

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**CARACTERIZAÇÃO E CORRELAÇÃO DE  
INCLUSÕES SÓLIDAS EM PIRITA COM  
ALTERAÇÕES HIDROTERMAIS NO PÓRFIRO  
DE COBRE DE CUAJONE - PERÚ**

**Carmen Juli Sucauca Goyzueta**

Orientador: Prof. Dr. Silvio Roberto Farias Vlach

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**  
Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia

São Paulo  
2008

# Resumo

A mina Cuajone é uma jazida de tipo pórfiro de cobre (porphyry copper), localizada na Província Cuprífera do Pacífico, nos flancos ocidentais da Cadeia Andina, no estado de Moquegua, sul do Perú, em coordenadas 17° 02'(S) e 70° 42'(W) e altitudes entre 3100 e 3830 m. A região é caracterizada pela ocorrência, na base, de derrames vulcânicos (andesitos e riolitos) cretácicos do Grupo Toquepala, que são invadidos por um complexo intrusivo (quartzo monzonitos - quartzo latitos) associado à mineralização. Fluxos vulcânicos mais recentes, compostos principalmente por traquitos, tufos e aglomerados traquíticos e conglomerados riolíticos das Formações Huaylillas e Chuncatala recobrem todo o conjunto.

A análise petrográfica de 77 amostras representativas de 22 testemunhos de furos de sondagem distribuídos em três perfis da jazida de Cuajone permitiu a caracterização das seguintes rochas: andesitos, riolitos, quartzo latitos, latitos, micro-granodioritos porfiríticos, micro-tonalitos porfiríticos, pórfiros-I (micro quartzo monzonitos - micro monzogranitos (?)), pórfiros-II (micro tonalitos - micro leucoquartzo dioritos (?)) e micro-brechas. Estas rochas encontram-se afetadas por alterações hidrotermais em graus variáveis, identificando-se oito tipos ou combinações de tipos principais: potássica, potássica-propílica, propílica-potássica, potássica-propílica/fílica, propílica, propílica-fílica, fílica-propílica e fílica.

O exame microscópico em detalhe sob luz refletida das fases sulfetadas demonstrou que a pirita (py), o sulfeto mais abundante, apresenta freqüentemente inclusões diminutas de calcopirita, cp, ( $X0,0$  e  $0,X \mu\text{m}$ ), quase sempre acompanhada de pirrotita (po), cubanita (cb) e mackinawita (mck), que aparecem formando intercrescimentos típicos. Estas inclusões apresentam formas arredondadas, ovais ou mesmo idiomórficas que, devido às suas dimensões, quase sempre não são reconhecidas em exames convencionais ao microscópio.

Os intercrescimentos identificados foram classificados de acordo com a sua morfologia, utilizando-se para tanto de nomenclatura específica, e suas abundâncias relativas. Os resultados mostram que os mais abundantes são: tipo cp/po:1b (calcopirita + pirrotita, morfologia de tipo 1b) e py/po:1e na zona de alteração potássica, py/po:1e e cp/mck:4f nas zonas potássica-propílica e propílica-potássica, cp/mck:4f e py/po:1e na zona propílica e cp/po:1b e cp/mck:4f nas zonas de alteração potássica-propílica/fílica, propílica-fílica, fílica-propílica e zona de alteração fílica.

A análise de distribuição das inclusões/intercrescimentos indica que a sua mineralogia pode

ser correlacionada com a tipologia da alteração hidrotermal, particularmente quando se consideram as frequências e/ou abundâncias relativas. Assim, observa-se que a pirrotita ocorre em todos os tipos de alteração, porém sua frequência é notadamente superior nas amostras com alteração potássica. A cubanita, ainda que seja pouco abundante, é frequente nas zonas onde há contribuição da alteração fílica. Apesar de ser encontrada também nas zonas potássica-propílica e propílica-potássica, a sua frequência é praticamente insignificante quando comparada com a das demais fases encontradas, enquanto a mackinawita apresenta frequência significativamente superior nas rochas afetadas pela alteração propílica. A tipologia e a distribuição das inclusões/intercrescimentos, aliadas às informações experimentais disponíveis para o diagrama de fases Cu-Fe-S, são compatíveis com temperaturas entre ca. 180 e 500 °C para a origem da mineralização de Cu (calcopirita, cubanita).

# Abstract

The Cuajone mine is a porphyritic copper deposit (porphyry copper), located in the Pacific Copper Province, eastern flanks of the Andean Cordillera, state of Moquegua, south of Peru, with geographic coordinates  $17^{\circ} 02' (S)$  and  $70^{\circ} 42' (W)$  and altitudes between 3100 and 3830 m. The region is characterized from base to top by cretaceous volcanics (andesites and rhyolites) from Toquepala Group, which are invaded by a intrusive complex (quartz monzonites-quartz latites) associated to the ore deposits. Covering these units there are more recent volcanic flows composed mainly by trachyte, trachytic tuff, rhyolitic conglomerates and trachytic agglomerate from Huaylillas and Chuncatala Formations.

