

Metalogénesis Andina

Jorge Oyarzún M.

Texto abreviado y adaptado al español a partir del artículo *Andean Metallogenesis: a Synoptical Review and Interpretation*. Para referencias bibliográficas y figuras [ir al trabajo original](#).



Los Pelambres, Región de Coquimbo, Chile (pórfido cuprífero)

Magmas y Depósitos Metalíferos Andinos

La cadena andina constituye el borde activo del continente sudamericano y al menos desde el Paleozoico superior ha sido un lugar de convergencia con subducción de placas oceánicas bajo la placa tectónica continental. Consecuencias de ello han sido la generación casi continua de magmas calcoalcalinos, así como una serie de episodios orogénicos, y varios eventos de acreción al borde continental de terrenos generados en otros ambientes tectónicos. En cambio, la mayor parte del continente situado al Este de la Cadena, está constituido por bloques tectónicos estables durante los últimos mil millones de años, como son los *escudos* de Brasil y de Guyanas o el Macizo Pampeano. Hasta hace unos 130 millones de años, Sudamérica estuvo unida con África, integrando junto a los continentes Antártico, India y Australia el Supercontinente Gondwana. Desde ese momento inició su desplazamiento hacia el Oeste, el que ha realizado siguiendo una trayectoria paralela a la línea ecuatorial (lo que explica el hecho de que, pese a las naturales fluctuaciones, el norte de Chile y el sur de Perú hayan mantenido condiciones de aridez o semiaridez a lo largo del tiempo geológico.

El hecho de constituir un borde activo, donde se conjuga un continuo magmatismo rico en metales, azufre y otras sustancias mineralizadoras con el desarrollo de estructuras como fallas y pliegues, que favorecen el transporte de magmas y soluciones hidrotermales, ha condicionado la formación de numerosos e importantes yacimientos metalíferos. Varios países andinos se sitúan entre los diez primeros del Mundo, ya sea en producción o reservas de antimonio, bario, berilio, bismuto, boro, cobre, indio, yodo, plomo, molibdeno, nitratos, platino, renio, selenio, plata, telurio, estaño, wolframio y zinc. Solamente en Chile, se concentra un cuarto de las reservas mundiales de cobre y un tercio de las de molibdeno del mundo.

La riqueza en metales de la Cadena se relaciona en primer lugar con su notable actividad magmática calcoalcalina, y la mayoría de sus depósitos metalíferos están directa o indirectamente asociados a ella. Aunque la mayor parte de las rocas ígneas plutónicas y volcánicas de edad paleozoica y mesozoica pertenecen a la serie calcoalcalina, también se asocian a ella rocas shoshoníticas (ricas en K) así como alcalinas (con alto K+Na). También hay basaltos toleíticos (propios de dorsales oceánicas) en prismas de rocas acrecionadas al borde continental en Ecuador y Colombia. Excepto estas últimas, la composición química e isotópica de las rocas andinas es consistente con un origen común, correspondiente a una cuña de manto litosférico situada entre la corteza continental y la placa oceánica subductada. Sin embargo, las variaciones composicionales sugieren que la participación relativa del manto y de la placa subductada no siempre fue la misma. Igualmente, el efecto de la corteza continental sobre los magmas que la atravesaron fue mínima en algunos casos y significativa en otros, lo que se expresa en la gama de valores de la relación isotópica inicial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. El mecanismo de generación magmática implica la participación de la corteza oceánica hidratada que cubre la placa litosférica subductada bajo el Continente, cuya fusión parcial aporta agua y otras sustancias volátiles, así como componentes silicatados de bajo punto de fusión. Ese aporte favorece la fusión, también parcial, de materiales silicatados del manto. Los magmas así formados ascienden a través del Manto y la Corteza y experimentan, en distinto grado, tanto procesos de diferenciación como de contaminación, hasta emplazarse, ya sea en profundidad (batolitos) o en niveles intermedios, o bien ser expulsados en la superficie como materiales volcánicos efusivos o piroclásticos.

