



## Clasificación de los dominios magnéticos del sur de Perú a través de la aplicación de SOM al modelo del vector de magnetización

Telma Aisengart<sup>1</sup>, Ronald Yupa<sup>2</sup>, Jorge Chira<sup>3</sup>, Jose Luis Ando<sup>4</sup>, Leandro Batista<sup>5</sup>, Luana Cunha<sup>6</sup> y Carlos Valencia<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Geosoft Latinoamérica, Rua da Passagem 123, 4° andar, Rio de Janeiro, Brasil (Telma.Aisengart@geosoft.com)

<sup>2</sup>Ingemmet, Av. Canadá 1470, San Borja, Lima, Perú (gyupa@ingemmet.gob.pe)

<sup>3</sup>Ingemmet, Av. Canadá 1470, San Borja, Lima, Perú (jchira@ingemmet.gob.pe)

<sup>4</sup>Geosoft Latinoamérica, Rua da Passagem 123, 4° andar, Rio de Janeiro, Brasil (JoseLuis.Ando@geosoft.com)

<sup>5</sup>Geosoft Latinoamérica, Rua da Passagem 123, 4° andar, Rio de Janeiro, Brasil (Leandro.Batista@geosoft.com)

<sup>6</sup>Geosoft Latinoamérica, Rua da Passagem 123, 4° andar, Rio de Janeiro, Brasil (Luana.CunhaFerreira@geosoft.com)

<sup>7</sup>Ingemmet, Av. Canadá 1470, San Borja, Lima, Perú (cvalencia@ingemmet.gob.pe)

### Abstract

An important concentration of Cu-Mo porphyry deposits is located in the Paleocene-Eocene and Superior Cretaceous belts from Southern Peru. The study area has approximately 130x33 kilometers in the NW-SE direction located between 71° - 69°5' Longitude West and 16° - 17°3' Latitude South.

The purpose of this work was to use the existing airborne magnetic data from the Multinational Andean Project (MAP) acquired in 2000-2001 to characterize and differentiate the magnetic anomalies.

To accomplish it, we have created and used thematic maps, Magnetization Vector Inversion (MVI) and Self-Organizing Maps (SOM) applied to the MVI results to automatically classify the anomalies.

The need to find new copper deposits in the country, many of them being under cover highlight the importance of using those tools to analyze the characteristic of the known deposits and use them to identify new targets with similar characteristics for further investigation.

### 1. Introducción

Una importante concentración de yacimientos de pórfido Cu-Mo se encuentra ubicada en las franjas del Paleoceno-Eoceno y Cretácico Superior del sur del Perú, que constituye un distrito minero que alberga prospectos y proyectos de exploración. El área de estudio engloba un aproximado de 130x33 kilómetros con una dirección NO-SE y se encuentra entre las coordenadas geográficas 71° - 69°5' longitud oeste y 16° - 17°3' latitud sur.

La formación de este tipo de depósitos en los Andes peruanos se origina de acuerdo al contexto geológico, constituido por un borde activo al menos desde el Paleozoico Inferior que ha tenido un rol de convergencia con la subducción de la corteza oceánica bajo la corteza continental, permitiendo la generación de magmas que en su conjunto dan origen a yacimientos alineados con una determinada edad geológica representados en franjas metalogénicas.

El objetivo de este trabajo fue la utilización de datos geofísicos de magnetometría aérea para caracterizar y diferenciar las anomalías magnéticas.

La base de datos magnéticos utilizado en el presente trabajo, fue desarrollada a través del Proyecto Multinacional Andino (PMA), durante los



años 2000-2001, las líneas de vuelo tienen una dirección N-S con 1,000 m de espaciamiento entre estas.

Fueron generados y utilizados mapas temáticos, inversión del vector de magnetización además del método de Self-Organizing Maps (SOM) aplicado al resultado de la inversión del vector de magnetización, para clasificar las anomalías.

