

COBALTO, NIQUEL Y ZINC EN PIRITAS Y CALCOPIRITAS DE
ALGUNOS YACIMIENTOS CUPRIFEROS EN EL NORTE DE CHILE

Hugo ALONSO CARBALLO
Departamento de Geociencias
Universidad del Norte
Casilla 1280
Antofagasta-Chile

RESUMEN

La distribución de cobalto, níquel y zinc en piritas de algunos yacimientos de cobre en el Norte de Chile permite cierta diferenciación entre ellos.

La razón Co/Ni en piritas tiende a un valor medio que en El Salvador es 4,2 veces mayor que en Chuquicamata y en éste, del mismo orden que en yacimientos, de tipo diferente, en la zona de Tocopilla, en latitud semejante.

En Chuquicamata hay correlación entre zinc y níquel en especial para calcopiritas (-0.90) no observándose en los otros yacimientos. En El Salvador la razón Co/Ni tiende a aumentar hacia el exterior de los intrusivos en contacto con el pórfido "L", principal fuente térmica en la mineralización tardía. Los más altos valores de cobalto y níquel se presentan en piritas del grupo de vetas Minita Despreciada en la zona de Tocopilla.

El cobalto y el níquel tienen igual tendencia a concentrarse según orden: pirita, calcopirita.

ABSTRACT

The distribution of cobalt, nickel and zinc in pyrites of some copper deposits in northern Chile allows for a certain degree of differentiation among them.

The Co/Ni ratio in pyrite has medium values which in the case of El Salvador are 4,2 times greater than in Chuquicamata, and in the

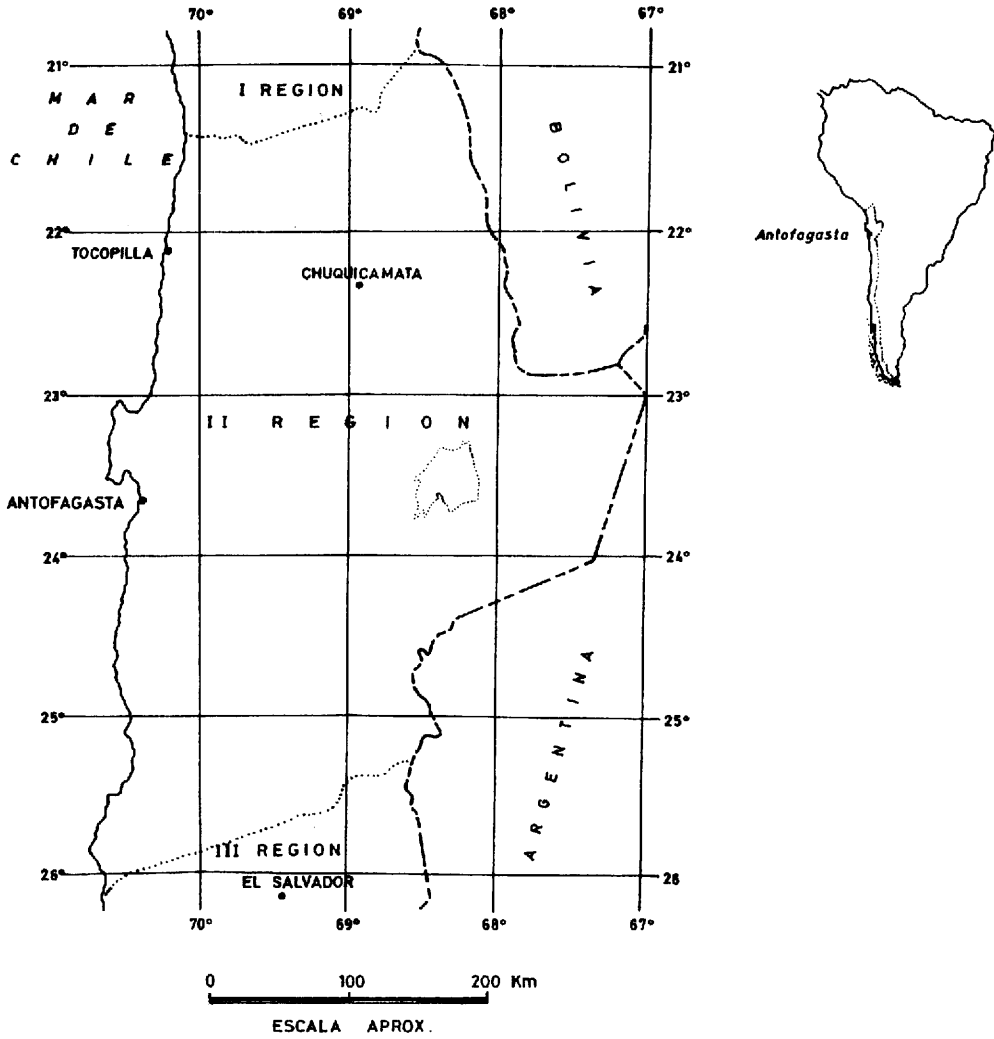


Fig. 1: MAPA DE UBICACION

latter, of the same value as in deposits, of different type, in Tocopilla zone, on a same degree of latitude.

In Chuquicamata there exists a correlation between zinc and nickel, especially in the case of calcopyrites (-0.90), this one not existing in the other deposits. In El Salvador, the Co/Ni ratio tends to increase towards the exterior of intrusives in contact with "L" porphyry, main thermic source of late mineralization. The highest volues of cobalt and nickel are present in pyrites in Minita Despreciada, a vetiform type deposit in the Tocopilla zone.

Cobalt and nickel are equally inclined to concentrate according to order: pyrite, calcopyrite.

INTRODUCCION

Las posibilidades que presenta el estudio de distribución de elementos en trazas en sulfuros han sido discutidas por Fleischer (1955). Sobre el particular, diversos trabajos referidos a condiciones naturales se han realizado en piritas, pirrotitas y calcopiritas entre otros por Auger (1941); Hegemann (1943); Hawley y Nichol (1961); Cambel y Jarovsky (1967) y Bezmen, Tikhomirova y Kosogova (1975). A ellos se unen diferentes estudios teóricos y experimentales evaluando coeficientes de partición para ciertos metales entre sulfuros y solución hidrotermal, entre sulfuros coexistentes y entre sulfuros y silicatos.