Petrographic analysis of 77 samples representing 22 drilling cores distributed in three profiles of Cuajone Mine allowed the identification of the following lithotypes: andesite, rhyolite, quartz latite, latite, porphyritic micro-granodiorite, porphyritic micro-tonalite, porphyry-I (micro quartz monzonites-monzogranites (?)), porphyry-II (micro tonalites-micro leucoquartz diorites (?)) and micro-breccias. These rocks are affected by variable degrees of hydrothermal alteration with predominance of eight types or combinations of the following main types: potassic, potassic-propylitic, propylitic-potassic, potassic-propylitic/phylic, propylic, propylitic-phylic, phylic and propylitic-phylic.

Detailed microscopic investigation under reflected light revealed that among the sulphide phases, pyrite (py) is the most abundant, with frequent chalcopyrite (cp) tiny inclusions ( $X_0$ , 0 and 0,  $X \mu m$ ), almost always accompanied by pirrotite (po), cubanite (cb) and mackinawite (mck), occurring as typical intergrowths. These inclusions show round to oval or idiomorphic shapes and are commonly overlooked during conventional microscopic analyses due to their small dimensions.

The intergrowths identified during petrographic analysis were classified according to their morphology, using specific nomenclature and relative abundances. The results show that the most abundant types are: cp/po:1b (chalcopyrite + pirrotite, morphology type 1b) and py/po:1e in the potassic alteration zone, py/po:1e and cp/mck:4f in areas of potassic-propylitic and propylitic-potassic alteration, cp/mck:4f and py/po:1e in the propylitic zone and cp/po:1b and cp/mck:4f in potassic-propylic/phylic alteration zones; propylitic-phylic, phylic-propylitic and phylic zones.

The distribution pattern of inclusions/intergrowths indicates that their mineralogy can be

correlated with the type of hydrothermal alteration. This is particularly evident when considering frequency and/or relative abundance. Thus, pyrrhotite occurs in all types of alteration, although its frequency is especially higher in samples with potassic alteration. Cubanite is more characteristic in the potassic-propylitic and propylitic-potassic zones, while mackinawite is significantly more frequent in rocks affected by propylitic alteration.

The type and distribution of inclusions/intergrowths, allied to current experimental results for the Cu-Fe-S system, are compatible with temperatures between ca. 180 and 500 ° C for the genesis of the studied copper deposits (chalcopyrite, cubanite).

### 8.3 Conclusões e recomendações

O estudo petrográfico efetuado de 77 amostras de 22 furos de sondagem distribuídas em três perfis da jazida permitiu caracterizar os seguintes tipos de rochas: andesitos, riolitos, quartzo latitos, andesito-II, latitos, micro-granodioritos porfiríticos, micro-tonalitos porfiríticos, Pórfiros I (micro quartzo monzonitos - micro monzogranitos (?)), Pórfiro II (micro tonalitos - micro leucoquartzo dioritos (?)) e micro-brechas.

A mineralogia de alteração hidrotermal permitiu a identificação de oito tipos principais de alteração: potássica, potássica-propílica, propílica-potássica, potássica-propílica/fílica, propílica, propílica-fílica, fílica-propílica e fílica. A maioria dos tipos reconhecidos representa, em realidade, combinações entre os padrões clássicos definidos na literatura.

Entre as rochas identificadas, os andesitos são os mais abundantes. Apresentam alterações potássicas, propílicas e silicificação, com frequência combinadas entre si (alterações potássica-propílica, propílica-potássica e propílica combinada com silicificação). Riolitos aparecem apenas na parte W da jazida do perfil 3 e correspondem as rochas mais intensamente alteradas, tipicamente apresentam apenas a alteração fílica. Quartzo latitos, aparecem em todos os perfis e são caracterizadas por alteração propílica fraca, as vezes do tipo carbonatização e sericitização. Latitos e andesitos-II encontrados nos perfis 1 e 3, apresentam alterações fracas a moderadas de tipo propílica-potássica e potássica-propílica, respectivamente.

Micro-granodioritos, encontrados nos perfis 2 e 3, apresentam alteração propílica-potássica fraca a incipiente. No perfil 2 (centro da jazida) esta rocha passa para micro-tonalitos afetados variavelmente pelas alterações fílica-propílica, propílica-fílica e fílica. Variedade de micro-tonalitos porfiríticos que aparecem no perfil 3, estão fraca a incipientemente alterados de forma propílica-potássica.

Os pórfiros I (micro monzonitos-micro monzogranitos, perfil 3) apresentam dois tipos de alterações principais: propílica-potássica e potássica-propílica/silicificação, ambas de fracas a incipientes, enquanto os pórfiros II (micro tonalitos - micro leuco quartzo dioritos, dominantes) apresentam alterações mais variadas, desde potássica-propílica incipiente a fraca, potássica-propílica/fílica incipiente, silicificação-propílica moderada, propílica-fílica moderada a fraca e fílica-propílica fraca a moderada. Por último, micro brecha aflora no perfil 2 e apresenta alteração propílica moderada a fraca.

