

# **METALOGENIA CRETÁCICA-TERCIARIA DE LOS ANDES CENTRALES DE SUDAMÉRICA**

Jorge Nelson Rivera Guillén

GEOMETAMISA - Calle 31 N° 212, Urb. Córpac, San Isidro – Tel/Fax :476-4059,  
E-mail: neri\_gui@hotmail.com

El estrecho relacionamiento entre la formación de yacimientos minerales y la tectónica que se observa en los Andes Centrales Sudamericanos constituye un desafío para investigar sobre la ocurrencia de los depósitos minerales en la parte occidental de Sudamérica, mediante el comportamiento de los cinturones metalogenéticos. El suscrito ha iniciado una investigación sobre la tectónica y metalogenia del período geológico que se extiende desde los inicios de la separación de África y América hace 135 Ma hasta la época Reciente. El avance se resume y expone a continuación.

## **METALOGENIA CRETÁCEA**

La separación de África y América del Sur produjo una extensa actividad volcánica en el litoral atlántico en formación (lavas volcánicas de Patagonia a 165-155 Ma y de Paraná a 140-120 Ma), elevamiento de la plataforma continental de Sudamérica y generación de megafracturas longitudinales NO-SE y fracturas transversales (tectónica Mochica) durante el Jurásico-Cretáceo Inferior, que afectó el basamento paleozoico ubicado entre la fosa de subducción y el cratón Brasileño. Diques y flujos laminares y almohadillados de basaltos, y de intrusiones de basaltos andesíticos de 128 Ma a 120 Ma caracterizan a esta fase expansiva por la que pasó la corteza terrestre en el Cretáceo Inferior. Los depósitos minerales que se formaron en esta etapa de distensión están relacionados a rifts y cuencas estructurales (cuencas de Lancones-Celica y Casma en Perú y Punta de Cobre y otras en Chile), a lo largo de las cuales las megafracturas canalizaron fluidos basálticos y andesíticos y mineralizaciones de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, pirita y calcopirita que contienen los complejos volcánicos del Grupo Casma en el Perú y en el norte de Chile. La formación de depósitos cupríferos a lo largo de la faja costera del Perú y Chile se efectuó desde los 115.1 Ma. En Perú se tiene a Raúl-Condestable (115-114.8 Ma), Cerro Colorado, Tambo Grande, Cerro Lindo, María Teresa, y en Chile se tiene Mantos Blancos (115 Ma), Santo Domingo (115 Ma), Punta del Cobre (115 Ma), Candelaria (115.2 Ma), Andacollo (115 Ma). Posteriormente en una cuenca transversal del litoral se desarrolló el depósito de baritina-zinc de Cecilia-Juanita (Perubar) a 62.2 Ma. En las fracturas NO-SE del litoral se desarrollaron calderas con intrusiones de gabros a 102-95 Ma, con intrusiones de diorita y diorita cuarcifera entre 95-84 que evolucionaron en la parte central de las calderas; y plutones grandes de diorita cuarcifera, tonalita, monzogranitos entre 84 y 72 Ma que se extendieron como diques e hipabisales de granodiorita, tonalita y sienodiorita entre 72-61 Ma conformando en conjunto el batolito de La Costa que se extendió hasta la parte central de Chile. Entre 84 y 73 Ma intruyó el batolito de Carabaya en el SE del Perú y entre 80-51 Ma se desarrolló el complejo volcánico del Grupo Toquepala como respuesta a la tectónica del Plegamiento Peruano, cuyos productos distribuidos desde el noroeste de Arequipa hasta el norte de Chile se convirtieron en la roca huésped de los pórfidos de cobre terciarios.