Durante el proceso de ascenso de los magmas andinos, parte de las rocas volcánicas antes formadas pueden ser asimiladas por los nuevos magmas, un proceso bien establecido en el Batolito de la Costa de Perú, que ha sido calificado como *canibalístico* por los especialistas. Sin embargo, puesto que la composición de las rocas parcialmente asimiladas no difiere mucho de la de los nuevos magmas, ello afecta poco su composición química o isotópica. Una posible excepción corresponde a aquellos cationes de gran radio iónico, como K, Rb y Ba, así como a metales pesados de fácil extracción, como Pb, Cu, Mo y metales preciosos, los cuales podrían ser incorporados a la fase magmática, enriqueciendo su potencial metalífero.

Un tema de especial interés metalogénico se refiere al origen del azufre. Ello, considerando que este elemento es muy abundante en el volcanismo de zonas de subducción y juega un papel principal en el transporte hidrotermal y en la formación de la mayoría de los depósitos minerales andinos. De hecho, los yacimientos porfíricos de cobre (como Chuquicamata, Escondida, El Teniente, etc.) son esencialmente enormes concentraciones de azufre, que no solamente es el elemento más abundante, sino también el que está más enriquecido en términos relativos. Al respecto, todos los yacimientos asociados a rocas ígneas de la cadena andina presentan relaciones isotópicas $^{32}\text{S}/^{34}\text{S}$ propias de su origen magmático profundo. En cambio la situación es distinta en algunos depósitos metálicos situados en rocas sedimentarias propias de ambientes reductores, cuyas razones isotópicas muestran la influencia de bacterias, las que liberaron el ión sulfuro descomponiendo el ión sulfato disuelto en el agua.

Los pórfidos cupríferos son los yacimientos más importantes y los más estudiados de la cadena andina. Tanto sus razones isotópicas de estroncio como las de azufre indican el origen profundo de su mineralización y la escasa o nula influencia cortical. Estos yacimientos presentan su mayor riqueza entre Chile central y el sur de Perú, y se disponen en fajas longitudinales, paralelas al margen continental, ordenadas cronológicamente, las más antiguas al Oeste, las más jóvenes al Este. En Chile, las fajas más ricas son la de edad comprendida entre: 1) 43 y 30 millones de años, situadas en la Precordillera del norte de Chile, a la que pertenecen los

depósitos de El Abra, el Distrito Chuquicamata, Escondida, El Salvador y Potrerillos; y 2) 12 a 5 millones de años, situada en la cordillera andina de Chile central (Los Pelambres, Andina - Los Bronces y El Teniente). Varios de estos yacimientos alcanzan reservas de miles de millones de toneladas de mena. La distribución en fajas indica su notable control tectónico y directa relación con la subducción de la placa oceánica. Los antecedentes geológicos señalan también que su emplazamiento ocurrió en épocas compresivas, con escaso volcanismo, y que los magmas portadores de la mineralización ascendieron rápidamente, a la manera de *diapiros* magmáticos. Estos yacimientos reciben el nombre de *pórfidos* debido a su asociación a cuerpos de rocas magmáticas intrusivas emplazadas a una profundidad intermedia, lo que contribuye a que sus cristales presenten distinto tamaño (i.e., textura porfírica). Varios estudios han procurado establecer relaciones entre la composición químico-mineralógica de los cuerpos (normalmente granodioritas o cuarzo-dioritas) y su productividad mineralógica, sin lograr resultados concluyentes. En cambio la riqueza en elementos alcalinos (tendencia shoshonítica) parece ser importante, al igual que su capacidad para retener agua, azufre y otras sustancias volátiles durante su ascenso en el manto y la corteza.