Os estudos ao microscópio sob luz refletida e de química mineral confirmaram a presença de inclusões de calcopirita em cristais de pirita na jazida de Cu de tipo pórfiro de Cuajone. Estas inclusões se associam com pirrotita, cubanita e mackinawita, com as quais formam intercrescimentos típicos. Estes estudos mostraram que é possível estabelecer correlações entre a mineralogia que aparece em inclusões/intercrescimentos com os padrões de alteração hidrotermal, particularmente quando se consideram suas frequências e/ou abundâncias relativas, observando-se especialmente que:

- pirrotita está presente em todos os tipos de alteração hidrotermal estudados porém é sempre mais freqüente nos casos em que a alteração potássica está presente;
- cubanita, ainda que seja pouco abundante, é freqüente nas zonas onde há contribuição da alteração fílica. Apesar de ser encontrada também nas zonas potássica-propílica e propílica-potássica, a sua freqüência é praticamente insignificante quando comparada com a das demais fases encontradas;
- mackinawita, está mais claramente relacionada com zona de alteração propílica. Merece ser observado que este mineral também ocorre na zona fílica, mas suspeita-se, tendo em vista a distribuição das alterações, que a sua presença neste caso represente resquícios de um evento pretérito de alteração propílica. Estudos mais detalhados são necessários para resolver esta questão.

Os minerais estudados (pirita, calcopirita, pirrotita, cubanita e mackinawita) ocorrem em intercrescimentos e, no caso, da cubanita em geral associados a processos de exsolução sólida. Os resultados obtidos permitiram definir padrões de zonamento na distribuição destes minerais relacionados aos tipos de alterações hidrotermais predominantes. As análises dos dados à luz das informações extraídas de diagramas de fase permitem concluir que as temperaturas de formação de pirrotita, cubanita e mackinawita foram predominantemente inferiores a 500, 200 e 180 °C, respectivamente. Assim, a origem da mineralização de Cu (calcopirita e cubanita) está relacionada a temperaturas entre 500 e 200 °C.

Nos perfis elaborados ainda não é observado o controle mineralógico esperado relacionado à profundidade da jazida, devido à irregularidade na distribuição das alterações. Estudos adicionais são necessários para verificar a distribuição da pirrotita, cubanita e mackinawita em zonas profundas, intermediárias e periféricas respectivamente.

Os quatro tipos de intercrescimentos entre fases sulfetadas mais freqüentes encontrados na Jazida de Cuajone são: py/po:1e, cp/mck:4f, cp/po:1b e cp/mck/1b, no entanto que os intercrescimentos comuns quando comparados com as jazidas de Cerro Verde, Toromcho e Quellaveco são: cp/cmck:1e, cp/cb:1a e cp/cb:3a. Os intercrescimentos mais freqüentes na zona de alteração potássica são cp/po:1b e py/po:1e, enquanto que, na zona potássica-propílica são py/po:1e e cp/mck:4f, na alteração propílica-potássica py/po:1e e cp/mck:4f, na zona propílica cp/mck:4f e py/po:1e, na zona potássica-propílica, fílica cp/po:1b e cp/mck:4f, na zona propílica-fílica cp/po:1b e cp/mck:4f, na zona propílica-fílica cp/po:1b e cp/mck:4f e, finalmente, na alteração fílica cp/po:1b e cp/mck:4f.

O quimismo das fases sulfetadas é muito similar a composição ideal esperada. Entre os elementos traços identificados significativamente nas análises de algumas amostras, merecem ser destacados Cu, Au e Ni em pirita; Zn e Au em calcopirita; Zn e Ag e Au na cubanita; Cu, Zn e Au em pirrotita e em mackinawita Cu, Ni e Zn, Au e Ag.

A ocorrência de calcopirita, pirrotita e, particularmente cubanita e mackinawita como inclusões e/ou intercrescimentos muito diminutos faz com que passem despercebidas na maioria dos estudos rotineiros ao microscópio sob luz refletida. Recomenda-se examinar as amostras de jazidas de tipo Cu porfirítico e similares em detalhe e sob ampliações elevadas para verificar a presença destas fases, cujas associações e distribuições podem se converter em informações muito úteis para a prospecção.

Trabalhos futuros recomendados para a melhor caracterização e compreensão da mineralogia e evolução da jazida de Cuajone, incluem (a) análises químicas em rocha total e pontuais nas fases minerais primárias e de alteração hidrotermal e (b) análises de catodoluminescência e/ou difratometria de raios X para contrastar fases primárias e secundárias de difícil separação ao microscópio comum (*e.g.*, quartzo, feldspatos alcalinos).



