



# Interpretación Geofísica Integrada, Enfoque a Modelos de Exploración Minera y Casos de Estudio

**Lorena Banchemo Salgado\*, M. Sc.**  
Consultora Impronta Geofísica Ltda.  
\* email: Lorena@improntageo.com

**Resumen.** Este trabajo tiene como propósito potenciar el aporte cuantitativo de la geofísica en la estimación de los recursos potenciales de proyectos de exploración minera, destacando el rol del procesamiento de datos y la obtención de modelos basados en una interpretación integrada. Es relevante incorporar las condiciones de borde aportadas por las propiedades físicas y el conocimiento geológico previo para conseguir un resultado consistente y confiable. El ciclo de un estudio geofísico incluye un diseño coherente con el problema geológico, un procesamiento dirigido a las características particulares del caso, para continuar con la integración incorporando multiparámetros y otras disciplinas de la geociencia, que conduzcan a un modelo evolutivo y retroalimentado a medida que se incorpora información y conocimiento adicional. Como casos de estudio se presentan análisis geofísicos realizados en proyectos IOCG y pórfidos, donde se ejemplifica el aporte obtenido desde la geofísica para lograr respuestas cuantitativas en estimación de recursos potenciales e inferidos en etapas de exploración temprana. El propósito máximo es establecer un lenguaje común desde la geofísica a la geología, para contribuir con respuestas significativas y medibles, que pueden llegar hasta un modelo indicativo del tamaño, profundidad y concentración de los recursos minerales para distintos tipos de depósitos minerales.

**Palabras Claves:** Geofísica, Interpretación Integrada, Casos IOCG.

## 1. Introducción

La exploración minera se torna cada vez más riesgosa en cuanto al retorno de la inversión debido a complejidades crecientes. En la década de los 90's el 60% de los descubrimientos mayores a 4 Mton de metal contenido, correspondían a depósitos mayoritariamente expuestos en superficie. A partir del año 2000 esta cifra se reduce a 20%, siendo la gran mayoría de los nuevos descubrimientos totalmente cubiertos o ciegos. (Holliday y Cooke, 2007). Ha habido un significativo aumento de los gastos en exploración minera que no ha logrado contrarrestar la reducción de la tasa de descubrimientos en la última década (Schodde, 2014).

Ante el desafío de descubrir nuevos recursos minerales ocultos, profundos, difíciles de identificar, se hacen necesario incorporar nuevas técnicas y mejorar las ya existentes. Las herramientas indirectas que aportan los métodos geofísicos adecuadamente interpretados y contrastados con las condiciones de las propiedades físicas de cada depósito, así como la geología, los estilos de

mineralización y controles estructurales, junto a procesamiento de datos constreñidos por estas propiedades, lleven a una comprensión complementada e integrada que aporta significativo valor a al conocimiento geológico dirigido al hallazgo.

Acá planteamos que la adecuada aplicación del método geofísico comprende tanta dedicación en la adquisición de los datos (selección del o los métodos en función del objetivo, definición de muestreo consistente con la resolución esperada, modelación directa a priori para detectar inconsistencias, correcta ejecución en terreno y control de calidad de los datos), como dedicación respecto

al procesamiento e interpretación. Este último aspecto es donde se hace la diferencia y realmente se define la generación de valor. La transformación de los datos a un modelo integrado que implica conocimiento, se consigue procesando los datos inclusivamente con el resto de geoinformación disponible y generando resultados constreñidos y condicionados por las propiedades físicas. La segunda etapa de este ítem es la interpretación que se debe basar en registros multiparámetros, las facilidades tecnológicas actuales reducen la dificultad de registrar y analizar diversos parámetros físicos. No es suficiente contar con resultados automáticos y lineales a partir de procesos obtenidos de parámetros por defecto.

El objetivo principal de la geofísica es responder las preguntas acerca de localización más probable, geometría, profundidad tamaño y concentración del recurso, señalando las limitaciones en cuanto a resolución y alcance espacial (condición del diseño del estudio).

## 2. Ciclo de un estudio geofísico

La aplicación de un estudio geofísico se asocia a un ciclo que se parte con el planteamiento de un problema geológico y culmina en un modelo físico que se retroalimenta y evoluciona. Es preciso identificar los contrastes físicos que lleven a aislar el fenómeno que se desea destacar, teniendo en consideración limitaciones y alcances de los métodos, profundidad y resolución requerida, condicionantes logísticas, etc, para seleccionar el o los métodos geofísicos a utilizar. Luego se requiere precisar la configuración del estudio (densidad de líneas, tamaño dipolar, distancia sensor-fuente) para la adquisición en terreno cuidando las correcciones y controles de calidad.