Existiendo la necesidad de prospectar por nuevos recursos minerales relacionados a yacimientos de cobre en el país, se puede evidenciar un alto potencial de yacimientos ocultos a profundidad (100-400 m), utilizando estas herramientas que permiten analizar las características de los depósitos conocidos y buscar nuevos blancos con características similares, integrando información de superficie y su extensión en profundidad.

## 2. Metodología

### 2.1. Inversión del vector de magnetización

La medición del campo magnético  $B$  en una serie de localizaciones  $r$  provee la ecuación directa para el vector magnético (Ellis et al, 2012):

$$B_{\beta}(r_j) = \sum_{k,a}^{N,3} m_{k,a} \int_{v_k} \partial_{\alpha} \partial_{\beta} \frac{1}{|r-r'|} dr'^3 \quad (1)$$

A través de la discretización de la ecuación (1) obtenemos la ecuación para el problema directo:

$$B(r) = \nabla \int_v M(r') \cdot \nabla' \frac{1}{|r-r'|} dr'^3 \quad (2)$$

Que puede ser representada como:

$$B = Gm \quad (3)$$

El problema de inversión del vector de magnetización es resolver para  $m$ , dado  $B$ . Para lograr resolver el problema inverso, es necesario someter a  $B$  a condiciones de regularizaciones.

La implementación utilizada en este trabajo aplica la regularización del gradiente mínimo de Tikhonov (Zhdanov, 2002) aplicado al problema magnético inverso a través de la minimización de la diferencia entre los campos calculados y medidos.

Hasta recientemente, la propiedad física utilizada para describir el campo magnético de la Tierra, particularmente para inversión, era la susceptibilidad. La relación entre susceptibilidad y magnetización es la siguiente:

$$\vec{M} = k\vec{H}_e \quad (4)$$

La hipótesis adoptada para esta descripción es que la dirección del campo inducido está alineado con la dirección del campo magnético de la Tierra.

Sin embargo, la naturaleza compleja de las rocas demanda una descripción más general de sus propiedades magnéticas. Para eso, utilizamos la susceptibilidad anisotrópica que generaliza la escalar a través de un vector de tres componentes  $(k_x, k_y, k_z)$ , donde la amplitud de la susceptibilidad anisotrópica es igual a la escalar.

La Inversión del Vector de Magnetización (MVI) utilizada en este trabajo está basada en esta susceptibilidad efectiva que incluye la magnetización anisotrópica y remanente como descrita en la ecuación (5).

$$\vec{M} = (\vec{k} + \vec{k}_R) H_e = \vec{k}_{MVI} H_e \quad (5)$$

### 2.2. Self Organizing Maps (SOM)

SOM es una técnica de clasificación no supervisada utilizada para analizar y visualizar datos de gran dimensión, basada en los principios de las mediciones del vector de cuantificación, mostrándose como una herramienta ideal para analizar un conjunto de datos con parámetros geofísicos dispares.

Esta técnica trabaja basada en la preservación de las propiedades de los cuerpos y patrones cercanos de entrada que activan patrones cercanos de salida, generando una clasificación automática de los datos de entrada.

En este trabajo utilizamos el SOM para identificar automáticamente los principales dominios magnéticos y diferenciar las anomalías magnéticas resultantes del MVI, como ya ha sido utilizado con éxito en otras áreas. (Aisengart et al. 2017; Aisengart et al 2018).

## 3. Geotectónica

El tipo de arco magmático que bordea la costa sur de Perú, es de tipo subducción donde la corteza oceánica subduce bajo la corteza continental generando un importante magmatismo de tipo calco-alcalino. En el ciclo Pre-andino un importante magmatismo de edad Ordovícica es generado evidenciado por el emplazamiento del magma que originó el batolito de Atico-Camaná, Siluro-Devoniano (Batolito San Nicolás), Jurásico-Cretácico (superunidades Punta Coles - Ilo) y Cretácico-Paleógeno (Ilo, Yarabamba, Linga, Challaviento). Este importante magmatismo adherido al fallamiento translitosférico que funcionó desde el pre-Jurásico (Sempere et al. 2004), ha generado importantes yacimientos asociados al tipo IOCG; Raúl, Condestable,



Pampa de Pongo, Marcona, de tipo pórfidos; Zafranal, Cerro Verde, Chapi, Los Calatos, Cuajone, Quellaveco, Toquepala o Chipispaya, de edad mayormente Cretácico Superior a Paleógeno, de estos tipos de Depósitos Porfíricos Cretácicos (DPCs) de edad Paleógena, solo el DPC Chipispaya es de edad Miocena Inferior (Valdivia et al. 2015).

