los ánodos y posteriormente en el barro anódico.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a la Gerencia de Producción de la Compañía de Cobre Chuquicamata, S. A., su autorización para la presente publicación.

BIBLIOGRAFIA

- AMBRUS, J. (1972): *Reconocimientos y reservas a largo plazo en Chuquicamata*. Informe inédito, División Geología, Chuquicamata, 7 pp.
- BANDY, M. C. (1931): *Occurrence of Molybdenum in the Chuquicamata Ore Body*. Informe inédito, División Geología, Chuquicamata, 7 pp.
- BATEMAN, A. M. (1957): *Yacimientos Minerales de Rendimiento Económico*. Barcelona, Ed. Omega, S. A., 975 pp.
- BLOOM, H. (1966): *Geochemical Exploration as Applied to Copper Molybdenum Deposits*. In Titley, S. R. and Hicks, C. L., eds., *Geology of the Porphyry Copper Deposits*. Tucson, Univ. Arizona Press, 111-119.
- CARPENTER, R. H. (1968): *Geology and Ore Deposits of the Questa Molybdenum Mine Area, Taos County, New Mexico*. In Ridge, J. D., ed., *Ore Deposits of the United States, 1933-1967, The Graton-Sales Volume*. New York, Amer. Inst. Mining, Metallurgy and Petroleum Engineers, Inc., 1329-1350.
- CLARK, A. H. and SILLITOE, R. H. (1969): *Supergene CuMo_2S_5 ("Castaingite"), Potrerillos, Atacama Province, Chile*. Neues Jahrb. Mineral. Monatsch. (1969), 499-503.
- CREASEY, S. C. (1966): *Hydrothermal Alteration*. In Titley, S. R. and Hicks, C. L., eds., *Geology of the Porphyry Copper Deposits*. Tucson, Univ. Ariz. Press, 51-74.
- GARRELS, R. M. (1960): *Mineral Equilibria at low temperature and pressure*. New York, Harper's Geosc. Ser., 254 pp.
- JARRELL, O. W. (1937): *The Occurrence of Molybdenum in the Chuquicamata Ore Body*. Informe inédito, División Geología, Chuquicamata, 13 pp.
- (1944): *Oxidation at Chuquicamata, Chile*. Econ. Geol., 39 (4), 251.
- KELLEY, V. C. (1935): *Paragenesis of the Colorado Copper Sulphides, Cananea, Mexico*. Econ. Geol., 30, 663-688.
- KESLER, S. E. (1973): *Copper Molybdenum and Gold Abundances of Porphyry Copper Deposits*. Econ. Geol., 68, 106-112.
- LANGERFELDT, H. (1964): *Preliminary Survey of Rock Problems at Chuquicamata*. Informe Inédito, División Geología, Chuquicamata, 49 pp.
- LÓPEZ, V. M. (1939): *The Primary Mineralization at Chuquicamata, Chile, S. A.* Econ. Geol., 34, 674-711.
- LYNCH, D. W. (1966): *The Economic Geology of the Esperanza Mine and Vicinity*. In Titley, S. R. and Hicks, C. L., eds., *Geology of the Porphyry Copper Deposits*. Tucson, Univ. Arizona Press, 267-280.
- MAYMO, J. G., et al (1971): *Química y Metalurgia del Cobre*. Seminario de titulación, Univ. Técn. del Estado, Esc. Ing. Industr., Santiago de Chile, 365 pp.
- MCKINSTRY, H. E. (1948): *Mining Geology*. New York, Prentice-Hall Geol. Ser., 680 pp.
- MICHELL, W. D. (1945): *Oxidation in a Molybdenite Deposit, Nye County, Nevada*. Econ. Geol., 40 (2), 99.