El procesamiento de los datos y la interpretación integrada representan el aspecto diferenciador del resultado del estudio para lograr un real aporte al conocimiento. Los modelos hoy en día deben considerar la tridimensionalidad del espacio, ya sea con interpolaciones pseudo3D a partir de registros 2D o bien directamente mediciones 3D-3D.

La modelación e interpretación de los datos obtenidos necesariamente debe incorporar condiciones de borde dadas por la geología y las propiedades físicas de las rocas. Soportar el análisis en base a procesamientos automáticos equivale a subinterpretar los datos. La figura 1 muestra el ciclo de un estudio geofísico con los elementos que considera cada etapa.



Figura 1. Ciclo de un estudio geofísico

### 3. Análisis de Propiedades físicas

La noción de anomalía está interrelacionada a una referencia, es decir, un umbral que es inherente a cada caso de estudio. Por ejemplo, una anomalía de polarización inducida tendrá distinta respuesta para un recurso tipo pórfido o un sistema de baja sulfidización, será relevante conocer la respuesta del entorno propilitico respecto de los núcleos de sulfuros de alta ley. Para determinar el “nivel de corte” o contraste en intensidad de señal geofísica consistente con cada estilo de mineralización, respuesta de su roca de caja, intrusivos, zonas estériles o de *background*, es imprescindible disponer de información medida de sus características físicas.

Las propiedades físicas mayoritariamente medidas son susceptibilidad magnética, remanencia, densidad, cargabilidad, resistividad (con baja la representatividad del dato cuando es medida fuera de su sitio de confinación). Estas mediciones pueden hacerse directamente en muestras de roca o en sondajes, en terreno o laboratorio. Además del análisis de propiedades física medidas se debe incluir el procesamiento y análisis estadístico de los datos geofísicos indirectos. En etapas avanzadas del proyecto, cuando se cuenta con sondajes, es esencial realizar muestreo de los grids de secciones o voxel 3D sobre la traza de los sondajes y contrastar leyes, ocurrencias de mineralización, tipos de alteración, etc, para encontrar factores de

correlación (fig. 2), así como realizar estadísticas sobre los modelos de inversión resultantes, para conocer los rangos e histogramas de comportamiento (fig. 3).

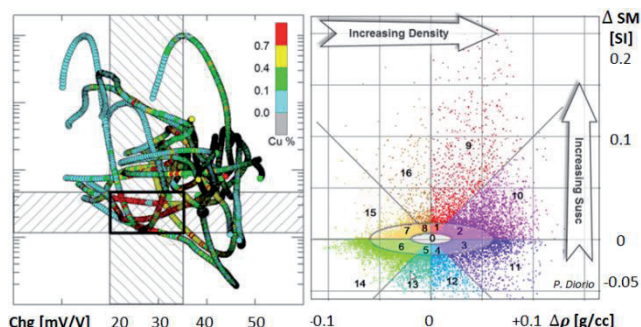


Figura 2. Izq. El gráfico representa el muestreo de cargabilidad y resistividad sobre la traza de sondajes en un proyecto de cobre. Se identifican los rangos geofísicos asociados a altas leyes. Der. Contrastes de densidad versus susceptibilidad. Se obtiene una clasificación a partir de zonas con propiedades similares.

