

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL, TEMPORAL Y TIPOS DE YACIMIENTOS MINERALES EN EL ESTADO DE SONORA, MÉXICO

LUCAS OCHOA LANDÍN^{1*}, EFRÉN PÉREZ SEGURA¹, RAFAEL DEL RÍO SALAS² y MARTÍN VALENCIA MORENO³

¹ Departamento de Geología, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, 83000, ² Department of Geociences, University of Arizona, Tucson, AZ, 85721, ³ Estación Regional del Noroeste, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Apartado Postal 1039, Hermosillo, Sonora, México 83000. (*lucaso@geologia.uson.mx)

RESUMEN

En Sonora existen una gran variedad de ambientes y tipos de depósitos minerales los cuales van desde pórfidos de cobre, skarn, epitermales, Au mesotermal, exóticos e inclusive evidencia de contener tipo IOCG, con una gran variedad de depósitos evaporíticos depositadas en cuencas de diferentes tipos en diferentes partes del Estado. Con trabajos geológicos, estructurales y geoquímicos más recientes y específicos de los diferentes tipos de depósito, se ha podido diferenciar distintos estilos de mineralización en ellos, lo cual permite un mayor conocimiento de su formación y distribución espacial y temporal.

ABSTRACT

There are a variety of environments and types of mineral deposits in Sonora ranging from porphyry copper, skarn, epithermal, mesothermal, exotic and probably presence of IOCG type. There are a wide variety of evaporitic deposits formed in different basin types located in Sonora. Recent geological, geochemical and structural studies in different deposit types, has shown different mineralization styles allowing a greater knowledge of their formation and spatial and temporal distribution.

INTRODUCCIÓN

El Estado de Sonora se caracteriza por contener una gran variedad de tipos de yacimientos minerales, que van desde pórfidos de cobre (los más grandes de México); vetas epitermales de alta y baja sulfuración; skarn de Cu-Zn, Fe y W; reemplazamiento de Pb-Zn; brechas polimetálicas; ambientes propicios para la formación de yacimientos de cobre exóticos relacionados a pórfidos de cobre, con evidencias de haber depósitos tipo IOCG (poco conocidos), y presencia de depósitos de placer. Además de esta gran variedad de ambientes, esta región del país cuenta con depósitos no metálicos, los cuales gran parte de ellos se distribuyen a lo largo de grandes cuencas tipo "Basin and Range" en forma de sales de sulfatos y carbonatos de sodio y silicatos de boro, así como wollastonita en forma de cuerpos irregulares en el contacto con intrusivos cretácicos.

La distribución espacial de la gran mayoría de ellos guarda una estrecha relación con un marco tectónico de subducción, activo durante gran parte del Mesozoico hasta principios del terciario, como ha sido sugerido por varios autores (Clark et al., 1982, Barton et al, 1995). Sin embargo, recientes trabajos sobre la caracterización geológica y geoquímica de varios de ellos, además de aportar un mayor conocimiento acerca de sus modos de formación y evolución, permite hacer una distribución espacial y temporal más precisa de los depósitos minerales más importantes en el estado de Sonora.

YACIMIENTOS MINERALES EN SONORA

El Estado de Sonora cuenta con una larga tradición minera y un fuerte liderazgo en la producción de Cu, Mo, W y Au relacionados a distintos ambientes y tipos de depósitos minerales (Figura 1). En el caso de los dos primeros, se sabe que su mayor producción es a partir de dos grandes depósitos del tipo pórfido de cobre que pueden catalogarse como de clase mundial como es el caso de Cananea y La Caridad cuyas reservas suman más de 35 Mt de contenido de Cu.