- MORRIS, D. F. C. and SHORT, E. L. (1969): *Rhenium*. In Wedepohl, K. H., Handbook of Geochemistry II-1, Springer Verlag, 75-I. Berlin.
- MOVLICK, R. T. and DUREK, J. J. (1966): *The Morenci District*. In Titley, S. R. and Hicks, C. L., eds., Geology of the Porphyry Copper Deposits. Tucson, Univ. Arizona Press, 221-232.
- OLMSTEAD, H. W. and JOHNSON, D. W. (1966): *Inspiration Geology*. In Titley, S. R. and Hicks, C. L., eds., Geology of the Porphyry Copper Deposits. Tucson, Univ. Arizona Press, 143-150.
- PALACHE, C. (1935): *Lindgrenite, a New Mineral from Chuquicamata*. Amer. Mineral., 20, 484.
- PASTOR, J. (1970): *Geología de los Yacimientos Minerales de Morococha*. In 1.^{er} Congreso Latinoamericano de Geología: Geología de los Yacimientos Minerales Operados por la Cerro de Pasco Co., Lima, Perú, 60-85.
- PETERS, W. E.; JAMES, A. H. & FIELD, C. W. (1966): *Geology of the Bingham Canyon Porphyry Copper Deposit, Utah*. In Titley, S. R. and Hicks, C. L. eds., Geology of the Porphyry Copper Deposits. Tucson, Univ. Arizona Press, 165-176.
- RAMDOHR, P. (1969): *The Ore Minerals and Their Intergrowths*. Oxford, Pergamon Press (3 ed.), p. 11.
- RENO, H. T. (1970): *Rhenium*. In Mineral Facts and Problems, Bureau of Mines, U. S. Depart. Int., 361-368.
- ROBINSON, R. F. and COOK, A. (1966): *The Safford Copper Deposit, Cone Star Mining District, Graham County, Arizona*. In Titley, S. R. and Hicks, C. L., eds., Geology of the Porphyry Copper Deposits. Tucson, Univ. Arizona Press, 251-266.
- ROSE, A. W. (1970): *Zonal Relations of Wallrock Alteration and Sulphide Distribution at Porphyry Copper Deposits*. Econ. Geol., Vol. 65, 1970, pp. 920-936.
- RUIZ, E. C. (1965): *Geología y Yacimientos Metalíferos de Chile*. Inst. Inv. Geol., Santiago de Chile, 303 pp.
- SUTULOV, A. (1970): *Molybdenum and Rhenium Recovery from Porphyry Coppers*. Univ. Concepción, Chile, 259 pp.
- TITLEY, S. R. and ANTHONY, J. W. (1961): *Some Preliminary Observations on the Theoretical Geochemistry of Molybdenum under Supergene Conditions*. Arizona Geol. Soc. Digest, 4, 103-116.
- THOMAS, L. A. (1966): *Geology of the San Manuel Ore Body*. In Titley, S. R. and Hicks, C. L., eds., Geology of the Porphyry Copper Deposits. Tucson, Univ. Arizona Press, 133-142.
- TOBEY, E. F. (1971): *Preliminary Report on the Alteration and Sulphide Mineral Zoning at Chuquicamata, Chile*. Informe Inédito, División Geología, Chuquicamata, 17 pp.
- URQUETA, D. I. (1969): *Antecedentes de Alteración Hidrotermal y de Génesis del Yacimiento Cuprífero de Río Blanco*. Univ. de Chile, Fac. de Ci. Fís. Mat.; Dep. Geol.; Memoria para optar al título de Geólogo, 68 pp.
- UYTENBOGAARDT, W. and BURKE, E. A. J. (1971): *Tables for Microscopic Identification of Ore Minerals*. Amsterdam, Elsevier Publ. Co. (2 ed.), 430 pp.

- WALLACE, R. S. et al (1968): *Multiple Intrusion and Mineralization at Climax, Colorado*. In Ridge, J. D., ed., *Ore Deposits of the United States, 1933-1967*, the Graton-Sales volume. New York, Amer. Inst. of Mining, Metalurgical and Petroleum Engineers, Inc., 605-640.
- WATERMAN, G. C. (1951): *Geology of the Chuquicamata Drainage Tunnel*. Informe Inédito, Div. Geol. Chuquicamata, 73 pp.
- (1955): *Molybdenum Mineralization at Chuquicamata*. Informe Inédito, Archivo Interno División Geología, Chuquicamata, 3 p., 3 planos.
- WEISSENBORN, A. E. (1938): *Reasons for the Recent Increase in the Molybdenum Content of the Plant Head and Estimated Molybdenum Grade of Mine from Feb. 1st., 1937 to Feb. 1st., 1957*. Informe Inédito, División Geología, Chuquicamata, 17 p.

(Recibido el 15 - III - 74)