



## Controles tectonomagmáticos en la exploración de depósitos minerales en terrenos Jurásicos – Cretácicos entre Punta Bombón y Mollendo

Denis Cahuana<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ingemmet, Av. Canadá 1470, San Borja, Lima, Perú (cahuana.explo@gmail.com)

### 1. Introducción

Este trabajo es una síntesis de los métodos y herramientas utilizados en la exploración de depósitos ocultos. Con la obtención de imágenes aeromagnéticas y características de los depósitos porfiríticos de cobre (DPC) se podrá evidenciar la continuidad o no de los depósitos ocultos como es el caso de Tía María – La Tapada. Este tipo de yacimientos han sido cubiertos por formaciones posteriores, tales como rocas sedimentarias, rocas volcánicas o conglomerados recientes. Se conocen numerosos yacimientos de este tipo, como: Tía María – La Tapada (Islay, Arequipa), Pampa de Pongo (Caravelí, Arequipa), yacimiento Candelaria (Copiapó, Chile).

El área del presente trabajo está ubicada en la Cordillera de la Costa, entre Punta Bombón y Mollendo. La geología de la región comprende principalmente el Complejo Basal de la Costa (CBC; granulitas, migmatitas, anfíbolitas y rocas graníticas) (Nuñez, 2009), las que tienen un bajo grado de metamorfismo (Mamani, 2009) y rocas magmáticas intermedias a básicas del Jurásico-Cretácico. Los arcos magmáticos desarrollados en la Cordillera de la Costa son representados por las Súper Unidades Punta Coles e Ilo, Formación Guaneros y los volcánicos Chocolate. El análisis tectónico, la interpretación aeromagnética y geoquímica de estos dos arcos muestran posibles áreas favorables para el emplazamiento de cuerpos ígneos que podrían haber generado yacimientos minerales (Martínez et al, 2017). Este magmatismo originado en tiempos del Jurásico se interpreta como una convergencia oblicua producto de la dorsal que separaba las placas de Phoenix y Farallón, la cinemática fue mayormente transtensiva dextral y originó un sistema de Arcos

Insulares (Formación Guaneros). Además, los primeros cuerpos subvolcánicos que intruyeron corresponde a la Formación Guaneros (en la faja costanera), que generaron los primeros prospectos y anomalías de DPC (Cachuyo Cachuyito, Canicora y La Llave; Martínez et al, 2013). Los datos estructurales de terreno y las anomalías magnéticas (RTP) al parecer demuestran ser complementarios, existe una buena correlación entre el sistema de fallas y las interpretaciones magnéticas (*Figura 5*).

### 2. Marco geológico regional

Los depósitos del pórfido se asocian con las zonas de subducción y generalmente se forman en arcos magmáticos calcoalcalinos / alcalinos, estos depósitos a diferentes profundidades causan distintos halos geoquímicos de superficie, dichos halos primarios se caracterizan por el enriquecimiento de elementos, agotamiento de metales y / o alteraciones) (Hosseini, S., 2016). Los movimientos de las zonas de cizallamiento dan como resultado lineamientos coincidentes con fallas, lo que origina la mayoría de estas estructuras geológicas (Gay. P., 2012).

El área es dominada por el sistema sinistral Arampal – Ozorin – Ilo – Cocachacra con una orientación de N 123°. En este sistema los buzamientos de falla varían de 90° (dominante) a 75° NE? (*Figura 1*; (Chara, 2008). Esto es corroborado en el presente trabajo, donde se realizó un mapa de lineamientos superficiales y lineamientos magnéticos que fueron reprocesados con nuevos algoritmos y filtros (1ra. derivada, 2da. derivada, derivada horizontal, señal analítica, reducción al polo).