De estos trabajos es posible generalizar que hay variación en el contenido de elementos en trazas relacionable con distintos tipos de yacimientos y que el níquel y el cobalto ofrecen buenas posibilidades de diferenciación. La razón Co/Ni se ha utilizado como geotermómetro y en discusión de génesis de yacimientos. De interés igualmente, es la diferente partición de estos elementos entre distintos sulfuros de un yacimiento.

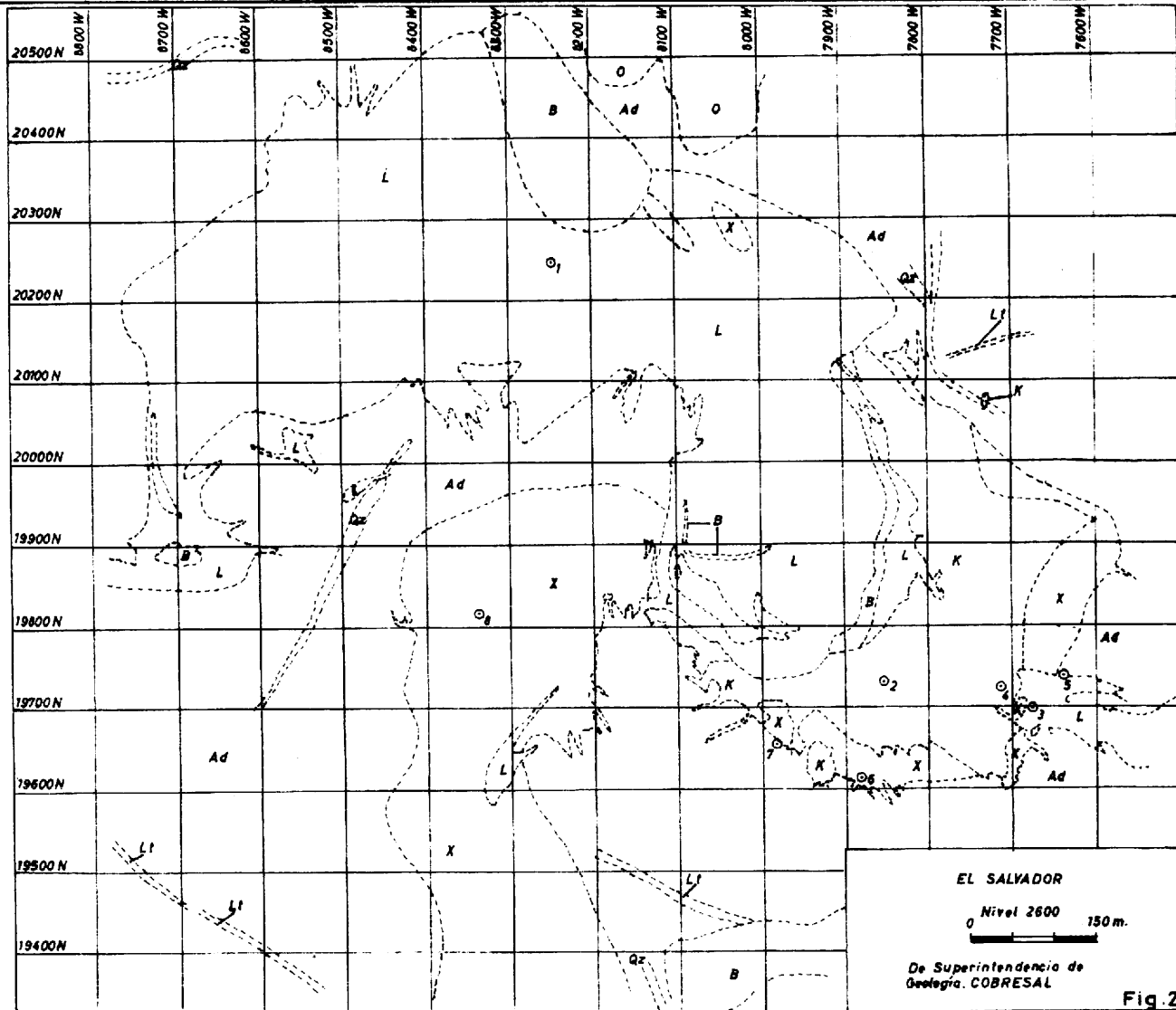
En el presente trabajo se compara el contenido de cobalto, níquel y zinc en piritas y calcopiritas en los yacimientos de cobre porfídico de Chuquicamata y El Salvador; y los de Buena Esperanza, mantiforme y Minita Despreciada, vetiforme, en la zona de Tocopilla. Estos yacimientos se relacionan genéticamente con la evolución del Geosinclinal Andino, implantándose, en distintas etapas, los dos primeros hacia el lado oriental de la cuenca y los dos últimos hacia su lado occidental, eugeo sinclinal. (Fig. 1).