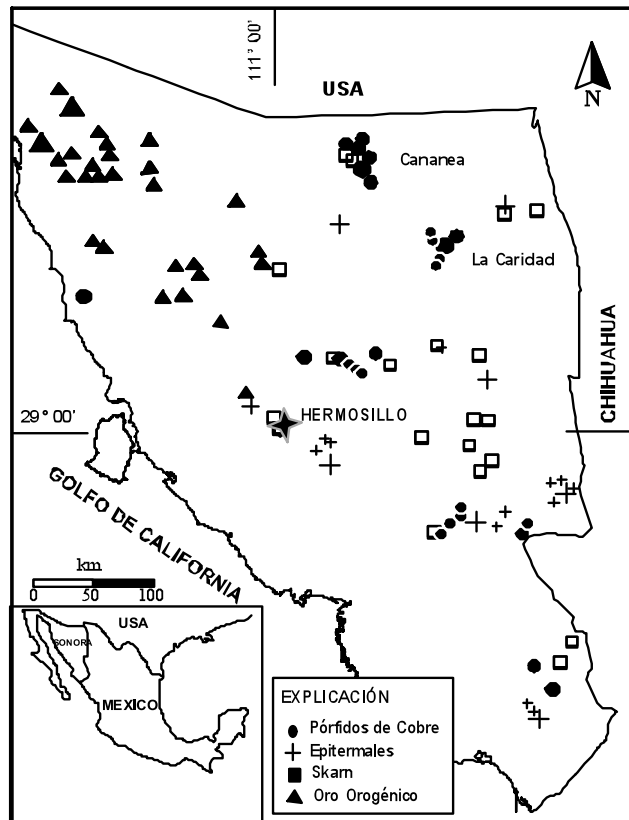


Figura 1. Localización y distribución de los depósitos minerales más importantes de pórfidos de cobre (círculos), epitermales (cruces), skarn (cuadros) y oro orogénico (triángulos) en el Estado de Sonora.

Acompañando a estos dos grandes depósitos de menor tamaño como Milpillas, Mariquita, Piedras Verdes, Suaqui Verde, Cuatro hermanos etc., y más de 20 localidades con buenas perspectivas económicas. Por otro lado, la fuerte relación genética que tienen este tipo de yacimientos minerales con la evolución y cristalización de cuerpos magmáticos de dimensiones batolíticas, como ha sido señalado por Sillitoe (1973), Titley y Beane (1981), sugiere una fuerte posibilidad de encontrar otros depósitos minerales asociados a este ambiente magmático-hidrotermal, como son cuerpos de brechas magmáticas (breccia pipes), skarn de Cu-Zn-Pb, W y Fe, reemplazamientos de Pb-Zn, vetas de metales base, así como depósitos de U y REE relacionados a cuerpos pegmatíticos profundos, o vetas con mineralización de uranio de origen ígneo. Recientemente, el conocimiento más amplio sobre la evolución de los cuerpos supergénicos en los depósitos de pórfido de cobre y la mayor comprensión sobre la evolución tectónica-estructural del noroeste de México, disponen de un escenario geológico-tectónico propicio para la formación de depósitos de cobre exótico, dentro y a lo largo de grandes cuencas tectónicas que generalmente flanquean a estos grandes sistemas.

En el caso de los depósitos de Au, se tiene un claro conocimiento sobre la disposición y distribución de distintos tipos de mineralización de Au (Ag), Au-Ag y Au como es el caso de Mulatos, El Tigre y Santa Gertrudis, respectivamente. También se cuenta con algunos pequeños depósitos de Au (Pb-Zn) al sur del poblado de Álamos en la porción sur-sureste del estado, y con una serie de depósitos de Au (Cu), mayormente distribuidos en el oeste-noroeste de Sonora, los cuales están asociados a zonas de metamorfismo y zonas de dilatación a partir de esfuerzos compresivos, recientemente catalogados como depósitos de oro en zonas de cizalla u oro orogénico. Los de mayor potencial y más conocidos de este último tipo de yacimientos de Au en Sonora son La Herradura con más de 4 millones de onzas de oro cubicadas, y La Choya, con 2 millones de onzas de oro. En esta misma zona, se tiene una serie de prospectos y proyectos, los cuales están en etapa de exploración (Tajitos, Noche Buena, Sierra Pinta) y otros recientemente en operación como es el caso de El Chanate.

Dentro de la geografía del Estado de Sonora se tienen una serie de yacimientos minerales, cuya formación y génesis ha sido poco entendida, como aquellos de Au de placer localizados en el noroeste y centro de Sonora. Por otro lado, en la actualidad se conocen una serie de estructuras metamórficas

Terciarias desarrolladas en una etapa distensiva, acompañado de una fuerte exhumación de rocas jóvenes de la parte superior de la corteza, conocidos como complejos metamórficos (*metamorphic core complexes*), las cuales durante su evolución estuvieron acompañadas por mineralización de Au acomodada a lo largo de estructuras sub-horizontales, como es el caso de Lluvia de oro y La Jojoba, con el desarrollo de depósitos de oro de placer asociados durante su exhumación.