Según el diagrama de Rosas elaborado a partir de datos obtenidos de un DEM se reportó 923 lineamientos superficiales entre los cuales se distinguen 4 diferentes direcciones, como se detalla a continuación: 1<sup>ra</sup> una orientación Andina NO-SE N138°, 2<sup>do</sup> N15°, 3<sup>ro</sup> N68° y finalmente el 4<sup>to</sup> E-O, estas a su vez coinciden con la orientación preferente de los lineamientos magnéticos, obtenidos a partir de la aplicación del filtro de reducción al polo (RTP). Del total de lineamientos se pudo comprobar que la 1<sup>ra</sup> orientación representa el 69% mientras que la segunda, tercera y cuarta solo el 31%. Asimismo, en campo el sistema dominante varía entre N105, N150 (Formación Guaneros), la que guarda estrecha relación con los lineamientos.

Las épocas entre el Jurásico Medio-Superior y Cretáceo Inferior alojan principalmente depósitos de óxidos de Fe-Cu-Au y pequeños pórfidos de Cu ubicados en la Cordillera de la Costa. (Acosta, 2006), esto es evidente porque las anomalías de óxidos de Fe (ICP-MS) son dominantes hacia Mollendo mientras que en inmediaciones de Punta de Bombón los prospectos de Cu son mayores como Cachuyo, Cachuyito, Posco y La Llave, los que se encuentran distales de los depósitos de óxidos de Fe al NO de Tía María.

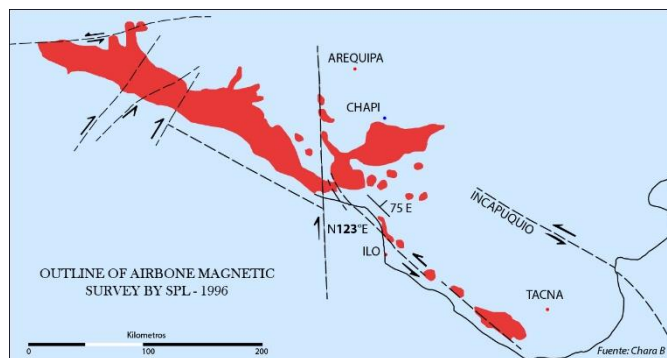


Figura 1. Falla Dextral en el área de Cochachaca. Tomado de Chara, 2006.

Por otro lado, los valores de algunos elementos como el Au, Ag y metales base, en algunos sectores son altos, se piensa que estos metales son periféricos a DPC. Estos metales tienen valores altos y demuestran el potencial de mineralización de Au dentro de zonas aproximadamente concéntricas a los DPC, en otros lugares la zona rica en Au cae fuera del cuerpo de mineral de Cu y dentro del halo de Pb y Zn, esta zona es conocida como la zona intermedia del Au (Jones, 1991), esto se evidencia claramente en uno de los proyectos, donde los valores de Zn varían de 10 a 147 ppm y el Pb esta entre 1.2 a 11.8 ppm con leyes de Au. Estos a su vez se encuentran entre altos y bajos magnéticos (Figura 2). También, las señales magnetotelélicas (1:100,000) sugieren áreas potenciales

dispersas, que podría postularse como un clúster en Cochachaca en dirección NO.



Figura 2. Exproyecto Cachuyo, en medio de los altos magnético y bajos magnéticos.

El prospecto Cachuyo es el más antiguo (166 Ma) de los pórfidos de Cu del Jurásico Medio-Superior, que se encuentran en Cochachaca y alrededores. La mineralización supérgena comprende óxidos de Cu y Fe, y suprayacen a un horizonte débil de calcocita. Al NE de Cachuyo se encuentra el prospecto Cachuyito, con la misma edad, donde se distinguen óxidos de Cu asociados a un *stockwork* en una andesita biotitizada de la Formación Chocolate. En Pampa Colorada está expuesta la zona lixiviada de hematita-goethita del prospecto Posco (Jurásico Medio) con abundantes fracturas cubiertas de hematita y *stockwork* de cuarzo con un ensamble de alteración cuarzo-sericita-arcilla y relictos diseminados de piritita. Al N de Cochachaca se encuentra el prospecto La Llave, datado en 155 Ma y presenta vetas de jarosita marrones que afloran en la Pampa de La Joya (Quang et al., 2005), mientras Tía María se estima en 145 a 160 Ma (Mioduchowski, 2001).