METODO DE TRABAJO

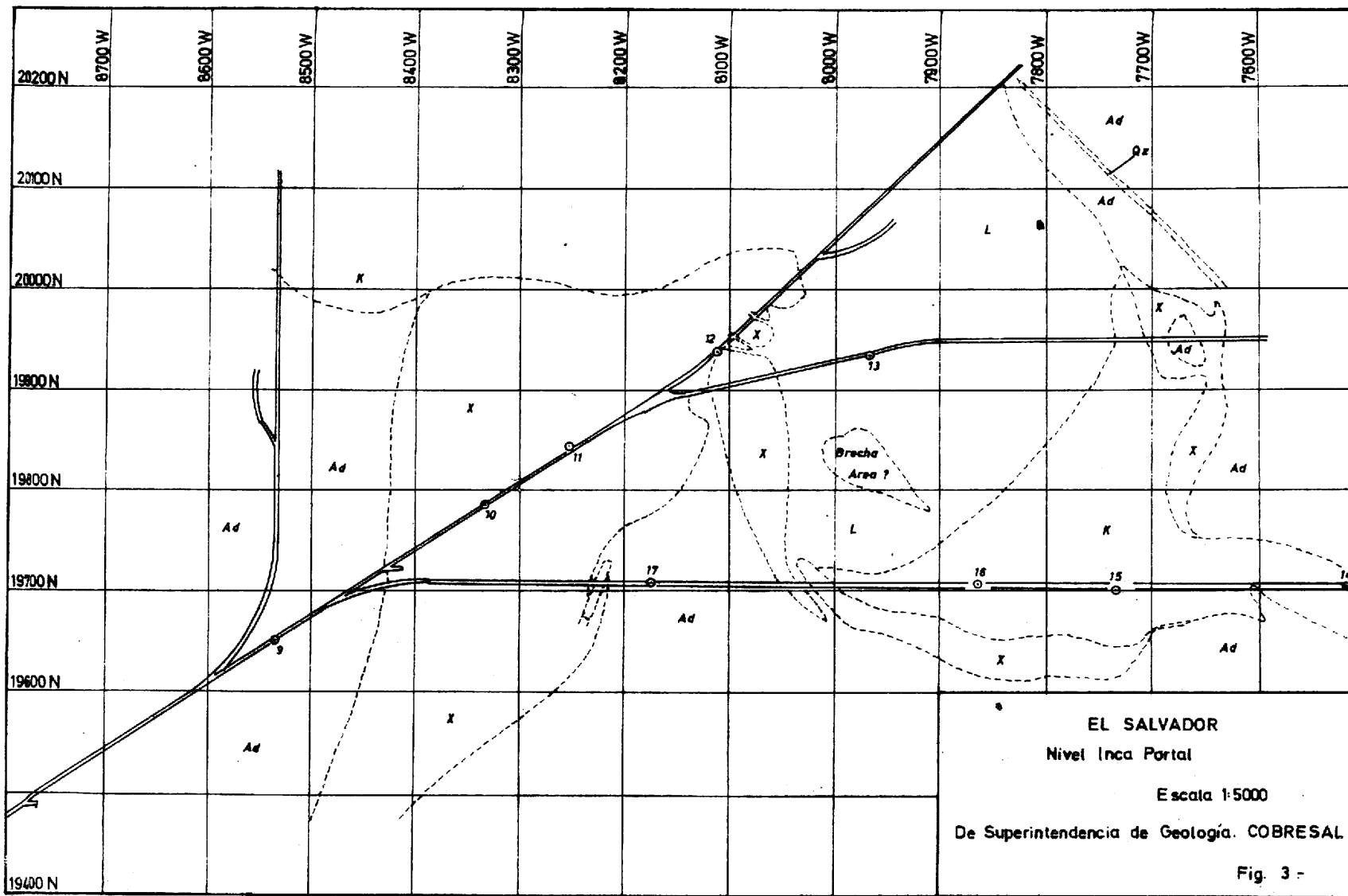
La toma de muestras se hizo en distintos niveles de trabajo de los yacimientos, de preferencia en vetas y vetillas para facilitar la separación ulterior. En El Salvador se tomó muestras en 2 niveles (Fig

LEYENDA

- L_t Lctita
- L Pírfido L
- K Pírfido K
- X Pírfido X
- Qz Pírfido cuarcífero
- Ad Andesita
- O Pírfido O
- B Brecha
-○ Muestras



