



Herramientas de exploración aplicadas a la generación de nuevos *targets* en el yacimiento VMS Cerro Lindo

Jean Paul Bueno Carreón¹

¹ Nexa Resources, Lima, Perú (jbueno@nexaresources.com)

1. Introducción

Cerro Lindo es un depósito de sulfuro masivo vulcanogénico (VMS), el yacimiento está compuesto de varios cuerpos subverticales diferenciados, los cuales ocurren en un área de 2.5 x 1 km, Cerro Lindo posee una geometría peculiar que refleja el fuerte control estructural en su formación y preservación. Común a este tipo de sistemas, los sulfuros de Cerro Lindo se formaron preferencialmente (pero no exclusivamente) en un nivel específico de la estratigrafía volcánica.

Los estudios de geoquímica, geofísica y con la determinación de la respuesta espectral de testigos se enfocaron en la búsqueda de vectores de exploración mineral y control estratigráfico en el yacimiento.

Los estudios de geoquímica de roca de superficie han permitido determinar zonas anómalas enriquecidas en metales base, las cuales fueron punto de partida para investigaciones geofísicas.

El estudio integrado del análisis espectral (terraspec halo y recientemente con terracore) permitió establecer las guías mineralógicas alrededor de los cuerpos de sulfuro masivo, definiendo, por lo tanto, halos de alteración hidrotermal y vectores de temperatura.

El producto de este trabajo busca determinar las guías estratigráficas y de alteración que permiten hacer uso de un *targeting* geofísico más eficiente, para detectar nuevas zonas mineralizadas.

2. Distribución del volcánico Casma y Batolito de la Costa en la franja costera del Perú

2.1. Volcánico Casma

El grupo Casma pertenece al Cretáceo Temprano a Tardío. Las litologías, están definidas por flujo de lava almohadilladas, autobrechas y rocas sedimentarias clásticas de grano fino (Myers, 1980). El Grupo Casma es correlacionable a lo largo de tres cuencas volcano sedimentarias que ocupan la margen continental de norte a sur en el orden siguiente: Cuenca Lancones, Cuenca Casma y Cuenca Río Grande. La principal ocurrencia de depósitos VMS están en la Cuenca Lancones y en la Cuenca Casma (*Figura 1*).

2.2 Batolito de la Costa

- 1era etapa: Entre 105 y 90 Ma; relacionada con los depósitos volcano-sedimentarios del Grupo Casma.
- 2da etapa: Entre 90 y 70 Ma; no tiene depósitos volcánicos contemporáneos.
- 3era etapa: Entre 70 y 60 Ma, relacionada con depósitos volcano-sedimentarios del Cretáceo Superior – Paleoceno (Myers, 1980).

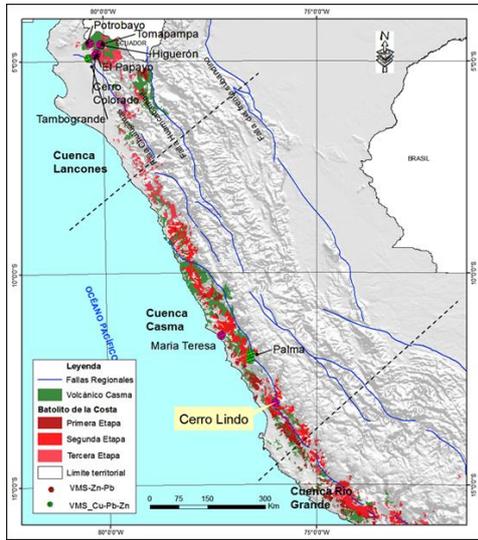


Figura 1. Distribucion del volcánico Casma y el Batolito de la Costa en la franja Costanera del Perú y la distribución de yacimientos tipo VMS.