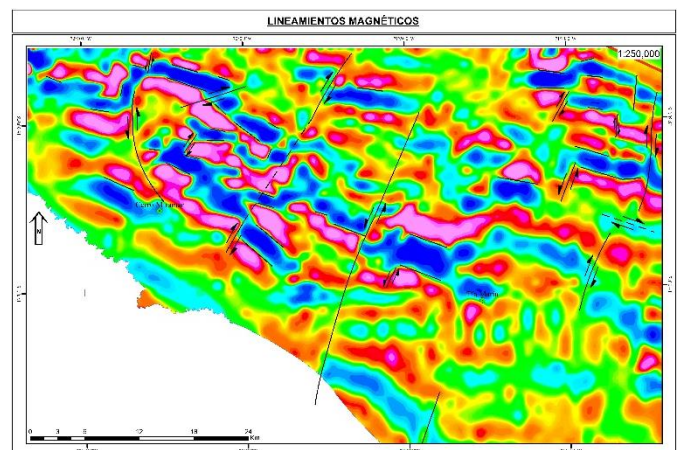


Figura 3. Fallamientos transcurrentes entre Punta de Bombón y Mollendo.

Las anomalías magnéticas (RTP, ASA, DH, 1DV, 2DV) muestran el desplazamiento horizontal de grandes masas con anomalías magnéticas fuertes y bajas, interpretándose como desplazamientos

transcurrentes sinestrales / dextrales, principalmente las fallas mayores de dirección NE-SO.

Para Tía María los patrones muestran enriquecimiento en tierras raras ligeras (LILE; Light Rare Earth Elements), además el patrón “forma de cuchara” sugiere fraccionamiento de anfíbol. La Tapada muestra menor diferenciación y un patrón más primitivo. La ausencia del empobrecimiento en tierras raras pesadas (HREE; Heavy Rare Earth Elements) indica que este sistema se desarrolló en una corteza delgada a moderadamente gruesa, controlada principalmente por el fraccionamiento y fusión de anfíbol. (Martínez et al, 2017).

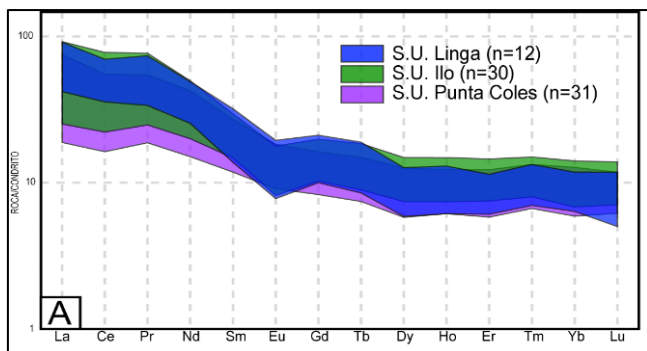


Figura 4. Diagramas REE y Spider para las principales unidades del Jurásico. Tomado de Martínez et al, 2017.

### 3. Marco tectonomagmático

En la zona comprendida entre 72°5' W a 71°40' W, el arco magmático continental estuvo activo desde el Jurásico Inferior al Cretácico. Todos los arcos magmáticos, en un margen convergente están ligados a procesos tectónicos, durante el Jurásico Inferior a Medio existían fuerzas tensionales que originaron un ambiente de extensión donde los fluidos magmáticos se emplazaron en forma de vulcanismo, Formación Chocolate. A partir del Jurásico Superior, el régimen tectónico de subducción entra en una etapa de convergencia oblicua, esto origina un sistema de compresión y el cierre de la cuenca de extensión, en este lapso se emplazan cuerpos subvolcánicos asociados a la Formación Guaneros y albergan DPC (Martínez et Al., 2017), La Formación Guaneros está compuesta por niveles volcánicos andesíticos y basálticos intercalados con delgados bancos de areniscas feldespáticas y conglomerados (Mamani et al., 2009), alineados en dirección NO-SE. Esta formación cubre prospectos interesantes como: La Tapada (DPC), La llave (DPC?), Posco (Cuerpos de sílice – Pórfido?), Yaral (Vetas de Fe-Cu).