## **METALOGENIA TERCIARIA**

A los 62.2 Ma se iniciaron los primeros procesos hidrotermales y de metalización del Terciario Inferior activados por la fase tectónica Incaica I y se desarrollaron inicialmente los pórfidos de Cu, Mo, en el área Santa Rosa-Cerro Verde (58.8 Ma) en la zona de Arequipa. La generación de este tipo de depósitos se extendió hasta el desarrollo del depósito La Pepa (23.8 Ma) en Chile. En esta época metalogenética de 38.4 Ma se desarrollaron pórfidos de Cu, Mo dentro de una demarcación territorial, que se extiende a Perú, Bolivia, y Chile (PEBOCHI) que conforma un oroclino ubicado en la zona occidental del Altiplano boliviano, entre las latitudes 14° S y 27°S. La PEBOCHI es una depresión limitada al este por la fosa de subducción, al norte por el corredor estructural de Pisco-Huanta (en

Perú) y al sur por la falla Guanaco en Chile. Esta depresión por estar limitada por fallas profundas, por cadenas de montañas, y cadenas de volcanes activos se singulariza como una supermegacaldera, cuyos hundimientos y empujes hacia el Este han afectado a la cordillera Oriental y Occidental de los Andes. El desarrollo de las Cordilleras paralelas submarinas de Nazca y La Perdida y del Altiplano con abundantes volcanes del Holoceno alineados paralelos a la fosa de subducción que extruyen lavas basálticas olivínicas y el isótopo  $He^3/He$  típico de refusiones de rocas astenosféricas indican que el segmento de la litósfera base de la megacaldera se ha hundido en forma escalonada. Este hundimiento debido a las distensiones episódicas terciarias produjo disminución de la presión en las fracturas profundas y la consecuente refusión de los gabros generando basaltos que bajo la presión del bloque central fueron eyectados a través de las fracturas limitantes periféricas formando las cordilleras submarinas e incrementando el volumen del orocliño.

Los relevamientos geofísicos de la superficie sismotectónica de Wadati-Benioff (ZWB) dentro de la PEBOCHI indican que esta superficie se inclina  $19^\circ$ , tiene una velocidad de subducción de 8.4 cm/año hacia el  $N77^\circ E$ , una edad de 60 Ma en el borde de la fosa y una profundidad de 300 km como extensión de las raíces siálicas (Figura N° 1). Se infiere que con la separación total de Sudamérica de África a los 65 Ma se produjo un incremento considerable en la velocidad de la placa sudamericana hacia el occidente y en la distensión continental que produjo la fase tectónica Incaica I (61-60 Ma) que fragmentó a Sudamérica en bloques, siendo uno de ellos la PEBOCHI; la cual al hundirse arrastró a los magmas en formación de la zona de refusión ZWB a mayores profundidades y temperaturas con lo cual se formaron algunos pórfidos cupríferos (Cerro Verde, Toquepala, Cuajone y Quellaveco) en el sur del Perú. El hundimiento progresivo continuó hasta la fase tectónica Incaica II (44-43 Ma) en la cual se generaron pórfidos en megadepósitos de Cu, Mo hasta la orogenia Incaica III (31-30 Ma). Fuera de la PEBOCHI y con la fase de plegamiento Quechua 1 (18-17 Ma) se generaron yacimientos epitermales polimetálicos al norte de la estructura PEBOCHI en el Perú; y pórfidos de cobre y yacimientos epitermales polimetálicos de edades menores de 10 Ma al sur de la PEBOCHI en Chile.

Según lo anterior la gran mayoría de los depósitos minerales de los Andes Centrales se han formado en 3 ambientes metalogenéticos: a) el ambiente de pórfidos de Cu, Mo (Ag, Au) ubicados entre las latitudes  $14^\circ S$  y  $27^\circ S$  dentro de la PEBOCHI; b) el ambiente de pórfidos de Cu, Mo y de otros depósitos epitermales al sur de la PEBOCHI, en Chile; y c) el ambiente polimetálico entre las latitudes  $14^\circ S$  y  $5^\circ S$  en el Perú.