El hecho de que las rocas ígneas del sur de Bolivia asociadas a la mineralización de estaño-plata muestren un carácter per-alumínico así como altas razones isotópicas iniciales de Sr, sugiere una participación importante de la corteza continental, que puede incluir la mezcla de magmas riolíticos continentales con otros de carácter andesítico-basáltico más profundos.

Finalmente, aunque la actividad magmática de la Cadena Andina ha sido casi continua, su actividad metalogénica es más bien episódica, lo que sugiere su asociación con eventos tectónicos importantes, los que llegaron a condicionar el emplazamiento de las cadenas magmáticas y por consiguiente, el de sus productos metalogénicos (p.ej., las fajas de pórfidos cupríferos). En consecuencia, el tema de la próxima sección es esencial para aproximarse a una comprensión del *funcionamiento metalogénico* de la cadena andina.

Tectónica Andina y Yacimientos Metalíferos

Aunque la actividad magmática ha provisto la fuente directa y los mecanismos físico-químicos para la generación de yacimientos metalíferos en la cadena andina, la tectónica ha controlado tanto la producción como el emplazamiento de los magmas, así como los canales para la circulación de los fluidos mineralizadores.

Tanto la evolución geológica como metalogénica de la Cadena durante las eras mesozoica y cenozoica puede ser explicada satisfactoriamente en términos de la interacción de la placa continental con placas oceánicas. Sus consecuencias incluyen la producción de magmas, la acreción de prismas oceánicos con materiales de dorsales y arcos de islas, el desarrollo de cuencas sedimentarias tras-arco, el desarrollo de episodios orogénicos, la formación de plegamientos, fallas y megazonas de falla, y la generación de yacimientos minerales.

En los Andes centrales y sudcentrales se reconoce la existencia de dos regímenes tectónicos diferentes respecto a las consecuencias de la convergencia placa oceánica-placa continental. Uno de carácter distensivo, previo a la separación de Sudamérica de África y a su migración hacia el Oeste, y otro compresivo, posterior a ese evento. En Chile, ese cambio se manifiesta en que la cuenca marina tras arco, situada entre la cadena volcánica y el continente,

deja de existir hace uno 100 millones de años atrás, dando lugar a cuencas continentales menores. Esto, al norte de la región de Magallanes, donde por el contrario se desarrolló un régimen marino, debido a que se sitúa en otro contexto de placas tectónicas, lo que explica la presencia del petróleo magallánico. Por otra parte, en torno a los 110 millones de años atrás, se produjo también una notable actividad de la dorsal oceánica donde se generaba la placa oceánica (evento tipo *súper pluma*) que debe haber incrementado mucho la cantidad de corteza subductada a ambos lados del actual Pacífico. Es interesante el hecho de que ello coincide con la edad de numerosos yacimientos de cobre (Candelaria, El Soldado etc) y hierro (Algarrobo, Los Colorados, etc.), tanto en Chile central y norte como en el sur de Perú (Raul-Condostable, etc.). Recientemente se ha reconocido un hecho análogo en el margen asiático de la cuenca Pacífica, lo cual ilustra la simetría metalogénica de la Cuenca, así como la importancia del evento.

La sistemática migración del magmatismo hacia el Este implica que la corteza continental ha sufrido un importante grado de *erosión tectónica* en su continua interacción con la placa oceánica a lo largo del Mesozoico y Cenozoico. En el Mioceno medio ello se sumó al probable efecto de un ensanchamiento de la faja magmática, seguramente debido a la disminución del ángulo de subducción de la placa oceánica. Durante ese episodio se formaron varios pórfidos cupríferos en el actual territorio argentino.