# Referências Bibliográficas

- AGUILAR, O.; KIHLEN, A. & CASTILLA, B. (1974). Los pórfidos de cobre peruanos del Perú. Em: *Congreso Peruano Geológico*, p. 58. Lima - Perú.
- AMCOFF, Ö. L. (1981). Heating experiments of chalcopirite - pirrotite ores: studies on the stability of the intermediate solid solution. *N.Jb.Mineral. Mh*, **H12**, pp. 553–568.
- AMSTUTZ, G. C. (1971). *Glossary of Geology*. Stuttgart.
- ANTHONY, J. W.; BIDEAUX, R. A.; BLADH, K. W. & NICHOLS, M. C. (1990). *Handbook of Mineralogy*. Mineral Data Publishing. Tucson-Arizona.
- AUGUSTITHIS, S. S. (1995). *Atlas of the textural patterns of ore minerals and metallogenic processes*. Berlin, New York.
- BARÚA, V. (1961). Reconocimiento geológico zona de Tacna y Moquegua. Em: *Cong.Nac. Geología Soc. Geol.Perú*, volume 2, pp. 35–59.
- BARTHOLOMÉ, P. (1958). On the paragenesis of copper ores. *Studia Universitatis Lovanium, Leopoldville*, **4**, pp. 1–31.
- BARTON, B. P. JR. (1973). Solid solution in the system Cu-Fe-S. Part I: The Cu-S and Cu-Fe-S joins. *Economic Geology*, **68**, pp. 455–465.
- BASTIN, E. S.; GRATON, L. C.; LINDGREN, W.; NEWHOUSE, W. H.; SCHWARTZ, G. M. & N., SHORT M. (1931). Criteria of age relations of minerals with especial reference to polished sections of ores. *Economic Geology*, **36**, pp. 562–610.
- BASTIN, G. F. (1984). An iterative procedure for the correction of secondary fluorescence effects in electron-probe microanalysis near phase boundaries. *Spectrochimica Acta*, **39B(12)**, pp. 1517–1522.
- BEANE, R.E. & TITLEY, S.R. (1981). Porphyry Copper Deposits Part II. Hydrothermal Alteration and Mineralization. *Economic Geology*, in **75th Anniversary**, pp. 235–269.
- BECKINSALE, R. D.; SÁNCHEZ-FERNANDEZ, A. W.; BROOK, M.; COBBING, E. J.; TAYLOR, W. P. & MOORE, N. D. (1985). *Magmatism at a plate edge: The Peruvian Andes*. capitulo Rb-Sr whole-rock isochron and K-Ar age determinations for the Coastal batholith of Perú, pp. 177–202. Glasgow, New York, Halsted.

- BELLIDO, E. (1979). Geología del Cuadrángulo de Moquegua. Numero 15 em serie A, p. 78. Carta geológica nacional - INGEMMET.
- BELLIDO, E. & GUEVARA, C. (1963). Geología de los cuadrángulos de Punta de Bombom y Cledesí. 2 (5), p. 92. Comisión de la carta geológica nacional del Perú.
- BELLIDO, E. & LANDA, C. (1965). Mapa Geológico del cuadrángulo de Moquegua (1:100000). Comision de la carta geológica nacional, Lima - Perú.
- BELLÓN, M. & LEFEVRE, C. (1976). Données geochronométriques sur le volcanisme andin dans le sud du Pérou. *Acad. Sci. Paris Comptes Rendus*, **283**, pp. 1–4.
- BLANCHART, R. (1968). Interpretation of leached outcrops. 66, p. 196. Nevada Bureau of Mines.
- BORCHERT, H. (1934). Uber entmischungen im system Cu-Fe-S und Bedeutung as geologisches thermometer. *Chemie d. Erde*, **9**, pp. 145–172.
- CABRI, J. L. (1973). New data on phase relations in the Cu-Fe-S system. *Economic Geology*, **68**, pp. 443–454.
- CABRI, L. J.; BLANK, H.; EL GORESY, A.; LAFLAMME, J. H.; NOBILING, R.; SIZGORIC, M. B. & TRAXEL, K. (1984). Quantitative trace-element analyses of sulfides from Sudbury and stillwater by proton microprobe. *The Canadian Mineralogist*, **22**, pp. 521–542.
- CAMERON, E.N. (1961). *Ore microscopy*. New York , London.
- CANCHAYA, M.S. (1993). El ensamble pirita-calcopirita-pirrotita-cubanita-mackinawita en los pórfidos de cobre peruanos. Em: *VI Congreso Peruano de Geología, Soc. Geol. Perú*, p. 108.
- CANCHAYA, S. & CARDOSO, M. (1984). Tabla de intercrecimientos geométricos de minerales opacos. Com. pess.
- CARTEN, R. B. (1986). Sodium-calcium metasomatism: chemical, temporal, and spatial relationships at the Yerington, Nevada, porphyry copper deposit. *Economic Geology*, **81**, pp. 1495–1519.
- CASTRO, D. A. (1989). *Petrografía básica*. Madrid.
- CAYE, R.; CERVELLE, B.; CESBRON, F.; OUDIN, E.; PICOT, P. & F., PILLARD (1988). Isocubanite, a new definition of the cubic polymorph of cubanite  $\text{CuFe}_2\text{S}_3$ . *Mineralogical Magazine*, **52**, pp. 509–514.
- CHACÓN, A. N. (1995). Geomorfología. Em: *Geología del Perú*, Numero 55 em A, pp. 7–14. Carta Geológica Nacional, Lima-Perú.
- CLARK, A. H. (1966). Some comments on the composition and stability relations of mackinawite. *Neues Jahrb Mineralogie Monatsh*, **10**, pp. 300–304.