### 4. Magmatismo

En los Andes del sur de Perú, durante el Jurásico y Cretácico, se originó el mayor magmatismo con adición juvenil del manto a la corteza continental. Los arcos magmáticos son lugares de extracción de nuevo material cortical desde el manto astenosférico. El efecto combinado de extensión y una posición casi estacionaria de los arcos del Jurásico al Cretácico favoreció el emplazamiento de rocas magmáticas juveniles a gran escala, es un periodo excepcional en la evolución de este margen continental, grandes volúmenes de rocas juveniles máficas a intermedias se han formado y están preservados al NO de Punta Bombón. La corteza proterozoica del Macizo de Arequipa es el principal componente en la fusión y asimilación de fuentes derivadas del manto en la corteza.

### 5. Interpretación geofísica

Los datos magnéticos permiten distinguir lineamientos dúctiles y frágiles (NWMO, 2015). Según Martínez, 2017, los yacimientos se encuentran asociados a las intersecciones de fallas, desarrollando condiciones permeables para el emplazamiento de intrusiones magmáticas y circulación de los fluidos hidrotermales, como parece ocurrir al NO de Tía María. Los datos estructurales del terreno y las anomalías magnéticas demuestran ser complementarias, así se pudo interpretar 2 fallas regionales con desplazamientos transcurrentes dextrales (Falla Cumbre y Catarina), ubicados a 14 y 24 Km respectivamente, con dirección N 18° - 20°, que originaron puntos de debilidad estructural, donde se emplazaron cuerpos magmáticos relacionados a un sistema DPC. Se ha identificado más de 8 puntos con potencial para la exploración.

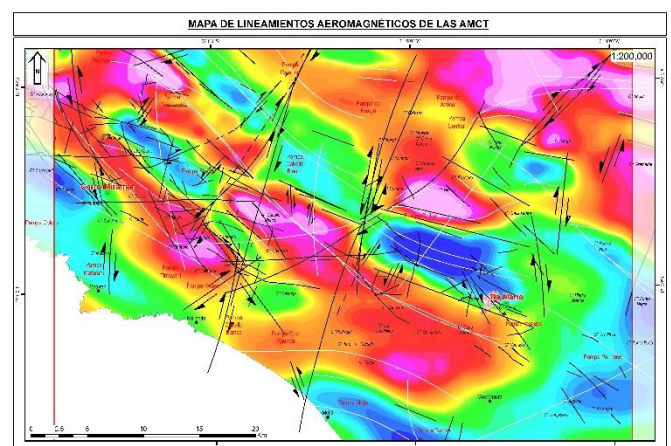
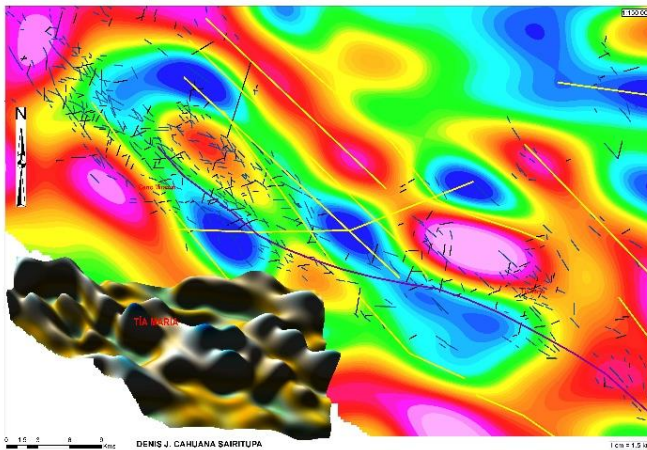


Figura 5. Transporte de estructuras superficiales y magnéticas.