Otro tema importante se refiere al ángulo entre la línea de convergencia entre ambas placas y la dirección de movimiento de la placa oceánica. Cuando esa convergencia se produce en dirección oblicua, la presión resultante implica un componente vectorial paralelo a la faja andina. La consecuencia de ello es el desarrollo de grandes fallas longitudinales, como la mega zona de falla de Atacama, en la Cordillera de la Costa, o la Falla Domeyko, ambas en el norte de Chile, y que controlaron el emplazamiento de importantes yacimientos de Fe-Cu-Au (en la de Atacama) y de pórfidos cupríferos (en la de Domeyko), como Chuquicamata y La Escondida. Las megazonas de falla controlaron el acceso de los magmas en los niveles corticales superiores, al igual que la circulación de los fluidos hidrotermales. Sin embargo, su localización fue, a la vez, controlada por la posición de las líneas de ascenso magmático, dado que el flujo térmico debilitó la corteza continental, favoreciendo su ruptura y el desarrollo de fallas transcurrentes. En consecuencia, los factores causales efectivos fueron la oblicuidad de la convergencia de placas y la posición e inclinación de la zona de subducción, los que controlaron la localización de la línea de ascenso de magmático, cuya debilidad determinó a su vez la ocurrencia de las grandes fallas o zonas de falla de carácter transcurrente a escala cortical.

La Zonación Metalogénica y la Evolución de la Cadena Andina

Respecto a estas materias hay tres temas principales que considerar: la segmentación tectónica de la cadena andina, la distribución transversal de sus provincias metalíferas, y la evolución metalogénica de la Cadena. Al respecto, la cadena andina presenta cuatro provincias principales, de Oeste a Este, las provincias ferrífera (con Cu y Au), cuprífera (con Mo y Au), polimetálica (Zn, Pb, Ag) y estannífera (con W y Ag).

Las posibles relaciones entre la segmentación tectónica de la Cadena y el desarrollo longitudinal de sus fajas metalíferas fue propuesta primero por Sillitoe (1974), quien distinguió 16 límites tectónicos entre las latitudes 0° y 44°S. Dichos límites fueron propuestos sobre la base de criterios geológicos, geomorfológicos, sísmicos, magmáticos, y de relación con estructuras mayores del Océano Pacífico, que coinciden con límites longitudinales de las fajas metálicas.

Así, la cadena estañífera de Bolivia se restringe a tres segmentos, y está limitada por los bordes 5 (límite norte del campo volcánico reciente de los Andes Centrales) y 8 (límite norte de la Cordillera de Domeyko). Respecto a la razón de ser de los límites longitudinales de las fajas o provincias metalíferas, es probable que ellas respondan a distintas causas. Por ejemplo, la faja estannífera, la más corta, coincide bastante con la parte central de la cadena andina, donde la corteza alcanza su mayor espesor y la Cordillera de los Andes su mayor ancho. Ello es coincidente con el probable papel de la corteza en la formación de sus yacimientos. En otros casos, es probable que los límites de las fajas metalíferas correspondan a efectos del nivel de erosión, determinado a su vez por el alzamiento relativo de los bloques tectónicos. Así, el límite norte de la faja ferrífera de Chile coincide con la erosión de la cubierta de rocas estratificadas (principalmente volcánicas), que cubren los cuerpos de rocas plutónicas que las intruyeron, situándose los principales yacimientos cerca de los contactos intrusivos. En el caso de la provincia polimetálica, su mayor desarrollo coincide con las secuencias de rocas sedimentarias marinas carbonatadas o clásticas de grano fino de la cuenca tras arco, cuyo mayor exposición se encuentra en Perú, el país más rico en este tipo de yacimientos. Por otra parte, también el clima, junto con la tectónica, han desempeñado un papel principal en el enriquecimiento secundario de los yacimientos de cobre, debido a la meteorización y erosión de los bloques mineralizados. En consecuencia aquí juegan dos factores complementarios: Por una parte, la provincia cuprífera (como las otras provincias metalíferas andinas) es más rica en los Andes centrales, pero ello ha tenido un importante complemento en el aumento de la ley de sus depósitos, debido al enriquecimiento secundario, posibilitado por la tectónica y por el clima árido o semiárido prevaleciente en ese sector andino.