También se tiene la presencia de atractivos cuerpos evaporíticos incluidos en grandes y alargadas cuencas terciarias con orientación NNW-SSE, algunas de ellas conteniendo minerales como tenardita (NaSO_4), mineralización de boro del tipo colemanita [$\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11}\cdot 5(\text{H}_2\text{O})$], y trona [$\text{Na}_3(\text{CO}_3)(\text{HCO}_3)\cdot 2(\text{H}_2\text{O})$], con un conocimiento pobre sobre su evolución y formación.

Hacia el centro-sur del Estado se tiene la presencia de mineralización de bario (barita), hospedada en rocas de ambiente de aguas profundas del Paleozoico (Poole et al. 1991), donde parecen definir un tipo de mineralización exhalativa asociada a fumarolas hidrotermales, para las cuales Turner y Einaudi (1986) sugieren una posible asociación con depósitos polimetálicos de Pb-Zn, que se extienden desde el noroeste de Estados Unidos y se internan en el noroeste de México. Esta idea, aunque ha sido retomada por algunos investigadores, poco o casi nada se ha logrado comprobar en la región. Recientemente, bajo este mismo concepto tectónico-estructural para el noroeste de México, se ha especulado sobre la presencia en Sonora de depósitos conocidos como IOCG (Iron Oxide-Copper- Gold deposits), con muy escasa información acerca de ellos en esta región de México.

La gran diversidad y distribución de yacimientos minerales en el Estado de Sonora, impide hacer una descripción amplia y detallada de cada tipo de depósito, por lo que en la Figura 1 se consideran solo aquellos yacimientos minerales de mayor relevancia económica y geológica, como los depósitos de tipo pórfido de cobre, epitermales, skarn y oro orogénico.

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LOS DEPÓSITOS MINERALES EN SONORA

En la Figura 2, se aprecia que en el NW de México se presenta una distribución espacial y temporal de algunos yacimientos minerales que por sus características geológicas, mineralógicas y estructurales conforman provincias metalogénicas muy claras, las cuales presentan una clara relación metalogénica a una zona de subducción activa durante el mesozoico y gran parte del terciario, como ha sido sugerido por varios autores entre ellos Clark et. al., (1982); Barton et al., (1995).

Como se puede apreciar, los depósitos de Au Orogénicos, aparecen exclusivamente en la porción más al noroeste del Estado y se caracterizan por una constante asociación a rocas metamórficas de facies esquistos verdes del precámbrico, aunque algunos depósitos se hospedan en rocas volcánicas y/u volcanosedimentarias, con edades que van desde el Proterozoico al Eoceno, con variaciones en su grado metamórfico pasando de esquistos verdes a granulitas, como ha sido indicado por Noriega-Martínez (2006), Araux-Sánchez (2000) y Quintanar-Ruiz (2008). También se tienen vetas con oro hospedadas en cuerpos intrusivos, como sucede en rocas leucograníticas en los depósitos de San Francisco en Estación Llano (Pérez-Segura et al., 1996), y La Choya.

La mineralización en la gran mayoría de estos depósitos está estructuralmente controlada principalmente en sistemas NW-SE y NE-SW, producto de la compleja historia de deformación en el noroeste de México y suroeste de Estados Unidos (Quintanar-Ruiz, 2008), y comúnmente relacionada a vetas de cuarzo, zonas de cizalla y stockworks asociadas a fallas de bajo ángulo y brechas. Los minerales asociados a las vetas de cuarzo con oro consisten de turmalina, hematita, ankerita, pirita, galena, esfalerita, calcopirita, entre otros.

Edades de la mineralización en este tipo depósitos van del Cretácico tardío y parte del Terciario-medio (Staude and Barton, 2001). Iriondo y Atkinson (2000) reportan un rango de edades entre los 60 a 48 Ma para la mineralización de oro en la región de Quitovac. Araux-Sánchez (2000) presenta una edad de 54.8 ± 1.4 Ma para la mineralización en Sierrita Pinta, mientras que Pérez-Segura (1993) reporta una edad de 49.2 ± 2 Ma para moscovitas relacionadas a las vetas en Tajitos. Recientemente, Quintanar-Ruiz (2008), muestra una edad de 61.0 ± 2.1 Ma de Re-Os en pirita y magnetita asociada a la mineralización de oro en el depósito La Herradura.