- CLARK, A. H.; FARRAR, E.; KONTAK, D.J.; LANGRIDGE, R.J.; ARENAS, M.J.; FRANCE, L.J.; MCBRIDE, S.L.; WOODMAN, P.L.; WASTENEYS, H.A.; SANDEMAN, H.A. & ARCHIBALD., D.A. (1990a). Geologic and geochronologic constraints on the metallogenetic evolution of the Andes of southeastern Perú. *Economic Geology*, **85**, pp. 1520–1583.
- CLARK, H. A; TOSDAL, M. R.; FARRAR, E. & PLAZOLES, A. (1990b). Geomorphologic Environment and Age of Supergene Enrichment of the Cuacone, Quellaveco and Toquepala Porphyry Copper Deposit, Southeastern Perú. *Economic Geology*, **85**, pp. 1604–1628.
- COBBING, E. J. (1998). The coastal batholith and other aspects of andean magmatism in Perú. pp. 5–20. Soc. Geol. Perú.
- COBBING, J. & PITCHER, W. (1972b). Plate tectónics and the Peruvian Andes. *Nature; Physical Science*, **240 (99)**, pp. 51–53.
- CONCHA, O. & BERNABÉ, H. (1999). Geología y Génesis de Cuacone. *Relatório Técnico*, SouthePerú Corporation.
- CRAIG, J. & VAUGHAN, D. (1994). *Ore microscopy and ore petrography*. New York, 2th edição.
- CRAIG, J. R. & SCOTT, S. D. (1974). Sulfide phase equilibria. Em: Mineralogical Society of America (Ed.), *Sulfide - Mineralogy; short course notes*, volume 1, capítulo Sulfide phase equilibria, pp. CS1–CS110. Lithocrafters Michigan.
- DEMICHELE, V. (1972). *Atlas de minéralogie et pétrographie*. Paris: Grange Batelière.
- DEMIDOV, V. & MUÑOZ, J. (1993). *Introducción a la Minerografía*. Cuba.
- DILLES, J. H. & EINAUDI, M. T. (1992). Wall-rock alteration and hydrothermal flow paths about the Ann-Mason porphyry copper deposit, Nevada-A 6- km vertical reconstruction. *Economic Geology*, **87**, pp. 1963–2001.
- EDWARDS, A. B. (1954). *Textures of the ore minerals and their significance*. Melbourne.
- ESTRADA, F. (1985). Geología de Quellaveco. volume 46, pp. 65–86. Bol. Soc. Geol. Perú.
- EVANS, H. (1964). Valleriite and the new iron sulfide, mackinawite. *U.S. Geol. Survey prof.*, **475-D**, pp. D64–D69.
- FLEET, E. M. (2006). Phase equilibria at high temperatures. Em: *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, volume 61, pp. 365–419. Mineralogical Society of America.
- GAÁL, G. & ISOHANNI, M. (1979). Characteristics of igneous intrusions and various wall rocks in some Precambrian porphyry copper-molybdenum deposits in Pohjanmaa, Finland. *Economic Geology*, **74**, pp. 1198–1210.
- GEHLEN, K. & KULLERUD, G. (1962). Pirrotite-pyrite-chalcopirite relations. *Carnegie Inst. Washington Year Book*, **61**, pp. 154–155.

- GIGGENBACH, W. F. (1997). *Geo-chemistry of hydrothermal ore deposits*. capítulo The origin and evolution of fluids in magmatic hydrothermal systems, pp. 737–796. New York.
- GOLDSTEIN, J. I.; NEWBURY, D.E.; ECHLIN, P.; JOY, D.C.; ROMIG, A. D.; LYMAN, C. E.; FIORI, C. & LIFSHIN, E. (1992). *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*. New York.
- GOMEZ, M. & FABAS, P. (2006). Mineralogical controls on mine drainage of the abandoned Ervedosa tin mine in north-eastern Portugal. *Applied Geochemistry*, **21**, pp. 1322–1334.
- GUSTAFSON, L. B. (1978). Some major factors of porphyry copper genesis. *Economic Geology*, **73**, pp. 600–607.
- GUSTAFSON, L. B. & HUNT, J. P. (1975). The porphyry copper deposits at El Salvador, Chile. *Economic Geology*, **70**, pp. 857–912.
- GUSTAFSON, L. B. & TITLEY, S. R. (1978). Porphyry copper deposits of the southwestern Pacific islands and Australia: Preface. *Economic Geology*, **73**, pp. 97–599.
- HAGEL, E. (1994). *Microscopia de menas*. Concepción - Chile.
- HEMLEY, J. J.; MARINENKO, J. W.; MONTOYA, J. W. & LUCE, R. W. (1980). Equilibria in the system  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{SiO}_2\text{H}_2\text{O}$  and some implications for alteration/mineralization process. *Economic Geology*, **75**, pp. 210–228.
- INGEMMET, INSTITUTO GEOLÓGICO MINERO METALÚRGICO (2000). Estudio de los recursos minerales del Perú, Franja No 1. Em: *Geología Económica*, B, p. 196. INGEMMET.
- INOUE, A. (1995). *Origin and Mineralogy of Clays*. capítulo Formation of clay minerals in hydrothermal environments, pp. 268–330. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- IXER, R. A. (1990). *Atlas of opaque and ore minerals in their associations*. New York.
- JENKS, W. F. (1946). Preliminary note on geologic studies on the Pacific Slope in Southern Perú. *American Journal Science*, **244** (5), pp. 367–372.
- KANEDA, H.; SHOJI, T.; TAKENOUCI, S. & IMAI, H. (1978). *Geological studies of the mineral deposits in Japan and east Asia*. capítulo Cu-Fe-S Mineral Syntheses, p. 392. Japan.
- KERR, P. F. (1972). *Mineralogia óptica*. Madrid.
- KIRKHAM, R. V. (1972). Porphyry deposits (in Report of Activities, Part B; November 1971 to March 1972). *Geological Survey of Canada*, **72** (1), pp. 64–64.
- KISSIN, S. A. & SCOTT, S. D. (1982). Phase relation involving pyrrhotite below 350 °C. *Economic Geology*, **77**, pp. 1739–1754.