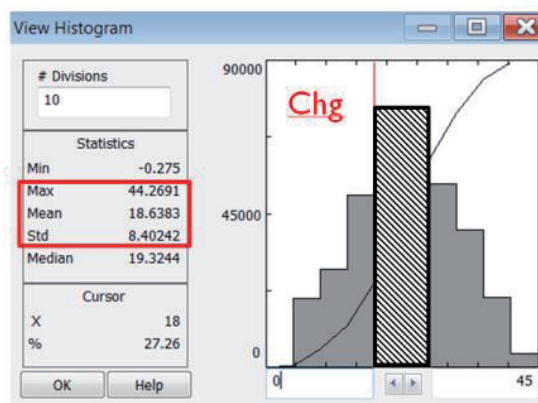
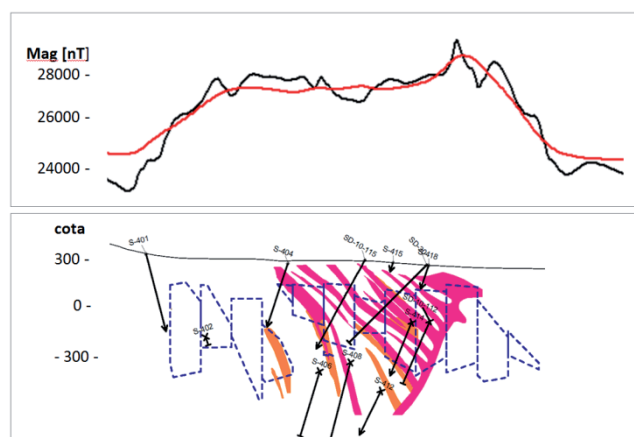


Figura 3. Histograma con la estadística de cargabilidad obtenida de un estudio IP.

### 4. Estudio de Caso: Depósito tipo IOCG

El proyecto Dominga, sistema tipo IOCG, con recursos sobre 2.000 Mt de Fe-Cu, ubicado en la Franja Ferrífera Cretácica, fue descubierto siendo un depósito casi completamente ciego, localizado bajo 100-200 m de profundidad. La magnetometría jugó un rol clave en el descubrimiento y posteriormente en la estimación de sus recursos potenciales. Durante la etapa de exploración y evaluación temprana del proyecto, se buscó dar soporte adicional a la estimación de recursos inferidos, para lo cual se realizó modelamiento de magnetometría 2D sobre numerosas secciones de los depósitos norte y sur. Como condición de borde inicial se utilizó la completa base de datos de susceptibilidad magnética medida en sondajes y el modelo de recursos de Fe inicial obtenido a partir de una malla de sondajes discretos realizados en las primeras campañas. Se realizó un primer modelamiento geofísico para medir el efecto magnético del modelo de Fe en hipógeno y se contrastó con el campo magnético medido. La diferencia mostró que el modelo de Fe era insuficiente

en recursos pues solo lograba explicar la mitad de la amplitud de las anomalías magnéticas registradas. Para compensar el defecto de magnetismo fue necesario modificar el tamaño de los cuerpos de alta susceptibilidad (0.5 SI para cuerpos de magnetita de baja ley (15-20 %FeT) y 1.0 SI en unidad de magnetita de alta ley (>20% FeT)) para satisfacer los datos geofísicos y las propiedades físicas. Se consideró un *background* con susceptibilidad 0.1 SI, que equivale aproximadamente a 5-7% magnetita y las unidades con oxidación supérgena no fueron consideradas, pues carecen de contraste al tener similar susceptibilidad media que el *background*. Figura 4.



**Figura 4.** Dominga Sur sección 6747200N. Abajo: modelo de recursos (magenta= reemplazo intenso de magnetita (>20% FeT); anaranjado= reemplazo moderado de magnetita (15-20% FeT)). En línea segmentada azul, los cuerpos magnéticos de alta ley Fe modelados para satisfacer los datos de magnetometría en la parte superior, la línea negra corresponde a los datos registrados y la línea roja el resultado del modelo.

Una estimación conservadora llevó a proponer al menos el doble de recursos adicionales identificados de manera directa y a identificar otra zona periférica con alto potencial que aún no había sido perforada. (Andes Iron, 2011).

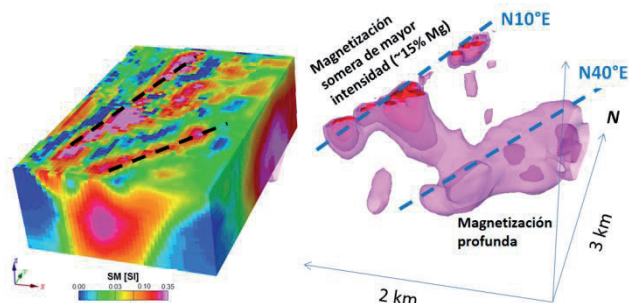
## 5. Estudio de Caso: Mineralización tipo Manto

El equipo de exploraciones de AMSA realizó la evaluación de un prospecto ubicado en la Franja del sistema de Falla Atacama, que incluyó magnetometría terrestre. La información de magnetometría de detalle, cuyos rangos de intensidades magnéticas superan los 1000 nT, indicó valores consistentes con estilos de mineralización IOCG. El prospecto, en etapa de evaluación temprana, no disponía de sondajes ni registros de propiedades físicas, solamente muestreo en superficie con evidencias de mineralización de Fe.