3. Geología local del yacimiento Cerro Lindo

El yacimiento de Cerro Lindo está hospedado en una secuencia volcánica félsica (presenta intercalaciones sedimentarias) con afloramientos expuestos en una franja de dirección NW-SE y que pertenecen a los niveles inferiores de la formación Huaranguillo. Los sistemas volcánico y mineralizado están truncados por intrusiones polifásicas del Batolito de la Costa (unidades: Catahuasi, Incahuasi y Tiabaya), lo cual ha generado amplias zonas de metamorfismo termal que ocasionó la recristalización de los sulfuros primarios y la formación de hornfels en los halos de alteración hidrotermal (Figura 2). (Canales, 2015).

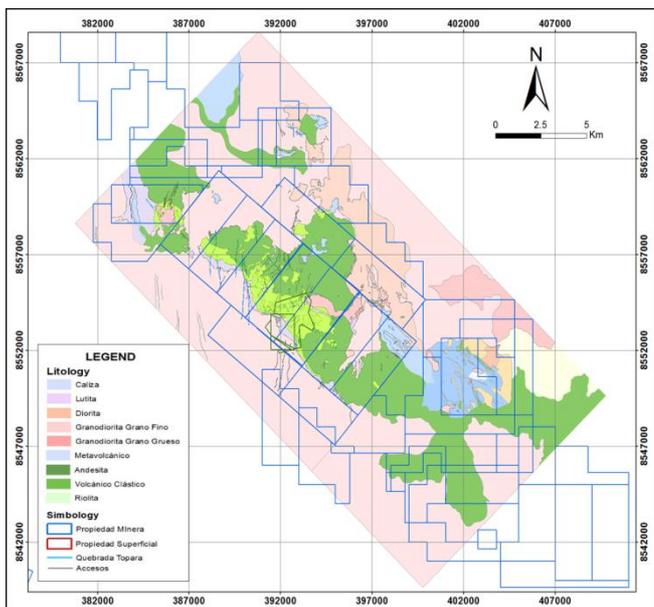


Figura 2. Geología local de la UM. Cerro Lindo.

4. Litoestratigrafía

Las rocas volcanosedimentarias huéspedes de Cerro Lindo pertenecen a la formación Huaranguillo, que se divide en tres miembros (inferior, superior y techo). El miembro inferior está compuesto por riolitas conformando asociaciones de flujos masivos coherentes y hialoclastitas. El miembro superior muestra la base de una secuencia sedimentaria de lutitas discontinuas, secuencias volcánicas andesíticas gris verdosas con intercalaciones de lutitas. El miembro techo consta de secuencias calcáreas con pequeños niveles de margas (Figura 3).

Esta secuencia volcanosedimentaria es cortada por batolitos pertenecientes a las superunidades Catahuasi, Incahuasi y Tiabaya. Estas rocas son de composición granodiorítica a tonalítica, variando entre ellos su granulometría. Diques pórfido andesíticos se muestran cortando a todas las unidades, presentando una orientación preferencial N-S (Hinostroza, 2009).

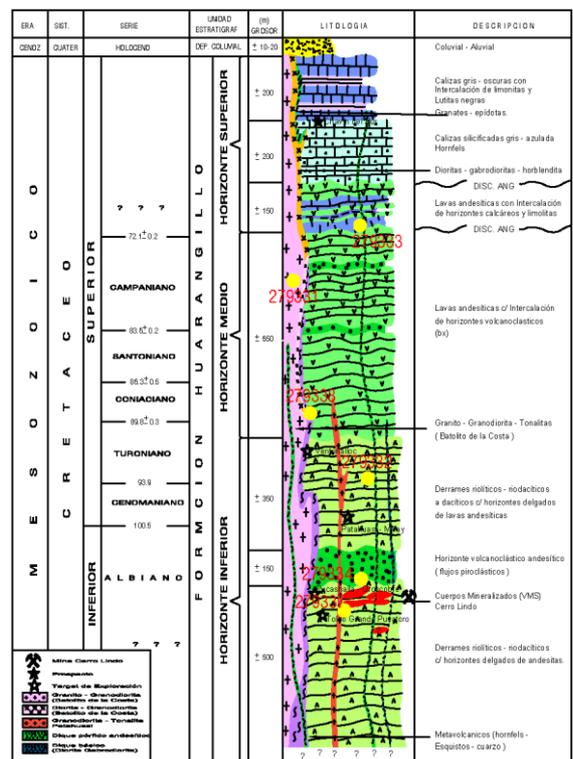


Figura 3. Columna estratigráfica del yacimiento Cerro Lindo.