Respecto a la zonación transversal de la cadena, igualmente parece necesario invocar más de un factor. También es necesario considerar que, mientras los yacimientos de cobre como los polimetálicos se formaron entre el Triásico superior y el Plioceno, la faja ferrífera está confinada al Jurásico-Cretácico inferior (con la sola excepción de un depósito Plio-Cuaternario: El Laco), y la mineralización de estaño está confinada a dos etapas, una en el Mesozoico inferior (parte norte, con Sn-W) y otra en el Terciario (parte sur, con Sn-Ag). En consecuencia, hierro y estaño no se formaron continuamente, y por lo tanto no cabe pensar en un proceso tipo *geostill* que genere de modo permanente mineralizaciones distintas de Oeste a Este de la Cadena Andina (controlado por el proceso de subducción de la placa oceánica, que la lleva a niveles más profundos mientras más se aleja de la fosa oceánica). En conclusión, podríamos decir que la faja ferrífera respondió a condiciones especiales (un magmatismo máfico, controlado por una gran zona de falla, con abundante disponibilidad de halógenos que facilitaron la segregación y migración del Fe). Igualmente, es muy probable el papel que jugó una corteza continental engrosada en el emplazamiento de las fajas estanníferas a lo largo de la Cordillera Oriental de Bolivia. Respecto a la faja polimetálica, ya hemos señalado su asociación con las rocas sedimentarias marinas de las cuencas tras arco. Tanto en ella como en la faja cuprífera de afinidad más ígnea, el azufre y sus estados de oxidación han jugado un papel central. En efecto, el magmatismo calcoalcalino es rico en azufre por el aporte de las placas oceánicas subductadas. Sin embargo, como demostraron Burnham y Ohmoto, ello sería insuficiente si no existieran las condiciones oxidantes, propias del magmatismo calcoalcalino, que permiten liberar al azufre y convertirlo en un poderoso agente mineralizador. Ello se manifiesta directamente en la provincia cuprífera y de modo menos directo en la polimetálica, donde intervienen también otros factores que favorecen la migración y concentración de Zn, Pb y Ag, en los estratos de rocas sedimentarias.

Si se considera la posición de las provincias o fajas cuprífera y estannífera a ambos lados del Océano Pacífico, es notable la simetría especular que se observa, con la faja cuprífera

más cercana a los bordes de convergencia de placas y la estannífera más alejada de ella. También es un hecho notable la falta casi absoluta de minerales de estaño en el territorio chileno y la muy limitada presencia de yacimientos de cobre en Bolivia. En consecuencia, es evidente la relación existente entre el ambiente geotectónico, la posición de las fajas metalíferas, y el papel que ha cumplido al respecto la subducción de placas oceánicas bajo el Continente.

Finalmente, cabe analizar la notable riqueza de los yacimientos de edad terciaria, esto es, los más jóvenes de las provincias cuprífera y estannífera. Es difícil decidir entre atribuirla a un menor grado de erosión (que ha preservado los niveles más ricos) o invocar el efecto del mayor grado de evolución de la Cadena. Al respecto, un argumento favorable a la segunda posibilidad es la notable riqueza relativa que alcanzan las distintas provincias metalíferas en los Andes centrales, que por otra parte presentan una corteza engrosada. A este respecto, la evolución metalogénica de los arcos de islas, como el de Fidji ofrece una interesante analogía. En efecto, durante su corta vida el desarrollo incipiente de una corteza ha sido acompañado no solamente por un aumento en el número y magnitud de sus depósitos metalíferos, sino también por la variedad de los yacimientos formados. Naturalmente la cadena andina involucra una mayor complejidad geológica, pero al menos es probable que el curso de su evolución en el lapso Mesozoico – Cenozoico haya contribuido a generar los enormes yacimientos tipo pórfido de Cu-Mo de su segmento central.

Volver a Geología y Yacimientos Minerales