a) El conjunto de pórfidos de Cu, Mo (Ag, Au) dentro de la PEBOCHI integran el arco volcánico-magmático principal paralelo a la fosa de subducción, cuyas alturas están conformadas por abundantes volcanes miocenos-cuaternarios y holocénicos (10,000 años). El yacimiento más antiguo es Cerro Verde (58.8 Ma) en Arequipa y el más joven es la Pepa (23.8 Ma) en el norte de Chile, entre los cuales se ubican 6 megapórfidos, Salvador (41.0 Ma), Escondida Norte (39.0 Ma), Rosario (34.4 Ma), Romiro Tomic (32.7 Ma), Chuquicamata (37.9 Ma). En el Perú en la parte norte de la PEBOCHI se tienen los pórfidos grandes de Cerro Verde, Toquepala (58.7 Ma), Cuajone (52.3 Ma) y Quellaveco.

En el área marginal del norte de la PEBOCHI y cercana a la inflexión de la Cordillera Occidental en Abancay se presenta una zona de sedimentos calcáreos que ha sido tectonizada por fracturamiento e intruía por plutones de gabros, dioritas, granodioritas y monzonitas de diferentes dimensiones y de edades entre 48 y 30 Ma que conforman el batolito de Andahuaylas-Yauri. Se presentan mineralizaciones de óxidos de Fe en la parte norte y mineralizaciones de Cu, Mo desde Abancay hacia el Sur. Se infiere que la influencia de la mineralización de cobre de la PEBOCHI se extendió hasta la latitud de Abancay y que los skarns de Tintaya, Corocohuayco y de Las Bambas (33.0 Ma) y el pórfido de Cu, Mo(Au) Los Chancas se desarrollaron entre 42 Ma y 30 Ma dentro de la estructura PEBOCHI.

b) Esta agrupación de pórfidos de Cu, Mo(Au) y de otros depósitos epitermales menores de 10 Ma se desarrollaron durante la fase tectónica Quechua 1 (18-17 Ma), y se relacionan a fuentes magmáticas e hidrotermales poco profundas que se han generado sobre una zona de subducción sub-horizontal que se inclina  $10^\circ$  al este. En la zona se han desarrollado megapórfidos de Cu, Mo tales como El Teniente (4.8 Ma), el más grande a nivel mundial; Río Blanco-Los Bronces (4.6 Ma); los Pelambres (9.96 Ma); y otros menores con altos contenidos de plata y oro como Pascua-Lama (9-8 Ma) y el Indio (8-5 Ma).

c) Los yacimientos minerales del ambiente polimetálico son depósitos epitermales derivados de magmas formados a poca profundidad sobre una superficie de subducción que se inclina  $10^\circ$  hacia el este. Estos depósitos se agrupan en distritos y están fuertemente controlados por fracturas

longitudinales NO-SE, por fracturas transversales, y por una variada litología sedimentaria con intercalaciones de acumulaciones volcánicas. Las diferentes reactividades químicas y permeabilidades de las rocas han modificado la canalización de los fluidos termales y la precipitación de los solutos ha adoptado diferentes formas; por lo cual, cada distrito mineral contiene depósitos de mineralogía similar pero de variada morfología (vetas, mantos, cuerpos de reemplazamiento, disseminaciones, skarns, pórfidos de dimensiones menores). Estos distritos están relacionados a procesos volcánicos-intrusivos andesítico-dacítico y riolíticos del Eoceno Terminal-Mioceno Inferior (35-18 Ma) y a intrusiones post-batolíticas menores de dioritas cuarcíferas y monzonitas cuarcíferas del Mioceno al Plioceno (18-5.4 Ma). La mineralización distrital presenta un zoneamiento desde el interior hacia afuera, de W (Mo, Sn), Fe, Cu, Zn, Pb, Ag, Au. Los estudios de paragénesis muestran que las precipitaciones de minerales se han efectuado hasta en 6 fases de rejuvenecimiento magmático. Un análisis de la persistencia de la mineralización, el zoneamiento distrital, la edad de formación y su relacionamiento indica que la formación de los depósitos cordilleranos andinos ocurrió durante las 3 últimas etapas metalogenéticas terciarias, desde los 30 Ma hasta los 2.6 Ma; y han contribuido en su generación la orogenia Incaica III (31-30 Ma) y las fases de plegamiento Quechua I (18-17 Ma), Quechua II (8-7 Ma) y Quechua III (5.0 Ma).