La distancia a la fosa de subducción en comparación con la ubicación de los DPCs, varía entre 150 y 275 km (Figura 1), se nota un incremento en la edad de los sistemas porfíricos de oeste a este, observándose un aparente retroceso (Roll-Back) en dirección este hacia el Neógeno, y traducido en el emplazamiento de los pórfidos Chipispaya- Ataspaca. Hay que recordar que para Perú, la subducción más temprana registrada, es el arco magmático ordoviciano representado por el Batolito Atico-Camaná y que después prosiguió en el Siluro-Devoniano con el emplazamiento del Batolito de San Nicolás, los dos magmatismos, son petrográficamente, estructuralmente y geoquímicamente diferentes. Se diferencian los tipos de márgenes tectono-magmáticos que originaron los diferentes tipos de depósitos e.g; Arco Jurásico (DPC Tía María) de Arco Paleoceno-Eoceno (DPC Los Calatos, Cuajone, Quellaveco, Toquepala) y Arco Mioceno (DPC Chipispaya) (Martínez et. al. 2017).

En Chipispaya (Tacna), dataciones Ar-Ar en los alrededores (Martínez y Cervantes 2003) y en mineralización de molibdenita (Valdivia et al. 2015), mostraron edades entre 20 y 22 MA, con lo cual se infiere que el arco Mioceno se adosa al este del arco Paleoceno.



Figura 1. Imagen satelital con la distribución de la faja magmática Jurásica (azul), Cretácica (verde), Paleocena (rojo) y Miocena-Eocena (amarillo), Martínez et al. 2017.

#### 4. Procesamiento de los datos

Los estudios regionales de magnetometría aérea fueron desarrollados en el marco del Proyecto

Multinacional Andino (PMA), durante los años 2000-2001 entre las latitudes 17°S y 19°5'S, esta información ha contribuido a una mejor comprensión del complejo volcánico reciente que subyace en gran parte del área del proyecto en las regiones fronterizas entre los países tales como Bolivia, Chile y Perú (Getsinger y Hickson 2000).

En el polígono del área de estudio, podemos observar el resultado de la utilización de varios filtros para una interpretación, los que fueron generados desde los datos magnéticos e integrados con la ubicación de los yacimientos y/o ocurrencias de minerales. Existe una coincidencia de estos con las anomalías magnéticas asociadas a un control estructural, como puede ser observado en la Figura 2b y 2c que muestran TMI y el filtro de diferencia del área de estudio, respectivamente. Asimismo, la Figura 2a con el contexto geológico y las estructuras.

En general los principales yacimientos como los pórfidos de Cu-Mo-Au; Cuajone, Toquepala, Quellaveco, Los Calatos o Tía María-La Tapada, se encuentran en el borde de las anomalías magnéticas y coinciden con las intersecciones del mapa estructural.

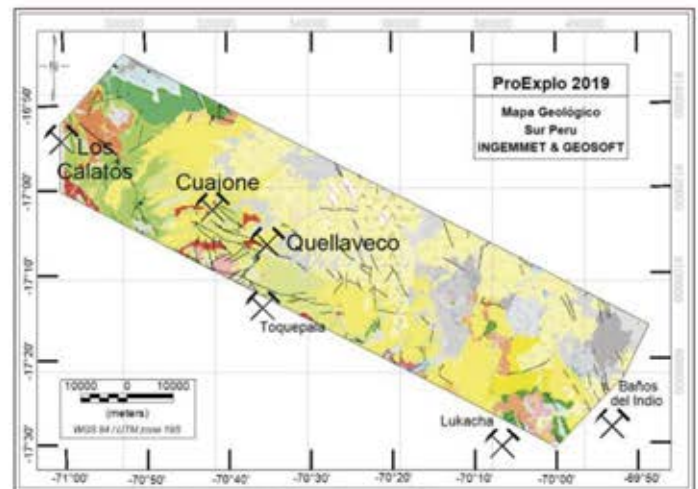


Figura 2a). Geología del área de estudio.