- KLEIN, C. (2002). *Manual de mineralogía : basado en la obra de J. Dana. Cornelis Klein, Cornelius S. Hurlbut, Jr.* Barcelona, 4th edição.
- KOJIMA, S. & SUGAKI, A. (1984). Phase relations in the central portion of the Cu-Fe-Zn-S system between 800 °C and 500 °C. *Mineral. Journal*, **12**, pp. 15–28.
- KOJIMA, S. & SUGAKI, A. (1985). Phase relations in the Cu-Fe-Zn-S system between 500 ° and 300 °C under hydrothermal conditions. *Economic Geology*, **80**, pp. 158–171.
- KOUVO, O. & VUORELAINEN, Y. (1963). A tetragonal iron sulfide. *The American Mineralogist*, **48**, pp. 511–524.
- KRUPP, R. E. (1994). Phase relations and phase transformations between the low-temperature iron sulfides mackinawite, greigite and smythite. *Eur.J. Mineral*, **6**, pp. 265–278.
- LACY, W. C. (1958). Porphyry copper deposit, Cuaajone, Perú. *Am. Inst. Mining Metall. and Petroleum Engineers Trans.*, **11**, pp. 104–107.
- LEMAITRE, R. W. (1989). *A classification of igneous rocks and glossary of terms. ( Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks )*. Blackwell, Oxford.
- LENNIE, A. R.; R., ENGLAND K. E. & VAUGHAN, D. J. (1995a). Transformation of synthetic mackinawite to hexagonal pyrrhotite: A kinetic study. *American Mineralogist*, **80**, pp. 960–967.
- LENNIE, A. R. & VAUGHAN, D. J. (1996). Spectroscopic studies of iron formation and phase relations at low temperatures. Em: *Mineral Spectroscopy*, volume 5, pp. 117–131. Geochemical Society Special Publication,.
- LOWELL, J. D. & GUILBERT, J. M. (1970). Lateral and vertical alteration mineralization zoning in porphyry copper ore deposits. *Economic Geology*, **65**, pp. 373–408.
- LUSK, J. & BRAY, M. (2002). Phase relations and the electrochemical determination of sulfur fugacity for selected reactions in the Cu-Fe-S and Fe-S systems at 1 bar and temperatures between 185 °C and 460 °C. *Chemical Geology*, **192**, pp. 227–248.
- LUSK, J. & CALDER, B. (2004). The composition of sphalerite and associated sulfides in reactions of the Cu-Fe-Zn-S, Fe-Zn-S and Cu-Fe-S systems at 1 bar and temperatures between 250 °C and 535 °C. *Chemical Geology*, **203**, pp. 319–345.
- LUSK, J.; SCOTT, S. D. & FORD, C. E. (1993). Phase relations in the Fe-Zn-S system to 5 Kbars and temperatures between 325 °C and 150 °C. *Economic Geology*, **88**, pp. 1880–1903.
- MACKENZIE, W. S. (1994). *A color of rocks and minerals in thin section*. New York.