En la Figura N° 2 se exhiben áreas delineadas con posibilidades de metalización en base a la existencia comprobada de los yacimientos minerales integrantes. Con excepción del lineamiento de Pisco-Huanta que está siendo estudiada, en las demás áreas no se ha investigado el interrelacionamiento entre los depósitos integrantes; por lo cual son considerados como cinturones y/o corredores metalogenéticos potenciales, cuyo listado tentativo es como sigue: 1) Cinturón de Tambo Grande (Tambo Grande), 2) Cinturón de pórfidos de Cu,Mo del norte del Perú (Río Blanco, Cañariaco, La Granja), 3) Corredor Hualgayoc-Yanacocha (Hualgayoc, Tantahuatay, La Zanja, Minas Conga, Yanacocha, Michiquillay y el MVT Bongará, 4) Corredor Mori-Cajabamba (Quiruvilca, Alto Chicama, La Arena, La Virgen, Santa Rosa), 5) Corredor Mendaña (Magistral), 6) Corredor Bermejo-Pativilca (Antamina, Huanzalá), 7) Corredor Huaura-Chancay-Cerro de Pasco (Raura, Uchuchacua, Izcaycruz, Chungar, Cerro de Pasco, Colquijirca, San Gregorio-Marcapunta, Atacocha-Milpo), 8) Corredor Casapalca-San Cristóbal (Casapalca, Morococha, Carachuacra, San Cristóbal y el VMT San Vicente), 9) Cinturón Pisco-Huanta (Tentadora, Castrovirreyna, Huachocolpa, Julcani, Huancavelica y Mina Martha), 10) Corredor de la franja volcánica Terciaria auroargentífera interandina (La Capitana, Chaparra, Orcopampa, Cailloma, Berenguela, Aruntani y otros), y 11) Corredor de la franja estannífera (San Rafael).

## **CONCLUSIONES**

Las edades absolutas de los depósitos minerales accesibles de los Andes Centrales indican que se pueden agrupar a los yacimientos, distritos y provincias por edades y por ambientes formativos favorables tendientes a encontrar “tendencias y zoneamientos” a niveles distritales y provinciales cuyas inferencias pueden ayudar en la exploración de nuevos depósitos en áreas cubiertas y/o desconocidas y en la reevaluación de yacimientos conocidos.