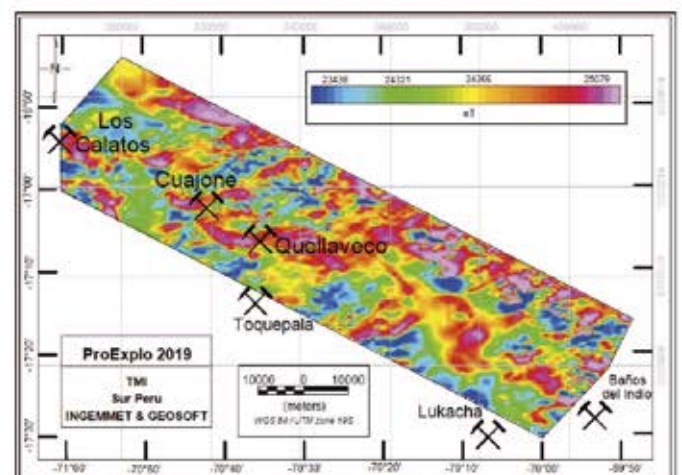


Figura 2b). TMI con principales yacimientos.



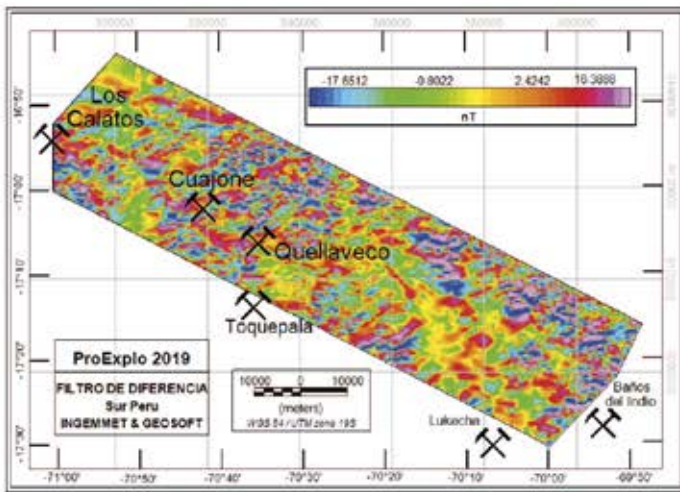


Figura 2c). Filtro de diferencia con principales yacimientos.

Esta concordancia entre los datos magnéticos-estructurales con la disposición de los yacimientos puede indicar que el emplazamiento aparente de estos contrastes magnéticos está asociado a los bordes entre los altos-bajos magnéticos y relacionados a un control estructural como el caso del Sistema de Fallas Incapuquio-Cincha-Lluta. Por lo expuesto, existe un gran número de posibilidades de emplazamiento de yacimientos minerales de carácter ocultos-ciegos a lo largo de la franja de depósitos miocénicos y cuaternarios entre Tacna y Arequipa; Pampas La Joya (Arequipa), Clemesí (Moquegua) y La Yarada (Tacna).

Basados en esta evidencia, con el objetivo de buscar nuevos blancos para exploración mineral aplicamos el flujo de trabajo (Figura 3) al levantamiento de magnetometría aérea.