J-42

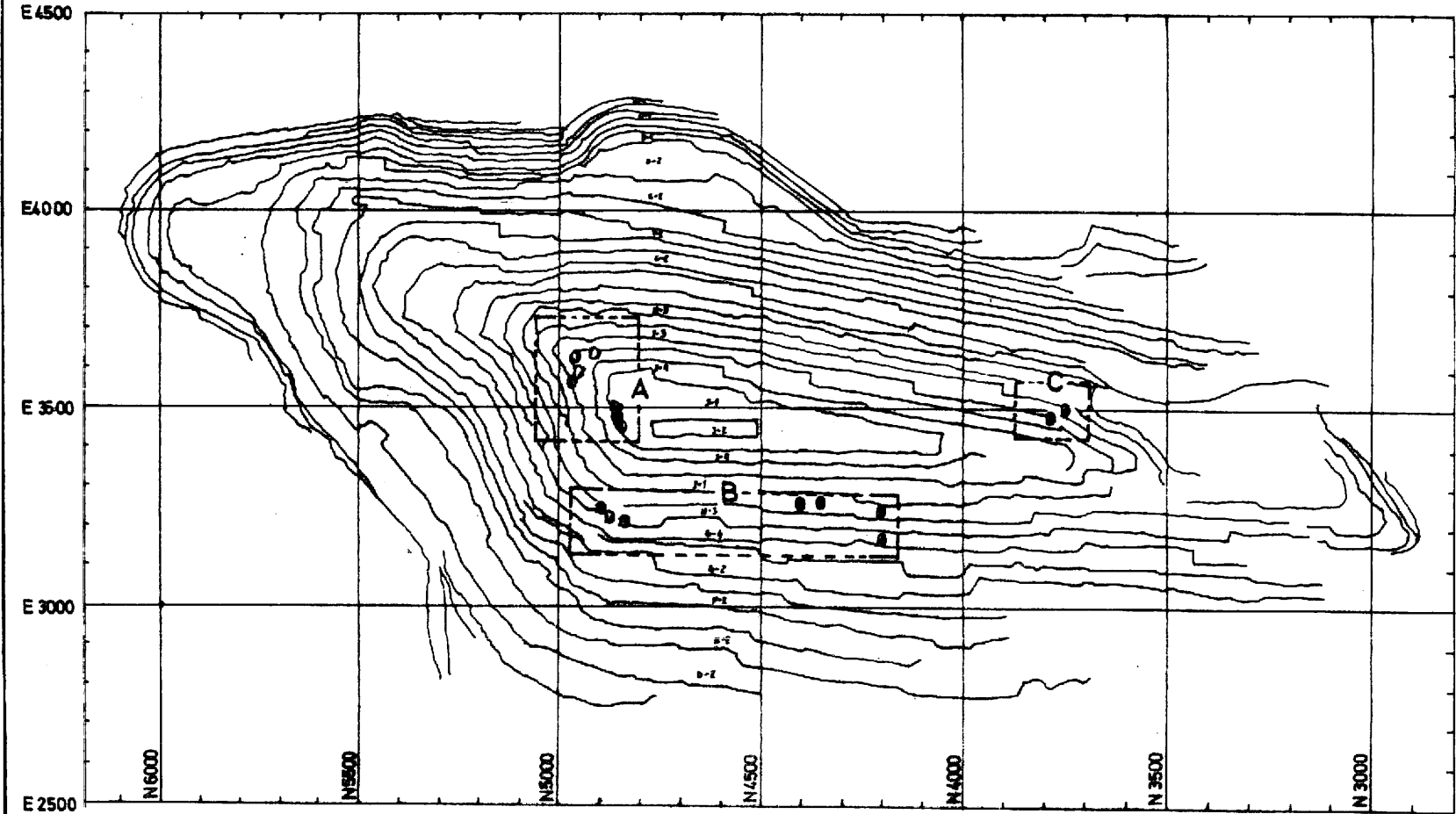


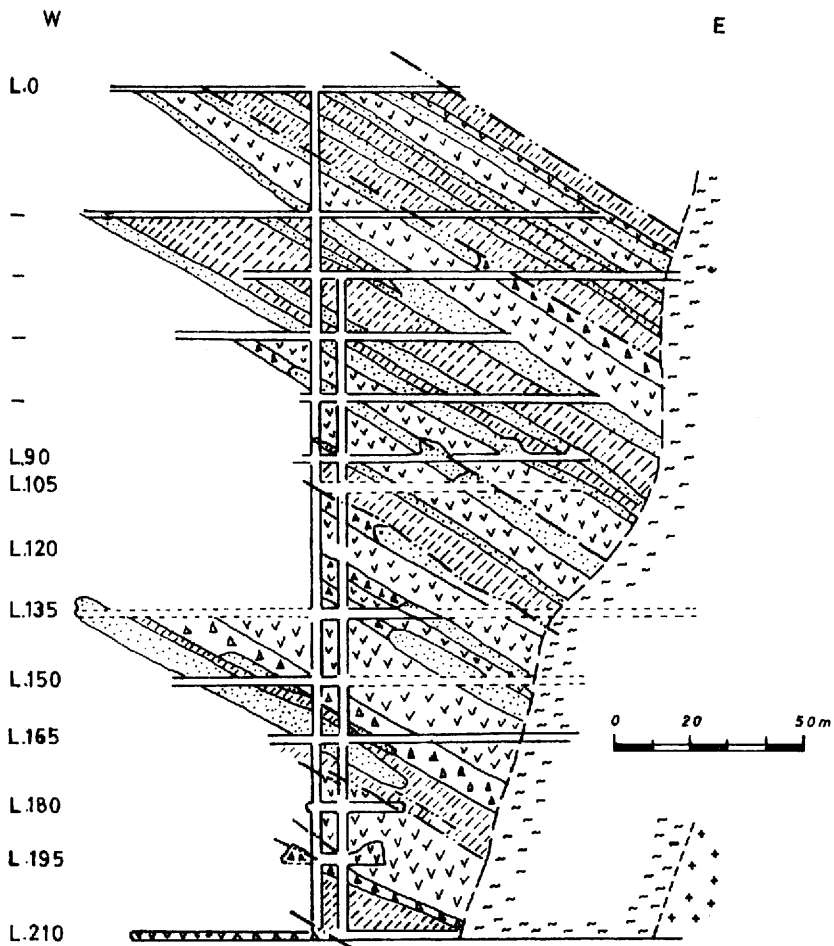
Chuquicamata Planta de la mina y ubicación de muestras (B...G)

100 0 500 m.

Sistema de coordenadas arbitrarias de COBRECHUBIL

Fig. 4 -





LEYENDA








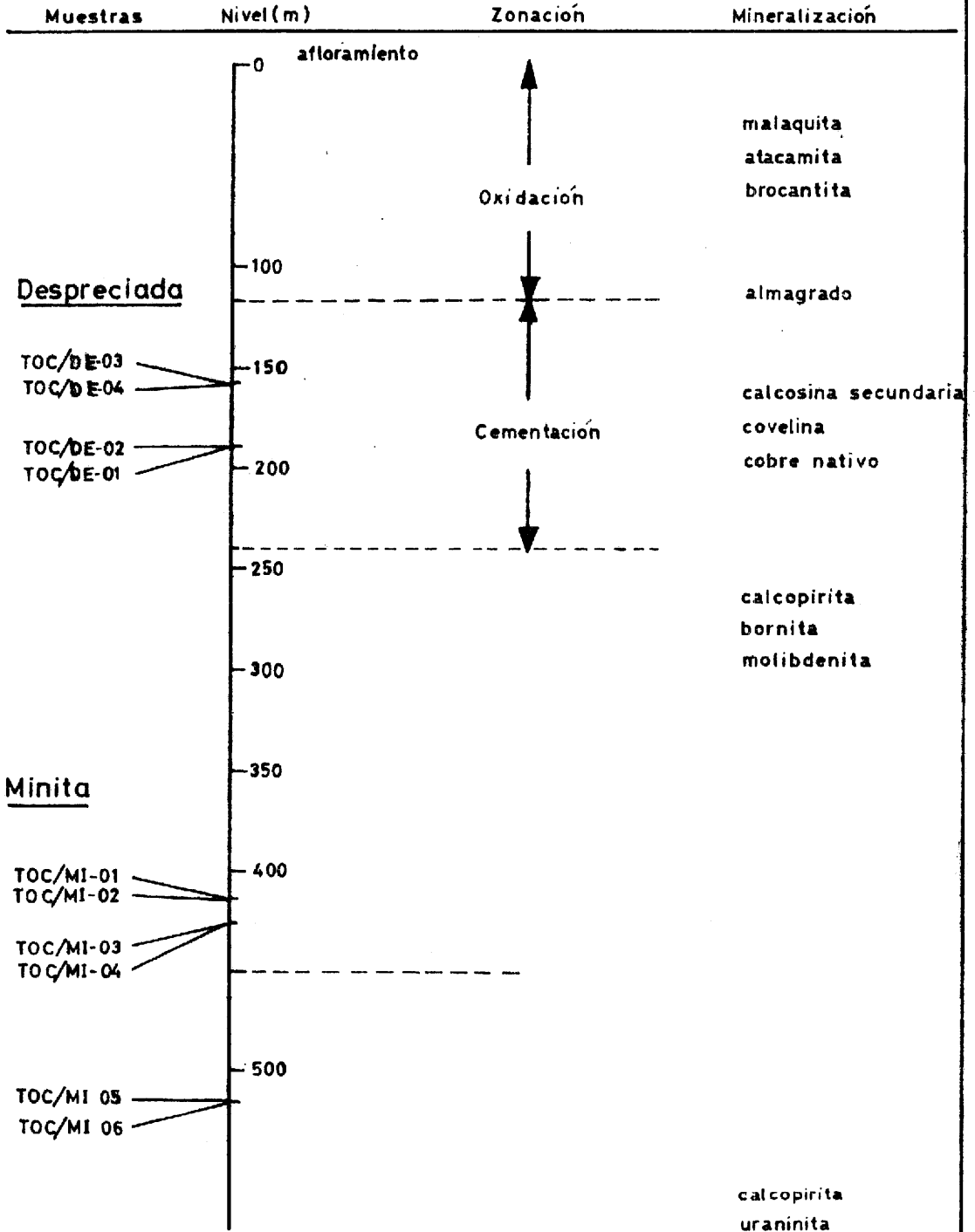
- | | | | |
|---|--------------------------------|---|-------------------|
|  | Brecha andesítica amigdaloidal |  | Diorita de augita |
|  | Andesita microporfírica |  | Diorita |
|  | Andesita porfírica |  | Falla |
|  | Mineralización de Cu |  | Contacto |