- MACKENZIE, W. S. & GUILFORD, C. (1980). *Atlas of rock-forming minerals in thin section*. London, New York.
- MACKENZIE, W.S.; DONALDSON, C.H. & GUILFORD, C. (1982). *Atlas of igneous rocks and their textures*. Harlow.
- MACKINSTRY, H. (1959). Mineral assemblages in sulfide ores; The system Cu-Fe-S-O. *Economic Geology*, **54**, pp. 975–1001.
- MACLEAN, W. H.; CABRI, L. J. & GILL, J. E. (1972). Exsolution products in heated chalcopirite. *Canadian Journal Earth Science*, **9**, pp. 1305–1317.
- MAKENZIE, W. S. & ADAMS, A. E. (1997). *Atlas en color de rocas y minerales en lámina delgada*. España, 1th edição.
- MAKSAEV, V. (2001). Pórfidos Cupríferos. Curso.
- MANRIQUE, J. & PLAZOLLES, A. (1975). Geología de Cujajone. 46, pp. 137–150. Bol. Soc. Geol. Perú.
- MAROCCO, R. & NOBLET, C. (1990). Sedimentation, tectonism and volcanism relationships in two Andean basins of southern Perú. *Geologische Rundschau*, **79**, pp. 111–120.
- MCBRIDE, S. L. (1977). *A K-Ar Study of the Cordillera Real, Bolivia, and its regional setting*. Tese de Doutorado, Queens University, Kingston Ontario Canada.
- MELDRUM, J. L. (1998). *Determination of the sulphide oxidation potential of mine tailings from Rankin Inlet, Nunavut, at sub-zero temperatures*. Dissertação de Mestrado, Queens University, Kingston Ontario Canada.
- MELGAREJO, J. (2003). *Atlas de asociaciones minerales en lámina delgada*. España.
- MENDIVIL, S. (1965). Geología de los cuadrángulos de Maure y Antajave. 10, p. 99. Comisión de la carta geológica nacional, Perú.
- MERWIN, H. E. & LOMBARD, R. H. (1937). The system Cu-Fe-S. *Economic Geology*, **32**, pp. 203–284.
- MEYER, C. & HEMLEY, J. J. (1967). *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. capítulo Wall rock alteration, pp. 166–232. New York.
- MUKAIYAMA, H. & IZAWA, E. (1970). *Volcanism and ore genesis*. capítulo Phase relations in the Cu-Fe-S system: the copper deficient part., pp. 339–355. University Tokio.
- MUÑOZ, C. A. (1980). *Yacimientos porfiríticos de cobre en el Perú*. Tese de Doutorado, Universidad de San Marcos. Lima - Perú.

- NALDRETT, A. & KULLERUD, G. (1966). Sulfurization in nature; two examples. *Geological Society of America, Special paper*, pp. 115–116.
- NASSAU, K. (1978). Geología Minera del Departamento de Tacna. 46, pp. 187–204. Soc. Geol. Perú.
- NESSE, W.D. (1991). *Introduction to optical mineralogy*. Oxford Univ. Press, New York, USA, 2nd Edition.
- OELSNER, O. (1966). *Atlas of the most important ore mineral parageneses unde the microscope*. Oxford, New York.
- PALACIOS, O. (1995). Geología Histórica y Evolución Tectónica. Em: *Geología del Perú*, pp. 15–44. Carta Geológica Nacional.
- PANKRATZ, L. B. & KING, E. G. (1970). High temperature enthalpies and entropies of chalcopirite and bornite. *U. S. Bur. Mines Rept. Invest.*, **7435**.
- PARK, F. CH. & MACDIARMID, A. R. (1981). *Yacimientos minerales*. Barcelona.
- PARK, G. (1998). Petrographic and Litogeochemical Alteration Study of the Cuaajone and Toquepala Porphyry Copper Deposits, Perú. *Relatório Técnico*, Souther Perú Copper Corporation.
- PARSONS, A. B. (1933). *The porphyry coppers*. American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, New York.
- PICHLER, H. & SCHMITT-RIEGRAF (1997). *Rock-forming Minerals in Thin Section*. Chapman and Hall, London.
- PIERCE, F. W. & BOLM, J. G. (1995). *Porphyry copper deposits of the American Cordillera*. Arizona.
- PIRAJNO, F. (1992). *Hydrothermal mineral deposits : principles and fundamental concepts for the exploration geologist*. Heidelberg.
- PITCHER, W. S. (1974). The Mesozoic and Cenozoic batholiths of Perú. *Pacif. Geology*, **8**, pp. 51–62.
- PITCHER, W. S.; ATHERTON, M. P; COBBING, E. J. & BEKINSALE, R. D. (1985). *Magmatism at a plate edge The Peruvian Andes*. Glasgow, New York, Halsted.
- PITCHER, W. S. & COBBING, E. J. (1985). *Magmatism at a plate edge: The Peruvian Andes*. capítulo Phanerozoic plutonism in the Peruvian Andes, pp. 19–25. New York.
- RAMDOHR, P. (1969). *The ore minerals and their intergrowths*. Akademie- Verlag.
- RAMDOHR, P. (1980). *Ore minerals and their intergrowths*. Oxford, New York, Toronto.