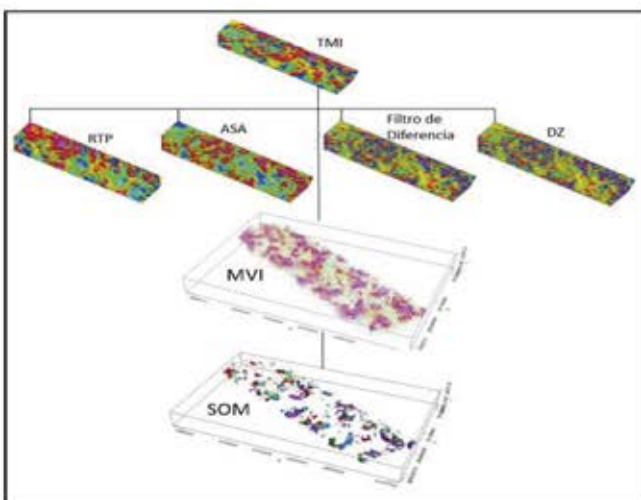


Figura 3. Flujo de trabajo.

## 5. Resultados

El MVI recupera el vector de magnetización efectivo total y por eso permite la interpretación del campo magnético independientemente de la fuente de magnetización. La experiencia nos ha demostrado que el MVI produce modelos más consistentes geológicamente que las inversiones de susceptibilidad (Ellis, 2012; Aisengart, 2017, 2018).

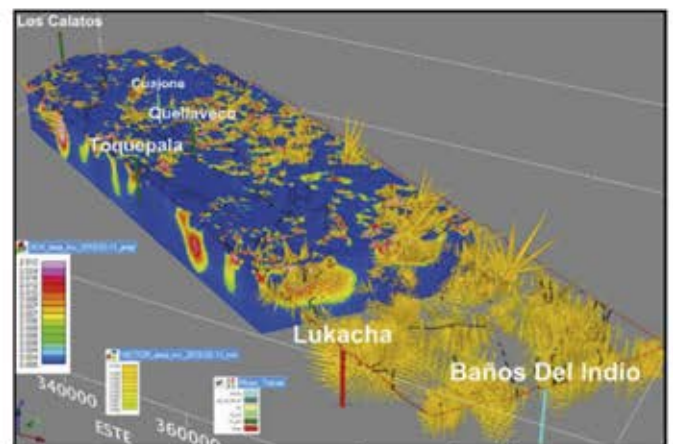


Figura 4. Amplitud y vectores de magnetización.

El resultado de la aplicación de la técnica SOM al modelo de inversión del vector de magnetización ha permitido la clasificación automática, buscando datos anómalos, de características magnéticas similares considerando tanto amplitud como dirección de magnetización. Este resultado permite la identificación de nuevos blancos para investigación adicional, en la búsqueda de nuevos depósitos minerales.

En este trabajo consideramos un 10% de los datos como anómalos y usamos el SOM para clasificarlos en 9 clases (Figura 5).

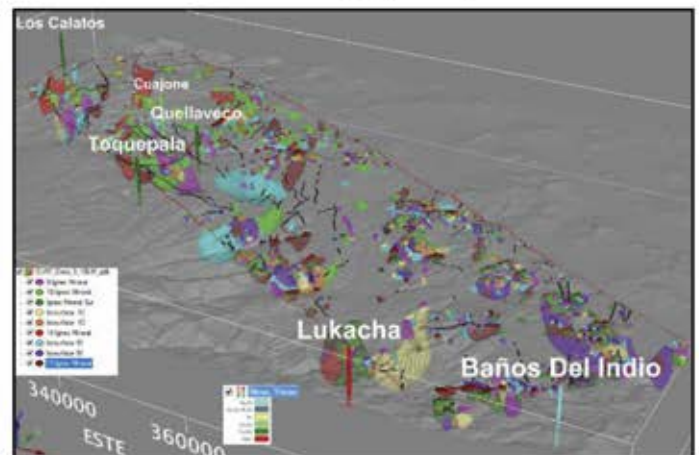


Figura 5. SOM relacionado a geología y a fallas regionales.

En la Figura 6 fueron relacionadas las clases 9 y 10 coincidentes con los yacimientos de Quellaveco y Cuacone, lo que ayuda a la identificación de



nuevos blancos con características similares. También fueron consideradas las estructuras, claramente delineadas por los datos magnéticos, ya que es evidente que los depósitos están en su gran mayoría asociados a fallas.