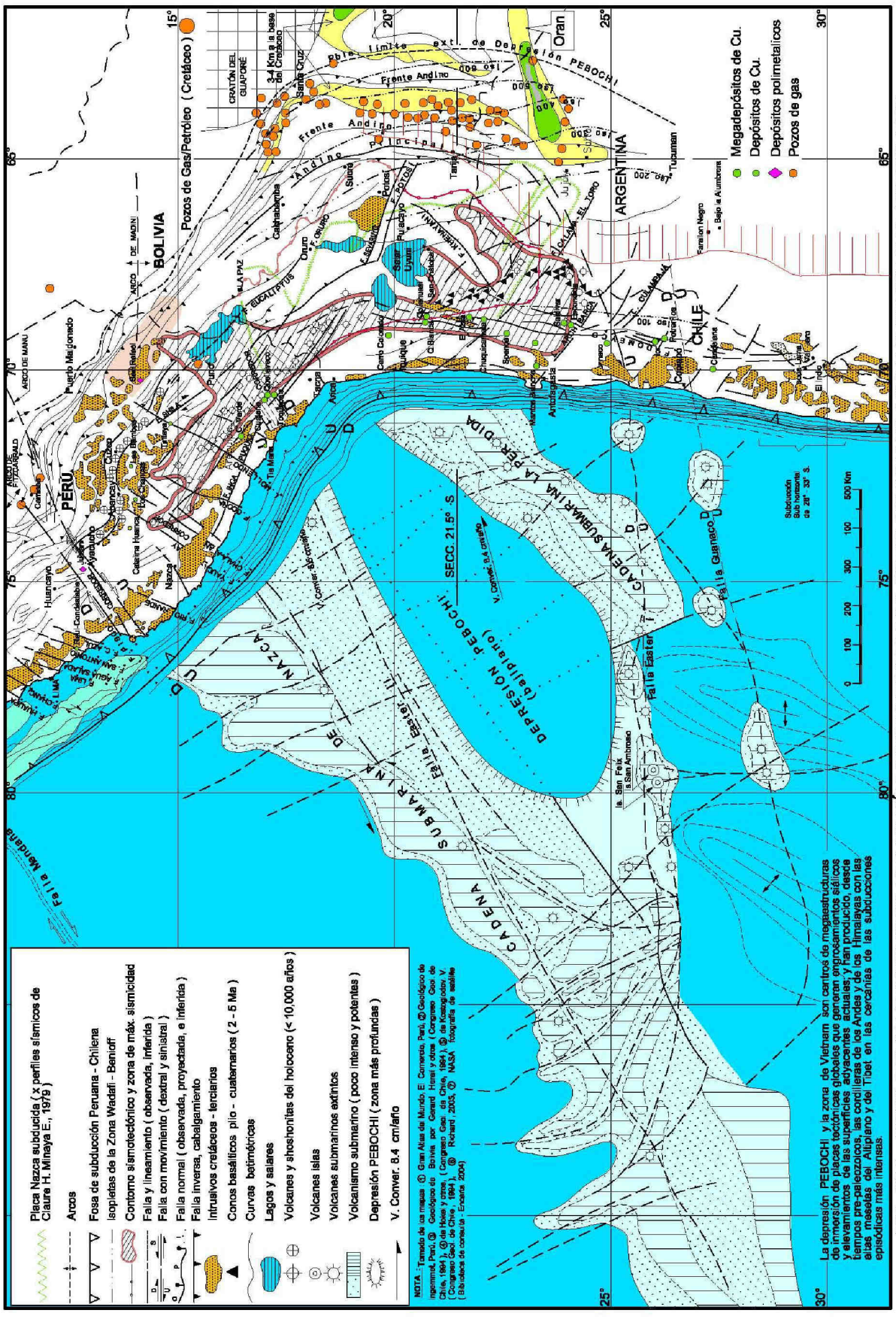
El análisis inicial de las tendencias de la metalización en la parte norte de los Andes Centrales y el estudio específico del cinturón metalogenético de Pisco-Nazca indican que se puede inferir las posibilidades de formación de otros depósitos similares a lo largo de los controles estructurales dominantes.

## **RECOMENDACIONES**

Investigar los cinturones metalogenéticos potenciales mediante equipos de profesionales multidisciplinarios experimentados en ciencias terrestres (geoquímicos, geofísicos, fotogeólogos y geólogos de exploraciones) y de levantamientos aeromagnéticos o de otra tecnología que pueda detectar anomalías para las evaluaciones posteriores. La ejecución de estas investigaciones recae en el organismo gubernamental encargado de estudiar la geología del suelo patrio. La difusión gubernamental sobre la existencia de un gran potencial minero se esfuma cuando no se puede presentar una cartera de proyectos; por lo cual, es recomendable que el Gobierno multiplique los esfuerzos en la ejecución de los estudios pertinentes para ser competitivos en el mediano y largo plazo.