Para identificar valores asociados a los rangos anómalos y con esto el contraste magnético esperado, se realizó un análisis sobre la estadística de la susceptibilidad magnética aparente obtenida de la inversión 3D de la magnetometría

(suponiendo solo aporte inductivo del campo). Los valores de mayor susceptibilidad alcanzaron hasta 0.35 SI, en un *background* de 0.05 SI. Estos valores son consistentes con concentraciones de magnetita hasta 15%. (Amsa, 2014). Se eligió un nivel de corte para el modelo mag 3D, descartando los valores de baja susceptibilidad, menores que 0.15 SI, con lo cual se aisló la respuesta del cuerpo con mayor contenido de hierro magnético, para inferir un recurso preliminar.

La figura 5 muestra la geometría de los cuerpos magnéticos modelados. Los mayores contenidos de magnetita se ubican cerca de superficie, controlados por la estructura principal central de dirección N10°E. Esta estructura miente hacia el E y se conecta con una estructura secundaria de orientación N40°E. En el borde oriental se ubica otro cuerpo, alineado con la estructura de segundo orden, con contenido alto de magnetita pero a mayor profundidad, su techo a 400m bajo superficie. Haciendo un ejercicio simple, considerando la magnetita en proporción directa al Fe, se obtuvo sólo como recurso somero aproximadamente 140 Mton @ 15% Fe en los primeros 200 m de profundidad. Esta estimación cuantitativa indirecta permitió a la compañía evaluar en forma preliminar y rápida un posible potencial de exploración.



**Figura 5.** Identificación de recursos de Fe en mantos a partir de la modelación de la magnetometría terrestre y correlación con propiedades físicas.

## 6. Estudio de Caso: Detección de blancos en un distrito

Se presenta el siguiente caso de una extensa área sujeta a exploración por parte de AMSA. El área de dimensiones 8 x 8 km<sup>2</sup> presenta geología parcialmente cubierta por secuencias volcánicas postminerales y en una zona de detalle se perforaron sondajes que detectaron estilos de mineralización tipo pórfido de Cu-Au, (AMSA, 2014).

Se planteó como objetivo focalizar la extensa área a los sectores de más alto potencial, obteniendo un modelo de exploración distrital para sistemas porfídicos a partir de la interpretación integrada de los métodos geofísicos IP y magnetometría, condicionada con la información geológica y sondajes disponibles. Reconocer, caracterizar y proyectar nuevos blancos de exploración definiendo geometría y



profundidad de los cuerpos que sustentan las anomalías geofísicas, con probabilidad portadoras de mineralización.

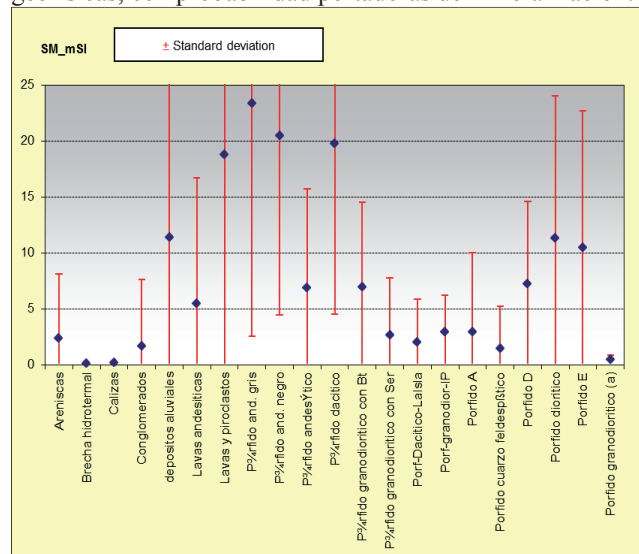


Figura 6. Susceptibilidad magnética de las litologías del proyecto.