Dada la estrecha relación espacial de los depósitos de oro con la postulada Mojave-Sonora Megashear, ayuda a pensar en la posibilidad de una asociación temporal con esta mega estructura. Sin embargo, datos geocronológicos en este tipo de depósitos muestran una coincidencia con el periodo de la orogenia Laramide, la cual precede a los eventos tectónicos distensivos del Terciario (Iriondo y Atkinson, 2000). Recientemente Iriondo (2009), sugiere un arreglo distinto, con la presencia de un “dobles oroclinal” del basamento proterozoico, más que una estructura de corrimiento sinistral como fue sugerido por Anderson y Silver (1979). Por lo que probablemente, estructuras de gran escala como la postulada Mojave-Sonora Megashear, parece no tener relación genética con este tipo de depósito.

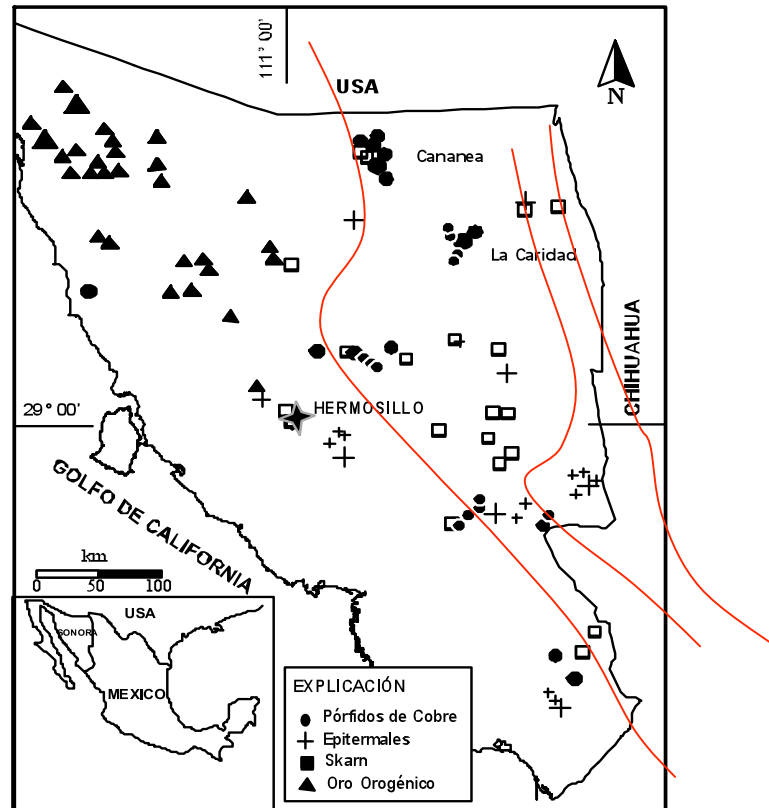


Figura 2. Localización y distribución de los depósitos minerales más importantes en el Estado de Sonora, mostrando además, los límites entre provincias metalogénicas de porfidos de cobre (círculos), epitermales (cruces), skarn (cuadros) y oro orogénico (triángulos).

En el caso de los depósitos magmáticos-hidrotermales, también pueden ser delineados en una franja en el centro del Estado (Figura 2), donde se distribuyen una serie de depósitos minerales que van desde Pórfidos de cobre, skarn de Cu-Zn, Fe y W; reemplazamiento de Pb-Zn, los cuales parecen guardar una asociación genética con la evolución de los cuerpos batolíticos tan frecuentes en esta parte del país. En el caso de los primeros guardan una clara relación en tiempo y espacio con intrusiones graníticas laramídicas cuyas edades varían entre 80 a 40 Ma, con grandes áreas (centenares de km²) de alteración hidrotermal, relacionados en la mayoría de los casos a cuerpos sub-volcánicos o cuerpos hipabisales que varían en composición desde monzonitas a cuarzo-dioritas. La mineralización en estos depósitos se encuentra principalmente en zonas de “stockwork” o en forma diseminada, la mayoría de las veces en rocas volcánicas pre-laramídicas o comagmáticas, y aún dentro de los mismos cuerpos intrusivos sub-volcánicos. Sus leyes de cobre en la mineralización hipogénica fluctúan entre 0.2 a 0.3% de Cu, las altas leyes de cobre y su gran tonelaje proviene de potentes cuerpos horizontales (*blankets*) de enriquecimiento supergénico, compuestos por limonitas conteniendo hematita, gohetita y jarosita mezclada con arcillas supergénicas, las cuales han sido desarrolladas en las partes superiores de estos sistemas como producto de mezcla de aguas meteóricas y fluidos de origen magmático.