## REFERENCIAS

- Berrocal J., Giesecke A., y Fernández C., 2005. Características sismotectónicas de la Región Central de los Andes y su Influencia sobre el Peligro Sísmico en el sur del Perú. Sociedad Geológica del Perú, vol. especial n° 6, p. 59-87.
- Barlet M. W., 1984. Petrology and Genesis of Carbonate - Hosted Pb-Zn-Ag ores, San Cristobal District, Department of Junin, Peru. Thesis, Oregon State University.
- Cathles L. M., 1993. A Capless. 350°C Flow Zone Model to Explain Megaplumes, Salinity Variations and High-Temperature Veins in Ridge Axis Hydrothermal Systems. *Economic Geology*, vol. 88, p.1977-1988.
- Chiaradia M., Fonboté L., y Tripodi D., 2002. Radiogenic Lead Signaturas in Au-Rich VHMS ores and Associated Volcanic Rocks of the Early Tertiary Macuchi Island Arc (Western Cordillera of Ecuador). XI Congreso Peruano de Geología. Resúmenes, Sociedad Geológica del Perú, p. 78.
- Chouinard A., Williams-Jones A. E., Leonardson R. W., Hodgson C. Jay, Silva P., Téllez C., Vega J., and Rojas F., 2005. Geology and Genesis of the Multistage High-Sulfidation Epithermal Pascua Au-Ag-Cu Deposit, Chile and Argentina. *Economic Geology* vol. 100, p. 463-490.
- Comte D., Suarez C., Pardo M. y Monfret T., 1994. Características sismotectónicas del Norte de Chile. 7° Congreso Geológico Chileno. 1994, vol 1, p. 604-608.
- Fouquet Y., Wafik A., Combon P., Mevel C., Meyer G., and Gente P., 1993. Tectonic Setting and Mineralogical and Geochemical Zonation in the Snake Pit Sulfide Deposit (Mid-Atlantic Ridge at 23° N). *Economic Geology*, vol. 1993, p. 2018-2036.
- Gariépy L. and Hinostroza J., 2001. The Cerro Lindo Volcanogenic Massive Sulfide Deposit, Ica Department, Peru. II Congreso Internacional de Prospectores y Exploradores, Instituto de Ingenieros de Minas, Pro Exploro 2001.
- Goodfellow W. D. and Franklin James M., 1993. Geology, Mineralogy, and Chemistry of Sediments - Hosted Clastic Massive Sulfides in shallow Cores Middle Valley, Northern Juan de Fuca Ridge: *Economic Geology* vol.88, p. 2037-2068.
- Groves D.L., Condie K.C., Goldfarb R.J., Hronsky J. MA., and Vielreicher R. M., 2005. Secular Changes in Global Tectonic Processes and their Influence on the Temporal Distribution of Gold-Bearing Mineral Deposits. *Economic Geology*, vol. 100, p. 203-224.
- Hekinian R. and Fouquet Y., 1985. Volcanism and Metallogenesis of Axial and Off-Axial Structures on the East Pacific Rise near 13°N. *Economic Geology*, vol. 80, p. 221-255.
- Kappel E. S., and Franklin James M., 1989. Relationships between Geologic Development of Ridge Crests and Sulfide Deposits in the Northeast Pacific Ocean. *Economic Geology*, vol. 84, p. 485-505.
- Lyons A. W., Huachocolpa, 1980. El Perú Minero de Samamé B., Tomo IV, p. 482-490.
- Marsh T. M., Einaudi M. T., and McWilliams Michael, 1997. 40 Ar/39 Ar Geochronology of Cu-Au and Au-Ag Mineralization in Potrerillos District, Chile. *Economic Geology*, vol.92, p. 784-806.
- Masías A., Castrovirreyna, 1980. El Perú Minero de Samamé B., Tomo IV. p. 539-557.
- Noble D.C., Ríos A.C., Vidal C., Spell L.P., Zanetti A.Z., Angeles C.Z., Ochoa J.L., y Cruz C.S., 2005. Late Cretaceous Basalt in the Rio Mala Valley, Central Peru: Evidence for extension and Mafic Magmatism prior to late Cretaceous-Paleocene Plutonism and Silicic Volcanism. Sociedad Geológica del Perú, Volumen Especial n° 6, p. 141-148.
- Polliand M., Fontboté L, y Shaltegger V., 2002. The Perubar VHMS Deposit, Central Peru: Formed in an Upper Cretaceous Intra-Arc Setting ?. XI Congreso Peruano de Geología. Resúmenes, Sociedad Geológica del Perú, p.103.
- Rivera G. N., 1980. Estudio Zonal de Huachocolpa. Reporte Interno Banco Minero.
- Richards J. P., Noble S. R., and Pringle M. S. A Revised Late Eocene Age for Porphyry Cu Magmatism in the Escondida Area, Northern Chile. *Economic Geology*, vol. 94, p. 1231-1248.
- Rona P. A. and Scott D. S., 1993. A Special Issue on Sea - Floor Hydrothermal Mineralization: New Perspectives. *Economic Geology*, vol.88, n° 8, p. 1935.
- Silberman M. L., and Noble D. C., 1977. Age of Igneous Activity and Mineralization of Cerro de Pasco, Central Peru. *Economic Geology*, vol.72, p. 922-930.
- Tegart P., and F. J.M., 2001. The Tambo Grande Project, A Newly Emerging World Class Volcanogenic Massive Sulfide District. II Congreso Intenacional de Prospectores y Exploradores. Instituto de Ingenieros de Minas, Pro Exploro 2001.
- Zierenberg R. A., Koski R. A, Morton J. L., Bouse M., and Shanks III C., 1993. Genesis of Massive Sulfide Deposits on Sediment-Covered Spreading Center, Escanoba Trough, Southern Gorda Ridge. *Economic Geology*, vol. 88, p. 2069-2098.