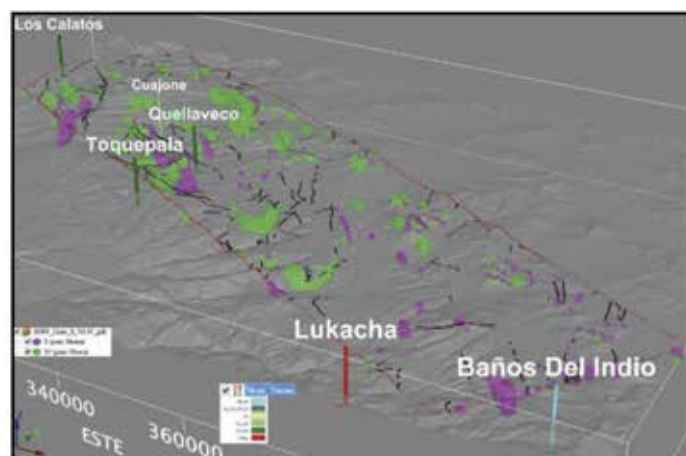


Figura 6. SOM clases 9 y 10 relacionadas a los yacimientos Quellaveco y Cujone.

## 6. Conclusiones

La aplicación de nuevas técnicas de análisis de los datos magnéticos como el MVI y SOM, permitió la identificación de los depósitos minerales conocidos y permite proponer nuevos blancos con características similares para posterior investigación exploratoria.

## Agradecimientos

Agradecemos al Ingemmet por haber proporcionado los datos utilizados en el presente trabajo.

## Referencias

- Aisengart, T., Ando, J. L., Batista, L., Ferreira, L.C., 2018. Técnica de self-organizing maps (SOM) aplicada aos modelos regionais de densidade e vetor de magnetização (MVI) da provincia mineral de Carajás. 49° Congresso Brasileiro de Geologia, Rio de Janeiro, Brasil.
- Aisengart, T., Ando, J. L., Barbosa, R. D., Rech, M., Pereira, J.G., 2017. Caracterización de cuerpos intrusivos de la provincia alcalina de Goiás usando inversión geofísica y Self Organizing Maps. XVI Congreso Colombiano de Geología, Santa Marta, Colombia.
- Aisengart, T., 2015. Qualitative and Quantitative Magnetization Vector Inversion applied to the Pirapora Anomaly. 14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, p. 474-479.

- Ellis, R. G., Wet, B., & MacLeod, I. N., 2012. Inversion of Magnetic Data from Remnant and Induced Sources. 22th International Geophysical Conference and Exhibition, Brisbane, Australia.
- Getsinger, J., Hickson, C., 2000. Multinational Andean Project (MAP): Geological co-operation across borders. Geoscience Canada, Volume 27, Number 3.
- Martínez, W. Cervantes, J., 2003. Mapa de Rocas ígneas del Sur de Perú, Nuevos datos geocronométricos, Geoquímicos y Estructurales entre los paralelos 16° y 18°30' latitud sur. INGEMMET Serie D. N° 26.
- Martinez, W., Otero, J., Leon, W., Marchena, A., 2017. Estudio Metalogenético de la Faja magmática Jurásico – Cretácica, asociado a los depósitos minerales tipo IOCG y Pórfidos entre Ica, Arequipa, Moquegua y Tacna. INGEMMET, Informe interno. P 138-140
- Sempere, T., Jacay, J., Pino, A., Bertrand, H., Carlotto, V., Fornari, M., Garcia, R., Jimenez, N., Marzoli, A., Meyer, C., Rosas, S., Soler, P., 2004. Estiramiento litosférico del Paleozoico superior al Cretáceo Medio, en el Perú y Bolivia. Sociedad Geológica del Perú. Publicación especial. No. 5. pp. 45-79
- Valdivia, V., Mamani, M., Toro, J., Terán, J.C., 2015. Aplicación de la geocronología y litogeoquímica a la exploración de pórfidos en el Paleoceno. P 6.
- Zhdanov, M. S., 2002. Geophysical Inverse Theory and Regularization Problems, Method in Geochemistry and Geophysics. Elsevier Science BV, Amsterdam, Netherlands, v 36.