- ROSE, A. W. (1970). Zonal relation of wallrock alteration and sulfide distribution at porphyry copper deposits. *Economic Geology*, **65**, pp. 920–936.
- SANCHEZ, A. & LEÓN, W. (1995). Rocas Igneas. Em: *Geología del Perú*, Numero 55 em A, pp. 7–14. Bol. Carta Geológica Nacional, Lima-Perú.
- SATCHWELL, P. C. (1983). Geologia de la Mina Cuajone. volume 72, pp. 127–146. Bol. Sociedad Geológica del Perú.
- SÉBRIER, M.; FORNARI, M.; VATIN-PERIGNON, N.; VIVIER, G. & CABRERA, J. (1983). Nuevas edades radiométricas del volcanismo Cenozoico del Sur del Perú: implicancias en la tectonogénesis andina. Nuevas edades radiométricas del volcanismo Cenozoico del Sur del Perú: implicancias en la tectonogénesis andina. Em: *V congreso Peruano de Geología*, pp. GR–16. Lima - Perú.
- SCHOUTEN, C. (1962). *Determination tables for ore microscopy*. Amsterdam, New York.
- SILLITOE, R. H. (1985). Ore-related breccias in volcano-plutonic arcs. *Economic Geology*, **80**, pp. 1467–1514.
- SIMON, G.; KESLER, S. & ESSENE, E. (2000). Gold in Porphyry Copper Deposits: Experimental determination of the distribution of gold in the Cu-Fe-S system at 400 °C to 700 °C. *Economic Geology*, **95**, pp. 259–270.
- SINGER, D.A. (2005). Porphyry copper deposits of the world: Database, map, and grade and tonnage models. U.S. Geological Survey Open-file Report. <http://pubs.usgs.gov/of/2005/1060/>
- SMIRNOV, V. I. (1982). *Geología de yacimientos minerales*. Mir, Moscú.
- SMITH, R. E. (1966). The geology of Mandurama Panuara. *Journal and Proceedings of the Royal Society New South Wales*, **10**, pp. 239–262.
- STEINMANN, G. (1929). *Geología del Perú*. Heidelberg Carl Winters.
- STEVENSON, F.B. & DAMIANI, O. (1968). Interpretación estructural del depósito de Toquepala. *Relatório Técnico*, Southern Perú Copper Corporation, Lima - Perú.
- STEWART, J. & SNELLING, N. (1971). K-Ar determinations on minerals from the Peruvian coastal batholith. *Relatório Técnico 2*, Isotope Geology Unit, Inst. Geol. Sci..
- SUGAKI, A.; SHIMA, H.; KITAKAZE, A. & HARADA, H. (1975). Isothermal phase relations in the system Cu-Fe-S under hydrothermal conditions at 350 °C and 300 °C. *Economic Geology*, **70**, pp. 806–823.
- TITLEY, S. R. (1975). Geological characteristics and environment of some porphyry copper occurrences in the Southwestern Pacific. *Economic Geology*, **70**, pp. 499–514.



- TITLEY, S. R. & BEANE, R. E. (1981). Porphyry copper deposits, Part I: Geological settings, petrology and tectogenesis. *Economic Geology*, **75th anniv.**, pp. 214–235.
- TITLEY, S. R. & HICKS, C. L. (1966). *Geology of the porphyry copper deposits, southwestern North America*. Tucson.
- TORPOCO, C. (1979). Petrografía, alteraciones y mineralización del yacimiento de Quellaveco - Moquegua. pp. 117–134. Soc. Geol. Perú.
- TOSDAL, R. M.; CLARK, A. H. & FARRAR, E. (1984). Cenozoic polyphase landscape and tectonic evolution of the Cordillera Occidental southernmost Perú. *Geological Society of America Bulletin*, **95**, pp. 1318 –1332.
- TOSDAL, R. M.; FARRAR, E. & CLARK, A.H. (1981). K-Ag geocronology of the late Cenozoic volcanic rocks of the Cordeillera Occidental, southern most Perú. *Journal of volcanology and geothermal research*, **10**, pp. 157–173.
- TOWNLEY, K. B. (2001). Hidrotermalismo y Modelos de Yacimientos. Chile. Curso.
- TROGER, W. E. (1979). *Optical determination of rock-forming minerals - part 1 determination tables*. Stuttgart.
- UDUBASA, G. (1982). *The state of the earth*. capítulo Rutile of postmagmatic mineral formation, pp. 784–793. Springer Berlin.
- UYÉN, A. D. (1981). Geología y Mineralización de la mina Cuajone. *Relatório Técnico*, Universidad de San Agustín.
- UYTENBOGAARDT, W. (1971). *Tables for microscopic identification of ore minerals*. Amsterdam, New York.
- VALERA, L. J. (1987). *Geología de los Depósitos de Minerales Metálicos*. Lima - Perú.
- VAUGHAN, D. J. & CRAIG, J. R. (1978). *Mineral Chemistry of metal sulfides*. London, New York, Melbourne.
- WILLIAMS, H.; TURNER, F. J. & GUILBERT, C. M. (1982). *An introduction to the Study of Rocks in Thin Sections*. New York.
- WILSON, J. J. & GARCÍA, W. (1962). Geología de los cuadrángulos de Pachia y Palca. 2 (4), p. 82. Comisión de la carta geológica nacional.
- YUND, A. R. & KULLERUD, G. (1966). Thermal stability of assemblages in the Cu-Fe-S system. *Journal of Petrology*, **7**, pp. 454–488.
- ZOKA, H.; TAYLOR, L. A. & TAKENO, S. (1972). Compositional variations in natural mackinawite and the results of heating experiments. *J. Sci. Hiroshima Univ.*, ser. C, **7**, pp. 37–53.

ZWENG, L. P. & CLARK, H. A. (1995). Hypogene Evolution of the Toquepala Porphyry Copper-Molybdenum Deposit, Moquegua, Southeastern Perú. *Arizona Geological Society Digest*, **20**, pp. 566–612.

ZWENG, P. L. (1984). *Evolution of the Toquepala porphyry Cu (-Mo) deposit, Perú*. Tese de Doutoramento, Queens University, Kingston.