Una completa base de datos de susceptibilidad magnética, permitió establecer contrastes entre las unidades representativas del sistema, figura 6. Consistentemente los pórfidos y brechas asociados a mineralización presentan susceptibilidad de uno a dos órdenes de magnitud más alta que las calizas y conglomerados. Cuando la caja es volcánica hay menor contraste magnético con los pórfidos, con valores de susceptibilidad de andesitas y lavas levemente superiores a los pórfidos. Por lo tanto en presencia de caja jurásica y en menor medida con rocas volcánicas, el modelo 3D discrimina adecuadamente las zonas de interés.

La figura 7 muestra los seis blancos que se obtienen del análisis, los cuales pudieron ser priorizados según tamaño, profundidad, estilo de mineralización (diseminada o tipo stockwork) y estimación de concentración de mineral.

El análisis combinado de la geofísica usando como control la geología, los sondajes y las propiedades físicas, en este prospecto tipo pórfido, permitió discretizar las zonas con mayor probabilidad para contener mineralización de cobre, reduciendo el área de estudio al 25%. A partir de información de resolución distrital fue posible reducirse a la escala de blanco para optimizar las acciones de seguimiento en la exploración.

### 7. Interpretación Integrada

La exploración minera, cada día más riesgosa debido a la búsqueda de depósitos a mayores profundidades, excesiva sobrecarga post mineral, bajas leyes, puede ser optimizada extrayendo información valiosa a partir de una adecuada interpretación e integración de múltiples métodos como condición de borde (geología, geofísica, geoquímica,

imágenes, propiedades físicas de las rocas, etc.) y adecuado modelamiento, que permite la estimación del potencial del proyecto estudiado, detección de los mejores blancos, reducción de recursos y tiempo para una exploración exitosa. En resumen, tomar decisiones relevantes de manera oportuna y a bajo costo relativo.

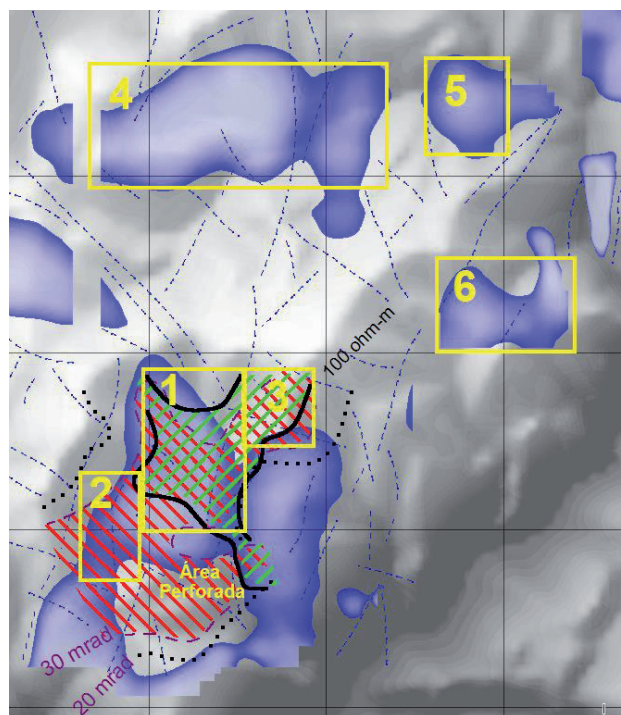


Figura 7. Mapa de exploración, con la proposición de los blancos de mayor potencial para mineralización porfídica. El mapa con topografía de fondo, incluye lineamientos magnéticos, anomalías geofísicas de IP y mag y la zona perforada utilizada como área de control.

### Agradecimientos

Mis agradecimientos a los geólogos de Minera Andes Iron y al equipo de exploraciones de Antofagasta Minerals por haber permitido la difusión de este trabajo y contribuido con significativos aportes.

### Referencias

AMSA, 2014. Reporte interno.  
 Diorio, P. A., 2014, Practical methods for integrating and interpreting regional scale. KEGS presentation 2014.  
 Holliday, J.R. and Cooke, D.R., 2007, Advances in Geological Models and Exploration Methods for Copper ± Gold Porphyry Deposits  
 Minera Andes Iron, 2011. Reporte interno. Proyecto Dominga Norte Análisis 3D y 2D Magnetometría Terrestre.  
 Minera Andes Iron, 2011. Reporte interno. Dga Sur - IP vs Box Mag  
 Schodde, R.C. 2014. "The shift to undercover exploration – How fast? How effective?". Society of Economic Geologists 2014 Annual Conference, Keystone, 2014.