La relación temporal relativa entre las unidades geológicas fue recientemente complementada con análisis geocronológicos (U-Pb en zircón) que permitió posicionar los eventos en edades absolutas. Los riolitos huéspedes de la mineralización de sulfuros oscilan entre edades de (105.7 Ma y 106.9 Ma ± 0.2), las cuales son sobreyacidas por flujos lávicos andesíticos más jóvenes. Toda esta secuencia volcánica es cortada por el Batolito de la Costa, aquí representado por

un cuerpo granodiorítico de grano medio (Patahuasi) de edad ($93.72\text{Ma} \pm 0.2$), seguido de una intrusión de diques dioríticos de edad ($89.87\text{Ma} \pm 0.3$); intrusivos de menor dimensión que los mencionados anteriormente son representados por diques de granodiorito de grano grueso, de edad ($82.35\text{Ma} \pm 0.2$) cortados por diques porfiríticos, de edad ($73.89\text{Ma} \pm 0.2$) (Figura 4).

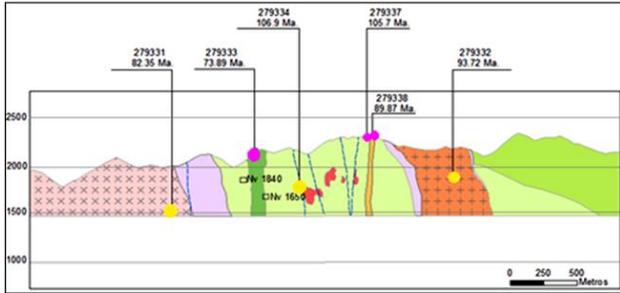


Figura 4. Sección longitudinal con la ubicación de las muestras de datación.

5. Geoquímica de superficie en los alrededores del yacimiento

Los datos geoquímicos provienen de la campaña de Phelps Dodge entre los años 1996-1997, esta empresa realizó muestreo geoquímico regional en las zonas o lugares donde presentaban fuerte anomalía de color. Ellos colectaron 3,998 muestras para el muestreo geoquímico, las cuales fueron analizadas con ICP multielemental (53 elementos) y fire assay (Au).

Cobre, zinc y plomo en muestras de roca destacan claramente la porción aflorante de la mineralización de Cerro Lindo, pero también indica presencia de anomalías en los *targets* regionales de Pucasalla-Orcocobre, Patahuasi y en menor proporción en la zona de Millay. Fueron considerados anómalos todos los valores en roca por encima de 1,000 ppm Zn, Cu o Pb (Figuras 5, 6 y 7). La plata exhibe valores anómalos (20 ppm) en buena correlación con las anomalías de Zn (Figura 8).

El bario también delimita claramente la zona mineralizada aflorante (Figura 9), por lo que la baritina es un mineral abundante en las porciones más ricas en zinc de la mineralización de Cerro Lindo.

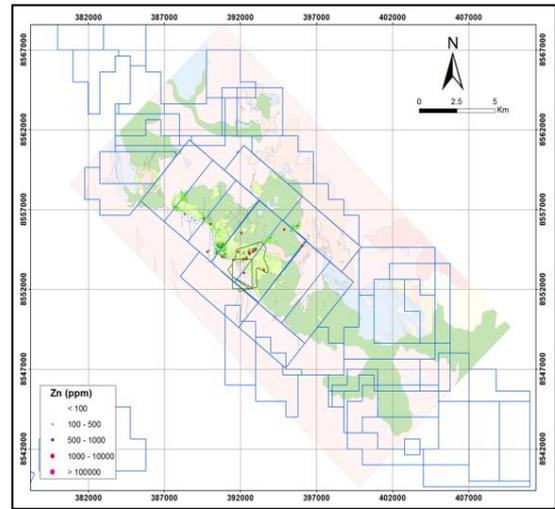


Figura 5. Distribución geoquímica del Zn.