- Placa Nazca subducida (x perfiles sísmicos de Claire H. Minaya E., 1979)
- Aros
- Fosa de subducción Peruana - Chilena
- isopletas de la Zona Wadati - Benioff
- Contorno sísmotectónico y zona de máx. sismicidad
- Falla y ineamiento (observada, inferida)
- Falla con movimiento (dextral y sinistral)
- Falla normal (observada, proyectada, e inferida)
- Falla inversa, cabalgamiento
- Intrusivos cretácicos - terciarios
- Conos basálticos piro - cuaternarios (2 - 5 Ma)
- Curvas batimétricas
- Lagos y salares
- Volcanes y shoshonitas del holoceno (< 10,000 años)
- Volcanes islas
- Volcanes submarinos extintos
- Volcanismo submarino (poco intenso y potentes)
- Depresión PEBOCHI (zona más profundas)
- V. Conver. 8.4 cm/año

NOTA: Tomado de las mesas: ① Gran Atlas de Mundo, E. Comenius, Perú; ② Geológico de Ingeniería, Perú; ③ Geológico de Bolivia, por Conrad Hirtel y otros (Congreso Geol de Chile, 1967); ④ de Hoes y otros, (Congreso Geol de Chile, 1967); ⑤ de Komarov, V. (Congreso Geol de Chile, 1967); ⑥ Richard, 2003; ⑦ NASA, fotografía de satélite (Sitios de corrección - Enero 2004)

La depresión PEBOCHI y la zona de Vietnam son centros de megasubestructuras de inmersión de placas tectónicas globales que generan engrosamientos sísmicos y elevamientos de las superficies adyacentes actuales; y han producido, desde tiempos pre-paleozoicos, las cordilleras de los Andes y de los Himalayas con las altas mesetas del Altiplano y del Tibet en las cercanías de las subducciones episódicas más intensas.