Fig. 5.- Buena Esperanza (Tocopilla). Sección de la mina y niveles muestreo

(Según R. Quezada en C. Ruiz et al., 1970)

Minita-Despreciada Fig. 6 -
Esquema de Zonación y ubicación de muestras



Zonación y mineralización basadas en Alfaro G., 1972

2 y 3), en Chuquicamata en 7 bancos (Fig. 4), en Buena Esperanza 8 niveles (Fig. 5) en Minita 3 niveles y Despreciada 2 niveles (Fig. 6).

La separación de minerales en el laboratorio se hizo principalmente por método manual bajo lupa binocular. Las muestras fueron previamente molidas en mortero de ágata para permitir liberación de granos.

Las impurezas adheridas, en especial cuarzo y silicatos, se eliminaron por ataque ácido, en cápsula de platino, con una mezcla de partes iguales de HCl (1:1) y HF, en caliente, durante 30 minutos, lavando y secando a 75°C.

Las muestras que al control de microscopio presentaban dudas sobre su pureza, fueron analizadas por difracción de rayos X.

El criterio de control de pureza significó un porcentaje de rechazo de muestras que para Buena Esperanza fué de 60% (6 rechazadas de 10 tomadas), Minita Despreciada 10% (1 de 10), Chuquicamata 20% (3 de 16) y El Salvador 5% (1 de 21).

Para el análisis químico (espectrofotometría de absorción atómica) y de rayos X se contó con las facilidades del Departamento de Geología de El Salvador.

Las muestras fueron analizadas por los elementos siguientes: cobalto, níquel, zinc, manganeso, molibdeno, cadmio, titanio y vanadio. Para estos dos últimos no hubo detección en el instrumento. Para cadmio se obtuvo respuesta sólo en 3 muestras de chuquicamata y 1 de El Salvador. Manganeso y molibdeno dieron valores erráticos no correlacionables. Sólo para los tres primeros elementos se contó con valores apropiados para una interpretación.

RESULTADOS

El contenido de cobalto, níquel y zinc en algunos sulfuros de los yacimientos estudiados se discute a continuación.

1. El Salvador

Dado que para 4 muestras (calcosina y calcopirita) las lecturas en el espectrofotómetro fueron inferiores a su sensibilidad, se analiza el comportamiento de estos elementos sólo en piritas para los niveles 2600 e Inca Portal en distintos pórfidos.

Gustavson y Hunt (1975) distinguen para este yacimiento dos etapas de mineralización: una temprana ligada al emplazamiento de los pórfidos "X" y "K" y otra tardía, asociada al pórfido "L" fuente térmica principal que influye sobre los patrones de alteración y mineralización.

lización. La variación de los contenidos en cobalto y níquel presenta, al parecer cierta relación con lo anterior.

Cobalto

En los pórfidos "X" y "K" se configura una tendencia a aumentar su contenido con la mayor distancia al contacto con el pórfido "L".

Así, para el nivel Inca Portal, en el pórfido "K" la concentración aumenta progresivamente (56 - 150 - 266 ppm) a medida de su alejamiento regular del pórfido "L" (muestras 16 - 15 - 14). En el pórfido "X" la muestra (12) en contacto con el pórfido "L" tiene 146 ppm contra 162 ppm de muestra (10) más alejada de él. Ya en el pórfido "L" mismo interesa anotar que una muestra en su centro presenta el valor más bajo de todos (9 ppm) y otra hacia su exterior, el más elevado (294 ppm).

Para el nivel 2600, en el pórfido "X" la muestra más alejada del pórfido "L" (08) tiene 231 ppm contra 171 ppm de la muestra más cercana a él (06). En el pórfido "L" las muestras ubicadas hacia los bordes del intrusivo (01 y 03) presentan valores muy semejantes (109 y 103 ppm).

Níquel

En líneas generales sigue la tendencia del cobalto aunque en forma menos marcada y en concentraciones más bajas.

Razon Co/Ni

La tendencia más definida del cobalto respecto al níquel de aumentar su concentración en las piritas de los pórfidos "X" y "K" a medida de su alejamiento del pórfido "L", condiciona la misma tendencia evolutiva de la razón Co/Ni. Así, para el nivel Inca Portal, en el pórfido "K" la razón toma con este distanciamiento valores sucesivos de 2.8, 4.0 y 7.6. En el pórfido "X", en su contacto con el "L" es de 5.6 y hacia el exterior sube a 7.2 y en el pórfido "L" es 0.5 en el centro y 5.2 hacia la periferia.

Para evaluar el comportamiento en profundidad se dispone de dos muestras en el pórfidos "X" y dos en el "K" situadas verticalmente una en el nivel 2600 y otra en el Inca Portal. Si bien la variación vertical de contenido en cobalto sigue en ambos pórfidos tendencias contrarias, el valor de la razón Co/Ni aumenta hacia abajo en ambos. En efecto, hacia profundidad, en el pórfido "X" el Co pasa de 231 a 167 ppm y la razón Co/Ni, desde 6.8 a 7.0; en el pórfido "K" el Co pasa de 25 a 58 ppm y la razón Co/Ni, desde 2.0 a 4.0.