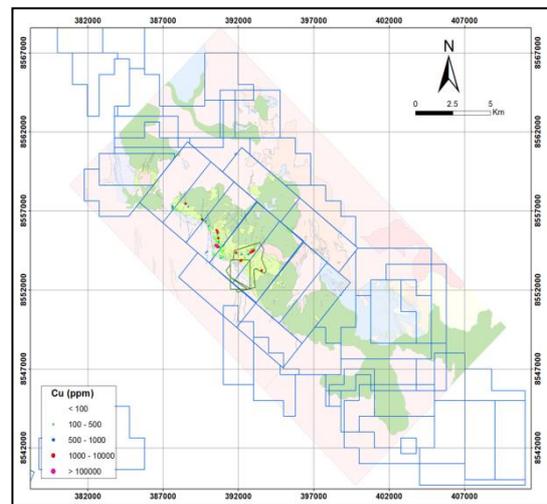


Figura 6. Distribución geoquímica del Cu.

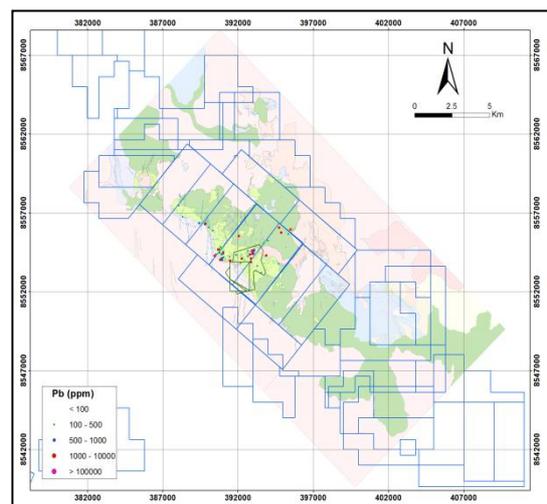


Figura 7. Distribución geoquímica del Pb.

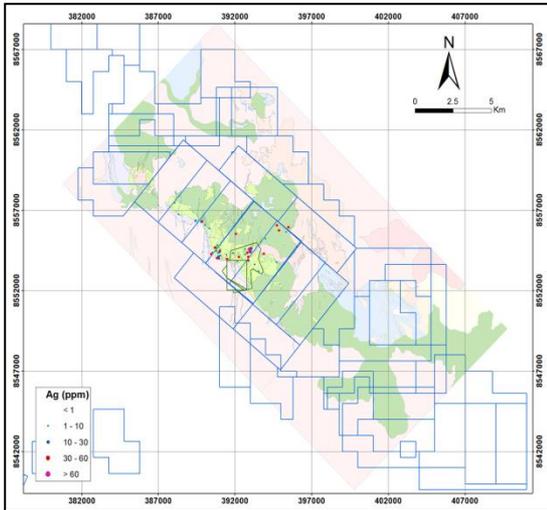


Figura 8. Distribución geoquímica del Ag.

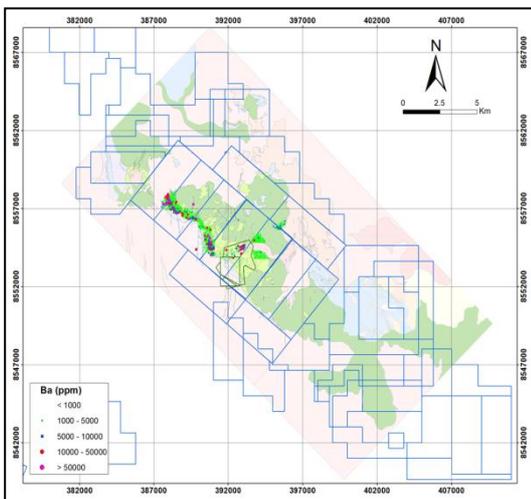


Figura 9. Distribución geoquímica del Ba.