Por otro lado, mineralización hipogénica de alta ley pero de moderado tonelaje es desarrollada en zonas de skarn, como es el caso del distrito de Cananea, con mineralización de Zn-Cu, producto del

reemplazamiento de rocas carbonatadas paleozoicas intercaladas con cuarcitas (Meinert, 1982), donde se tienen más de 30 Mt con leyes del orden de 3% de Cu y 0.8% de Zn. Algunos depósitos de este tipo presentan mineralización dentro de zonas de brechas "pipe" en la cúpula de cuerpos intrusivos y posterior relleno de fluidos inmiscibles originados a partir de un magma a profundidad como ocurrió en la brecha La Colorada en Cananea (Bushnel, 1988), o María en el mismo distrito (Wodzicki, 2001), La Caridad (Pilares de Nacozari), El Batamote, El Alacrán y Cumobabi (Scherkenbach et al. 1985). De la misma forma, se tienen una variedad de depósitos de skarn de Fe, asociados a este tipo de sistemas magmático hidrotermal, como se aprecia en el centro-sur del Estado, donde pequeños yacimientos se distribuyen en la periferia de estos sistemas. También, depósitos de W, REE, U, guardan una relación temporal y espacial, pero con la parte superior de la cúpula de los grandes cuerpos batolíticos asociados, como es el caso de los depósitos de skarn de W, distribuidos en gran parte del estado, como fue mencionado por Mead (1988).

Dentro de este mismo escenario pero aparentemente posteriores a este tipo de ambiente magmático-hidrotermal, se tienen una serie de depósitos del tipo hepitermal, los cuales parecen haber evolucionado durante el terciario medio, alrededor de 26-30 Ma, y pueden ser incluidos dentro de la gran provincia de depósitos epitermales definida por Clark et al. (1982), Staude y Barton (2001), Camprubi y Albinson (2006). Generalmente se encuentran hospedados y asociados a las rocas volcánicas de la Sierra Madre Occidental distribuidos preferentemente en su parte centro-oriental del Estado de Sonora y en las estribaciones de la Sierra Madre Occidental. Para esta región del país, se tienen localizados alrededor de 7 distritos mineros conteniendo depósitos epitermales definidos en su mayoría como de baja sulfuración (adularia-sericita) de acuerdo a la presencia de vetillas de cuarzo \pm calcita con clorita + adularia +sericita, y solo uno de ellos como de alta sulfuración (Staude y Barton, 2001). La mayoría de los depósitos epitermales en Sonora, presentan mineralización de Ag (Au), Au-Ag y metales base, principalmente en depósitos en forma de vetas, zonas de brechas, stockwork o diseminados, los cuales están hospedados en una gran variedad de ambientes litológicos.

CONCLUSIONES

Nuevos datos geológicos, geoquímicos y geocronológicos en Sonora permiten separar en tiempo y estilos de mineralización los diferentes depósitos minerales más importantes en esta región del país, y que seguramente ayudaran a la mejor agrupación y distribución de estos depósitos, los cuales sin duda apoyarán en la implementación de estrategias para la exploración de estos tipos de depósitos en Sonora.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFIAS

- Anderson, T.H., and Silver, T.H., 1979, The role of the Mojave-Sonora Megashear in the tectonic evolution of northern Sonora, in Anderson, T.H., y Roldán-Quintana, J., eds., *Geology of northern Sonora*: University of Pittsburgh y Universidad Nacional Autónoma de México, Geological Society of America, Annual Meeting, San Diego, Guidebook, Fieldtrip 27, p. 59–68.
- Araux-Sánchez, E., 2000, *Geología y yacimientos minerales de la Sierra Pinta, Municipio de Puerto Peñasco, Sonora*. Tesis de Maestría. Universidad de Sonora. pp. 121.
- Barton, M.D., Staude, J.M., Zürcher, L., and Megaw, P.K.M., 1995. Porphyry Copper and other intrusion-related mineralization in Mexico, in Pierce, F.W., and Bolm, J. G. (eds.), *Porphyry copper deposits of the American Cordillera*: Arizona Geological Society Digest 20, 487–524.
- Bushnell, S.E., 1988, Mineralization at Cananea, Sonora, Mexico, and the paragenesis and Zoning of Breccias Pipes in Quartzfeldspathic Rock: *Economic Geology* v.83, p. 1760–1781.
- Camprubi, A. y Albinson, T., 2006, Depósitos Epitermales en México: Actualización de su Contenido y Reclassificación Empírica: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Tomo LVIII, N° 1, pp 27–82.
- Clark, K.F., Foster, C.T., and Damon P.E., 1982, Cenozoic mineral deposits and subduction-related magmatic arcs in Mexico, *Geological Society of America Bulletin* 93, p.533–544.
- Iriondo, A., and Atkinson, W.W., 2000, Orogenic gold mineralization along the proposed trace of the Mojave-Sonora Megashear; evidence for the Laramide Orogeny in NW Sonora, Mexico (in *Geological Society of America, 2000 annual meeting, Anonymous*.) Abstracts with Programs 32(7): 393.
- Iriondo, A., Premo, W.R., 2009, Las rocas cristalinas del Proterozoico de Sonora y su importancia para la reconstrucción del margen continental SW de Laurentia: La pieza mexicana del rompecabezas para el supercontinente Rodinia, en Calmus, T., ed., *La geología de Sonora*, Publicaciones Especiales, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, (en prensa).