## 6. Conclusiones

Entre los DPC existe una relación inversa, entre su edad y su importancia (tamaño y ley). Los grandes pórfidos como Cuajone, Toquepala, Quellaveco y Cerro Verde se encuentran en las fajas más jóvenes del Paleoceno Medio – Eoceno Inferior mientras que los medianos, como Posco, Cachuyo, Cahuyito y La Llave se encuentran en la faja más antigua (Jurásico; Acosta, 2006).

El área al estar afectada por fallamientos dextrales y sinestrales, que se comportan como debilidades estructurales, desplazan cuerpos anómalos observados en imágenes magnéticas, lo que es favorable para la exploración de depósitos profundos como se muestra en el mapa de lineamientos aeromagnéticos (*Figura 5*). La dirección preferente medida en el área es N138°E, esta coincide con los lineamientos magnéticos, por otro lado, los lineamientos cambian al NE, cerca de la Quebrada Salinas y vuelven a la orientación original, generando un lazo simoide, esto se comprueba en el modelo 3D de las anomalías magnéticas (*Figura 6*), coincidiendo entre los altos y bajos magnéticos. Otro punto importante son los valores altos de Pb y Zn, los cuales son indicadores favorables para la exploración de Au periférico (*Figura 2*) hasta una distancia promedio de 3.5 Km de radio desde el centro de depósitos cupríferos en terrenos jurásicos.



*Figura 6.* Mapa estructural / aero magnético, modelado 3D de las anomalías Aero magnéticas.

## Agradecimientos

Un agradecimiento especial al Ing. William Martínez, Ronald Yupa, Miguel Calcina, quienes con su apoyo se realizó el presente trabajo.

## Referencias

Acosta J. 2006. Características metalogénicas de los yacimientos asociados a los arcos

magmáticos mesozoicos y cenozoicos del sur del Perú (latitudes 16°-18°30'), p. 8-11.

Andrews D., Carbonél J., Chávez W. and Mioduchowski A. (2000) – Geology setting of the Tía María prospect, southern Perú.

Chara B., 2008. Caracterización geoquímica y geocronológica del magmatismo calcoalcalino y alteración hipógena y supérgena de los pórfidos del sur del Perú.

Gay S. P., 2012. Joints, Linears, and Lineaments – The Basement Connection, p. 3-7, 10.

Hosseini S., 2016. Detection of deep and blind mineral deposits using new proposed frequency coefficients method in frequency domain of geochemical data, p. 1-8.

Jones B., 1991. Application of metal zoning to gold exploration in porphyry copper systems, p. 127-128.

Mamani M., 2009. Composición geoquímica de los dominios corticales de los andes centrales: control estructural del dominio de Arequipa, p. 54, 56-59.

Martínez W. et al, 2017. Geología y controles Tectonomagmáticos de los Sistemas Porfiríticos en el Arco Magmático Occidental del Sur de Perú.

Mioduchowski A., 2001. Geochemistry and petrology of the Tía María prospect, department of Arequipa, Perú, p. 6-13.

Nuclear Waste Management Organization. 2015. Phase 2 Geoscientific Preliminary Assessment, Lineament Interpretation, p. 21.

Núñez F. & Corrales E., Metallogenic features of the La Tapada and Tía María porphyry copper deposits, Perú, p. 1

Quang et al, 2005. Response of Supergene Processes to Episodic Cenozoic Uplift, Pediment Erosion and Ignimbrite Eruption in the Porphyry Copper Province of Southern Perú, p. 92.

Revista de Tecnología Minera, Año 4, edición 20, p. 64-72, octubre 2010. Proyecto Tía María, Southern Copper.