Se configura así para la razón Co/Ni una tendencia general a aumentar su valor hacia el exterior de los distintos pórfidos y en profundidad.

Zinc

A diferencia de Chuquicamata donde presenta una cierta correlación con el níquel, no aparece en El Salvador una tendencia definida. Los valores son erráticos. Estudios de Auger (1941) y Hawley (1952) en varias minas del Canadá, no concluyen una tendencia en la variación del contenido de zinc en piritas.

2. Chuquicamata

El tipo de explotación a rajo abierto condicionó, entre otros factores, un plan de muestreo diferente a El Salvador. Las muestras se tomaron en 3 sectores de la mina:

- A. Hacia el N y NE, en bancos J-1 e I-3. Principalmente calcopiritas asociadas a covelita, exep^to una. Sólo una pirita.
- B. Según una lineación N-S en los bancos H-2, H-3 y G-4. Piritas asociadas a calcosina y covelina, exep^to dos muestras.
- C. Extremo SW, solo 1 muestra de cada una para calcosina, covelina y pirita.

Cobalto

Tiende a concentrarse, en los minerales mas enriquecidos en hierro. En piritas presenta los valores más altos (media 29,8 ppm), en cambio en calcopiritas asociada a calcosina y covelina es bajo (2 - 3 ppm). En estos últimos el contenido es también bajo (2-3 ppm).

En piritas del sector B se observa una disminución de su contenido en cobalto de norte a sur (de 43 a 3 ppm), aumentando desde este último punto a 35 ppm en la misma coordenada pero dos bancos hacia arriba.

Níquel

A igual qu el cobalto, su concentración es mayor hacia las fases ricas en hierro (piritas), pero con valores más constantes (28 - 19 ppm), no presentando la variación zonal norte-sur de ese elemento. Su contenido en calcopiritas es notoriamente superior al cobalto.

Razon Co/Ni

En piritas, la tendencia del cobalto a valores más irregulares que el níquel se refleja en fluctuaciones de la razón Co/Ni, así en el grupo B, va de 1.5 a 0.16, de norte a sur. La tendencia media de los valores en pirita es 0.83 y en calcopiritas es 0.52. No es posible proyectar una tendencia general a escala del yacimiento.

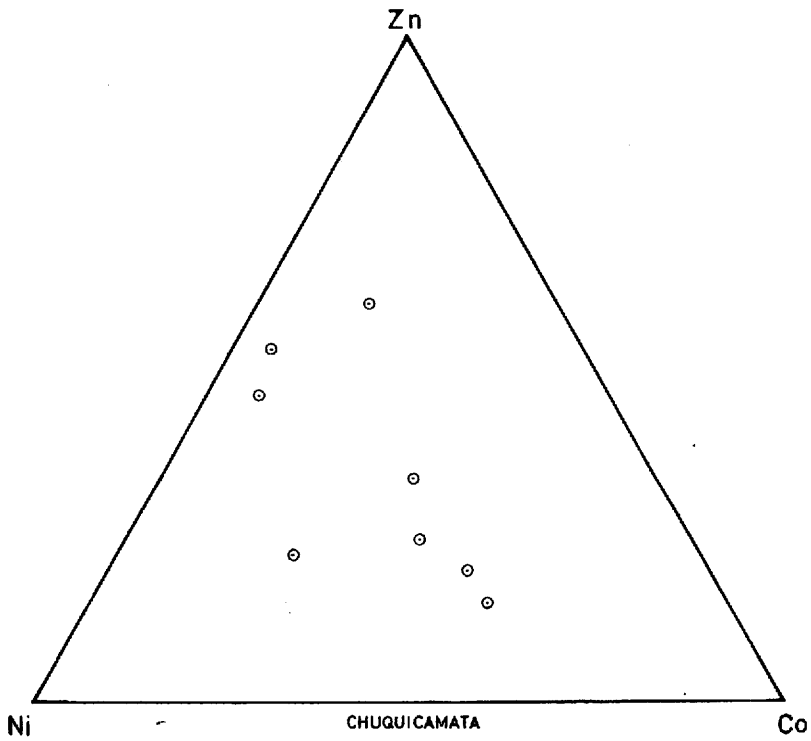
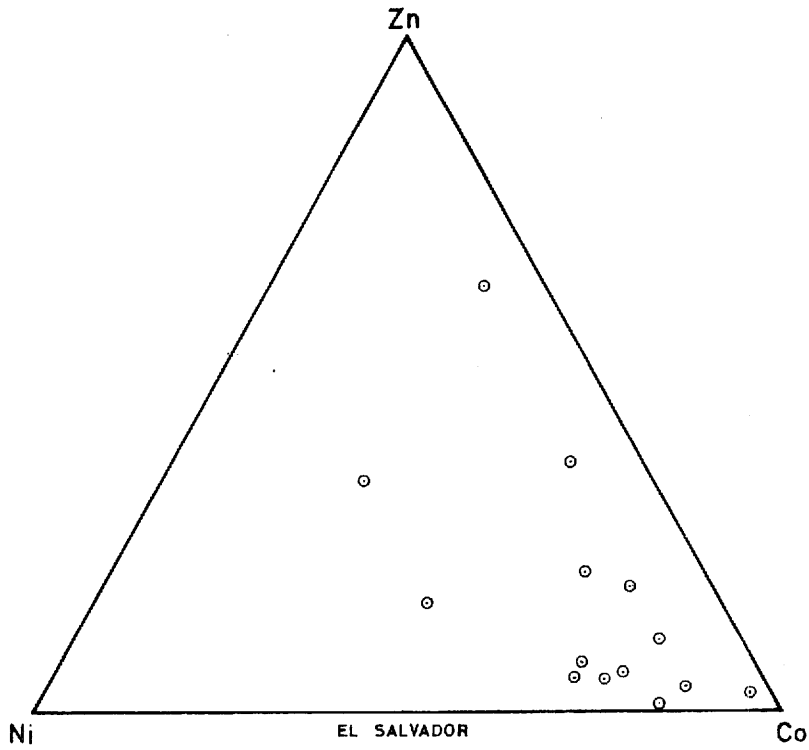


Fig. 7. RELACION Ni-Co-Zn EN PIRITAS PARA EL SALVADOR Y CHUQUICAMATA

Zinc

De interés es la correlación entre zinc y níquel. En piritas su coeficiente (+ 0.54) es el más alto respecto a otros elementos. En calcopiritas tiene un valor (- 0.90) altamente significativo. En una de las escasas muestras donde se detectó cadmio la correlación en alcopirita fué baja, pero al adicionar el contenido de cadmio al zinc el coeficiente mantiene la tendencia al valor indicado. Sería recomendable evaluar la suma de zinc y cadmio, para efectos de interpretación de resultados. Esto se explicaría por el hecho que ambos elementos forman, en solución acuosa, complejos de igual estequiometría y estabilidad (Sta. Maria, Torma y Gubeli, 1961).