- Mead, R., Kesler, S.E., Foland, K.A., Jones, L.M., 1988, Relationship of Sonoran tungsten mineralization to the metallogenic evolution of Mexico: *Economic Geology*, 83, 8, 1943–1965.
- Meinert, L. D., 1982, Skarn, manto, and breccia pipe formation in sedimentary rocks of the Cananea mining district, Sonora, Mexico: *Economic Geology*, 77, 919-949.
- Noriega-Martínez, O., 2006, Evidencias de dos etapas de mineralización de oro mesotermal en las áreas de Tajitos, Juárez-San Francisco, en la región de Caborca, Sonora México. Tesis de Maestría. Universidad de Sonora. pp. 81.
- Pérez-Segura, E., 1993, Los yacimientos de oro y plata de Sonora, México y sus relaciones con la geología regional. En Delgado-Argote L.A. y Barajas, M (Eds.). *Contribuciones a la tectónica del Occidente de México. Unión Geofísica Mexicana. Monografía No. 1.* p. 147–174.
- Pérez-Segura, E., Cheilietz, A., Herrera-Urbina, S., Hanes, Y.J., 1996, Geología, mineralización, alteración hidrotermal y edad del yacimiento de oro de San Francisco, Sonora – un depósito mesotermal en el Noroeste de México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 13(1), 65–89.
- Poole, J.J., Amaya-Martínez, R., Page, W.R., 1991, Silurian and Devonian carbonate –shelf rocks and Lower Jurassic sequence near Rancho Placeritos, west-central Sonora, U.S. Geological Survey, 24 p.
- Quintar Ruíz, F., 2008, La Herradura Ore Deposit: An Orogenic Gold Deposit in Northwestern Mexico: Master of Sciences Thesis, University of Arizona, 97 p.
- Scherkenbach, D.A., Sawkins F.J., and Seyfreid W.Jr., 1985, Geologic, fluid inclusions, and geochemical studies of the mineralized breccias at Cumobabi, Sonora, México: *Economic Geology*, v. 80, pp. 1566–1592.
- Sillitoe, R.H., 1973, The Tops and Bottoms of Porphyry Deposits. *Econ. Geol.* v.68, p. 799-815.
- Stade, J.M., and Barton, M.D., 2001, Jurassic to Holocene tectonics, magmatism, and metallogeny of northwestern Mexico: *Geological Society of America Bulletin*, v. 113, p. 1357–1374.
- Titley, S.R. and Beane R.E., 1981, Porphyry Copper Deposits: Part I. Geological Setting, Petrology, and Tectonogenesis pp. 214-235. in Brian J. Skinner Editor, *Seventy-Fifth Anniversary Volume, Economic Geology.*, 964 pp.
- Turner, R.J.W., and Einaudi, M.T., 1986, The Geological Setting and Genesis of the South zone Stratiform Pb-Zn-barite Deposits, Macmillan Pass, Yukon: in Turner R.J.W. and Einaudi M.T., eds., *The genesis of stratiform sediment-hosted lead and zinc deposits: conference proceedings* pp. 5–12.
- Wodzicki, W.A., 2001, The Evolution of magmatism and mineralization in the Cananea district, Sonora, México: *Society of Economic Geologists, Special Publication 8*, 243–263.