FIG. N°1 MAPA IGNEO-ESTRUCTURAL DE LOS PÓRFIDOS DE COBRE DEL ALTIPLANO DE LOS ANDES CENTRALES DE SUDAMERICA

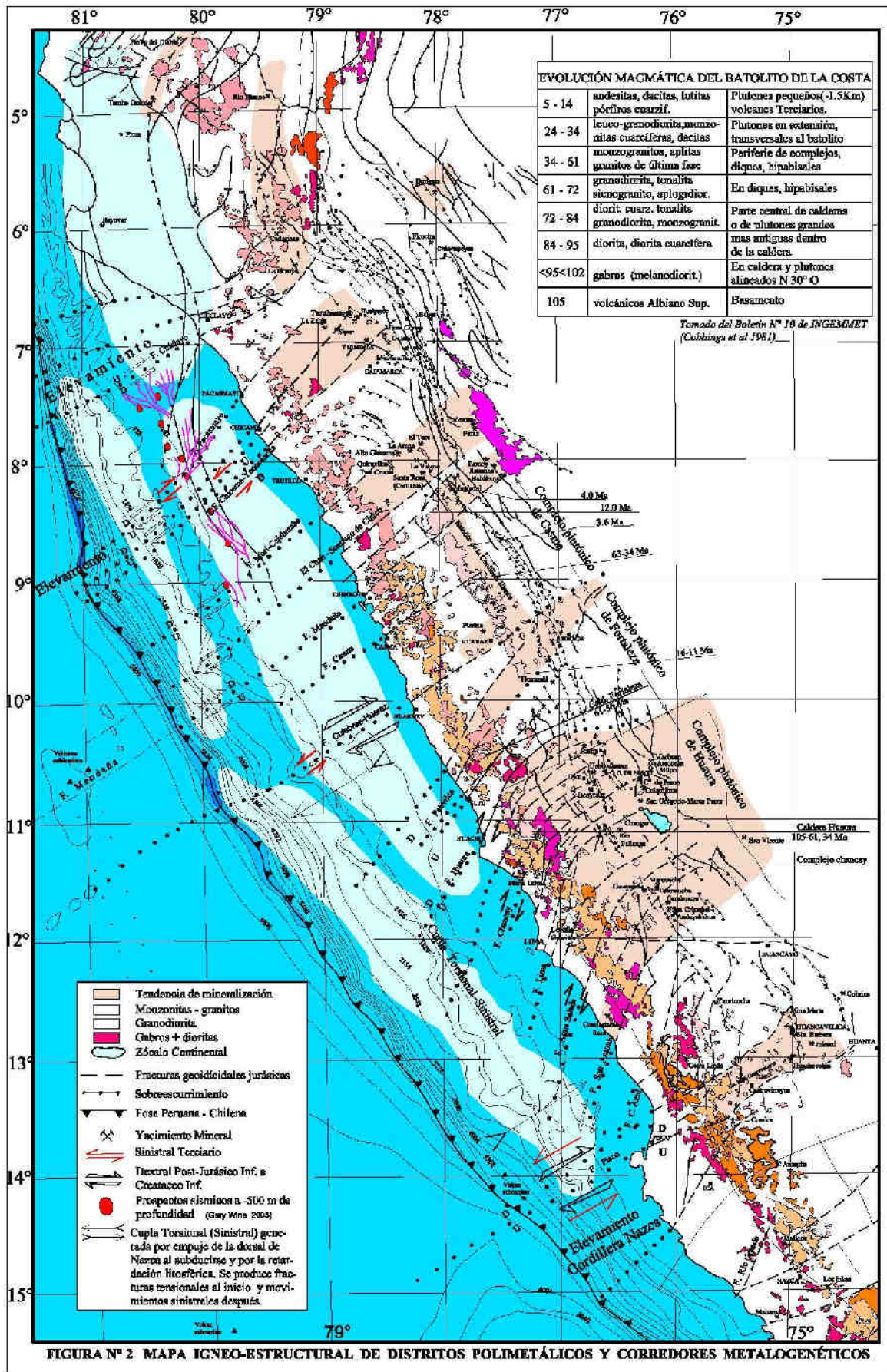


FIGURA N° 2 MAPA IGNEO-ESTRUCTURAL DE DISTRITOS POLIMETÁLICOS Y CORREDORES METALOGENÉTICOS