3. Diagrama de relación Ni-Co-Zn en piritas para el Salvador y Chuquicamata.

En la Fig. 7 se presenta para El Salvador y Chuquicamata la abundancia relativa de cobalto, níquel y zinc en piritas usando diagramas triangulares.

Para El Salvador, los puntos tienden hacia la serie Co-Zn con preferencia hacia el cobalto. En Chuquicamata, hacia el centro con tendencia a la serie Ni, Zn.

4. Zona de Tocopilla

Aunque razones técnicas en la etapa de separación de cristales condicionaron un alto porcentaje de rechazo de muestras por motivo de pureza insuficiente, se presentan los resultados de yacimientos de esta zona a fin de tener un primer indicador para compararlas entre sí y con los pórfidos cupríferos ya vistos. Son el yacimiento de Buena Esperanza implantado en andesitas y el grupo de vetas Minita Despreciada ubicada en un intrusivo.

El contenido de cobalto y níquel presenta tendencias diferentes no sólo entre ambos tipos de yacimientos sino también entre piritas y calcopiritas.

En piritas se tiene lo siguiente:

Cobalto: En Buena Esperanza para un valor medio de 41 ppm, Minita Despreciada presenta concentraciones de 16,6 a 51,5 veces (2.113 ppm) mayores.

Níquel: Para un valor medio en Buena Esperanza de 29 ppm se tiene en Minita Despreciada contenidos entre 33,2 y 150,8 veces (4.375 ppm) más altos.

Razón Co/Ni: A pesar de algunas elevadas concentraciones y diferencias anteriores, la razón Co/Ni tiende a una cierta constancia. Así,

en Buena Esperanza es de 1,4 (máx. 1.6 mín.1.2) y Minita Despreciada es 0.64 (máx.0.48 mín.0.73). En este último, el valor de la razón tiende ligeramente a aumentar en profundidad.

En calcopiritas el contenido de cobalto y níquel es inferior al de piritas siendo los valores para níquel superiores a los de cobalto, lo que se expresa por la razón Co/Ni que tiende a 0.52.

Quizás pueda ser de interés para la discusión sobre génesis de Buena Esperanza, comparar algunos valores (ppm) de níquel y cobalto en 2 piritas y en andesitas asociadas a mineralización de sulfuros (promedios según Losert,1972): Cobalto: 41 en piritas, 35 en andesitas. Níquel: 29 en piritas, 26 en andesitas. Co/Ni: mismo valor 1,4 en piritas y andesitas.

Zinc: Su concentración es mayor hacia la calcopirita. Los valores en piritas no acusan tendencia definida.

CONCLUSIONES

1. Comparando el contenido de cobalto y níquel en piritas de los dos yacimientos de cobre porfídico, el valor medio de la razón Co/Ni disminuye hacia el Norte desde El Salvador (3,5) a Chuquicamata(0,83). En similar latitud, aunque yacimientos de tipo diferente, la razón en Chuquicamata y en los de la zona de Tocopilla (1,02) presentan tendencias semejantes.
2. En piritas y calcopiritas el cobalto tiende a decrecer según el orden: zona de Tocopilla, El Salvador, Chuquicamata. El níquel lo hace en piritas según: Minita Despreciada, El Salvador, Chuquicamata.
3. Cobalto y níquel presentan similar tendencia a concentrarse según el orden: pirita, calcopirita. Esto concuerda por lo observado en otros trabajos (Hawley y Nichol, 1961).
4. Respecto al zinc, su abundancia tiende a un orden inverso a los anteriores: calcopirita, pirita. En Chuquicamata se correlaciona con el níquel significativamente en calcopiritas (-0.9) y menos en piritas (+ 0.5); en cambio para El Salvador no hay, en piritas, tendencia definida.
5. En El Salvador, la tendencia de la razón Co/Ni en piritas de aumentar a medida de su alejamiento desde el pórfido "L", podría guardar relación con la influencia de esta intrusión tardía sobre los patrones de mineralización.

DISCUSION

Davidson (1962) analiza los valores de la razón Co/Ni en rocas ígneas, sedimentos y yacimientos minerales. En rocas ígneas a pesar que el contenido en cobalto y níquel aumenta desde ácidas a ultrabásicas, la razón Co/Ni disminuye en ese orden, en sedimentos esta razón es siempre menor a uno y para yacimientos minerales asociados a intrusiones graníticas es mayor a la unidad. De ello este autor sugiere el uso de la razón Co/Ni para diferenciar genéticamente yacimientos sedimentarios de magnáticos e hidrotermales según el valor inferior o superior a uno que ella presente. Esta proposición estaría apoyada por los datos que Hawley y Nichol dan para la razón Co/Ni en piritas de varios yacimientos, entre ellos cobre de origen hidrotermal.

Sin embargo Loftus-Hill y Salomon (1967) sugieren un especial cuidado al aplicar el criterio de Davidson ya que, por ejemplo, el volcanismo que entre a una cuenca sedimentaria podría alterar el contenido en elementos en trazas. Así, sería peligroso seguir esa idea y proponer como hidrotermales los yacimientos tipo copper-belt de Zambia cuando las evidencias de terreno avalan un origen sedimentario. Del mismo modo, dado que la razón Co/Ni en piritas de Chuquicamata tiende a ser inferior a uno (0.83) a diferencia de El Salvador (3,4), la aplicación de ese criterio diferenciador no es recomendable en este caso.

En un primer intento de aportar algunos elementos de discusión sobre el significado de la diferencia de los valores de la razón Co/Ni entre los yacimientos de El Salvador y los ubicados más al Norte en similar latitud, Chuquicamata y zona de Tocopilla, puede proponerse que los menores valores de la razón en estos últimos sugieren un sustrato más enriquecido, proporcionalmente, en níquel, respecto a El Salvador. Esto podría suponer una cierta influencia de este elemento sobre el equilibrio de distribución de otros cationes como sugeriría su correlación con el zinc en Chuquicamata.

Respecto a esta correlación, un análisis preliminar explicaría los altos valores de zinc en calcopirita por la similar estabilidad de los complejos covalentes del cobre y zinc en el fluido mineralizador. Los complejos de níquel y hierro presentan, a su vez, valores muy semejantes entre sí (Barnes, 1962). Esto concuerda con la tendencia del zinc a concentrarse hacia la fase sulfurada rica en cobre (calcopirita) y del níquel hacia la rica en hierro (pirita), explicándose así la correlación negativa de zinc y níquel en calcopiritas de Chuquicamata. Ello supone para ambos elementos una concentración relativa suficiente como para influir en las condiciones de equilibrio en el fluido mineralizador. Respecto al níquel, se la ha discutido anteriormente. En relación a la concentración del zinc cabe señalar que en Chuquicamata los valores más altos se encuentran en calcopiritas del grupo A (Fig. 4), hacia el norte del yacimiento, lo que concuerda con la mayor mineralización de zinc (en especial blenda) ubicada en ese sec-

tor (Orlando Alvarez, com.pers.,1979).

AGRADECIMIENTOS

CODELCO Chile-División El Salvador (Superintendencia de Geología, D.Alvaro Tobar y staff de geólogos) y División Chuquicamata (geólogo Jefe D.José Ambrus y staff de geólogos). Compañía Minera de Tocopilla (geólogo D. Marcial Maturana).

REFERENCIAS

- Auger, P.,(1941). Zoning and district variations of the minor elements in elements in pyrite of Canadian gold deposits. *Eco. Geol.* 36. p. 401-423.
- Barnes,H.L. (1962). Mechanism of mineral zoning. *Eco.Geol.*57, 30-37.
- Bezmen, Tikhomirova y Kosogova (1975). Pyrite-Pyrrhotite geothermometer: Partition of Nickel and Cobalt. *Geoq. Inter.* V.12, N°3, p. 45-59.
- Cambell,B., y Jarkovsky (1967). Geochemie der pyrite einiger lagerstätten der Tschechoslowakei. Slovenska akademia Bratislava.
- Davidson,C.F. (1962). On the cobalt: nickel ratio in ore deposits. *Min. Mag.*, Vol.106, N°2, 78-85.
- Fleisher,M., (1955). Minor elements in some sulphide minerals. *Econ.Geol.* 50th Anniv Vol., p.970-1024.
- Hegemann,F., (1943). Die geschemische Bedent ung von Kobalt und Nickel im Pyrit, *Reitschr. angeun Mineral.*,V.4. p. 122-239.
- Hawley,J., and Nichol,I., (1961). Trace elements in pyrite, pyrrhotite and chalcopyrite of different ores. *Eco.Geol.* 36, p. 467-487.
- Laftus-Hills,G. y Salomon,M. (1967). Cobalt, nickel and selenium in sulphides as indicators of ore genesis. *Mine.Depos.* 2, 228-247.
- Losert,J.,(1972). Genesis of copper mineralizations and associated alterations in the jurassic volcanic rocks of the Buena Esperanza mining are. Coloquio sobre fenómenos de alteración y metamorfismo en rocas volcánicas e intrusivas. Depto. Geología, Univ. de Chile.
- Ste.Marie,J., Torma,E., Gubeli,A., (1964). The stability of thiocomplexes and solubility products of metal sulfides. *Can.J.Chem* 42.-

TABLA 1

El Salvador - Co, Ni, Zn en piritas (ppm)

Ubicación según Fig. 2 y 3

Pórfido "X"

Nivel Muestra	2600 06	2600 08	Portal 12	Portal 11	Portal 10
Co	171	231	146	1550(*)	162
Ni	42	34	27	46	23
Co/Ni	4,1	6,8	5,6	33,5	7,0
Zn	14	60	103	48	22

Pórfido "K"

Nivel Muestra	2600 02	Portal 16	Portal 15	Portal 14
Co	25	58	150	263
Ni	21	21	38	34
Co/Ni	1,2	2,8	4,0	7,6
Zn	9	4	51	11

Pórfido "L"

Nivel Muestra	2600 19	2600 01	2600 03	Portal 13	Portal 18
Co	100	109	103	9	294
Ni	28	36	28	18	56
Co/Ni	3,6	3,1	3,7	0,5	5,2
Zn	7	11	225	40	4

(*) Valor 5,8 veces la desviación standard para el yacimiento: no considerado.

Las muestras en nivel Inca Portal de Pórfidos "X" y "K", ordenadas de izquierda a derecha según alejamiento de pórfido "L".

TABLA 2
 Chuquicamata- Co, Ni, Zn en distintos sulfuros (ppm)
 Ubicación según Fig. 4

Grupo A

Banco	J-1	J-1	J-1	I-3	I-3	I-3
Muestra	09	10	10	11	12	13
Sulfuros	Cp(Cv)	Cp	Cv	Cp(Cv)	Cp	Pi
Co	2	3	3	2	18	31
Ni	14	11	6	12	12	70
Co/Ni	0,14	0,27	0,50	0,17	1,50	0,44
Zn	46	113	64	126	100	28

Grupo B

Banco	H-2	H-2	H-3	H-3	H-3	H-3	G-4
Muestra	16	15	06	07	05	05	04
Sulfuro	Pi(Cv)	Pi	Pi(Cs)	Pi(Cs)	Pi(Cs)	Cs	Pi
Co	41	24	23	3	3	3	35
Ni	28	23	21	21	19	3	21
Co/Ni	1,50	1,04	1,10	0,14	0,16	1,00	1,67
Zn	18	24	14	20	24	39	10

Grupo C

Banco	I-1	I-2	I-2
Muestra	02	01	01
Sulfuro	Cs	Cu	Py
Co	10	2	25
Ni	4	3	41
Co/Ni	2,50	0,67	0,61
Zn	64	26	98

Pi : pirita
 Cs : calcosina
 Cp(Cv): calcopirita asociada a covelina