6. Geofísica en los principales *targets* de exploración

El método utilizado incluyó mediciones de DCIP distribuido y MT (Titan 24) para un total de 24 líneas de medición (93 km lineares en total), que se sumaron a las líneas iniciales efectuadas sobre el yacimiento el año 2012. Las líneas cortaron transversalmente los 8 *targets* geoquímicos de exploración (Figura 10). Algunos de los *targets* de interés generados por la geofísica no tienen correlación con las anomalías geoquímicas, y pueden estar relacionadas a mineralizaciones ocultas.

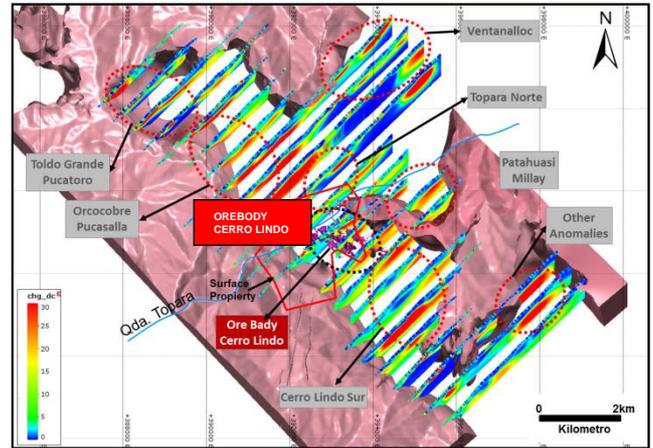
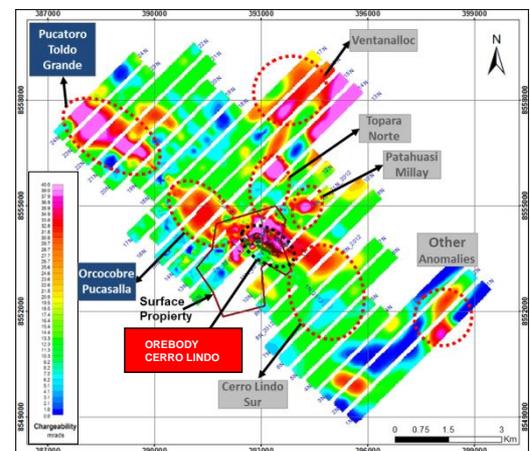
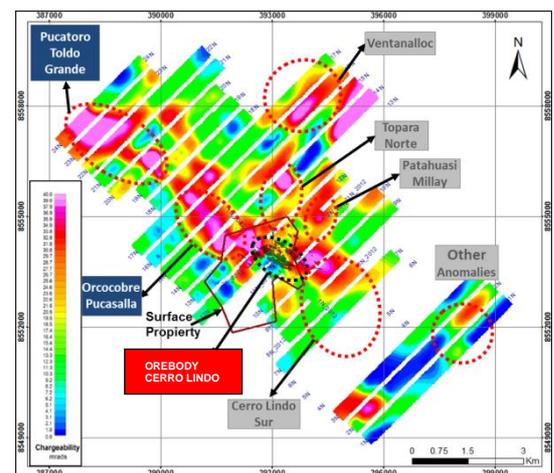


Figura 10. Distribución espacial de las líneas geofísicas y los principales *targets* de exploración.

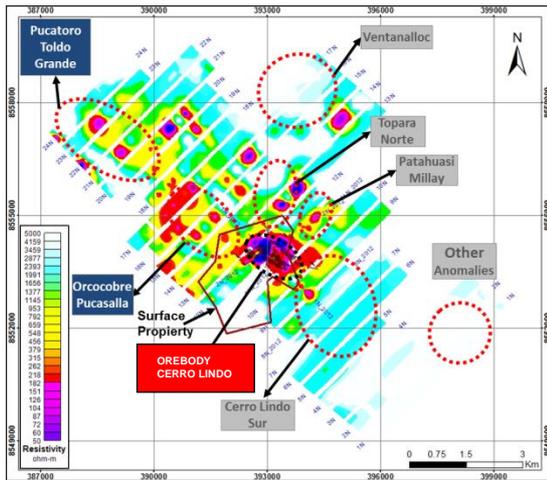
6.1. Cargabilidad HS (Ref (m-rads)-cota 1800



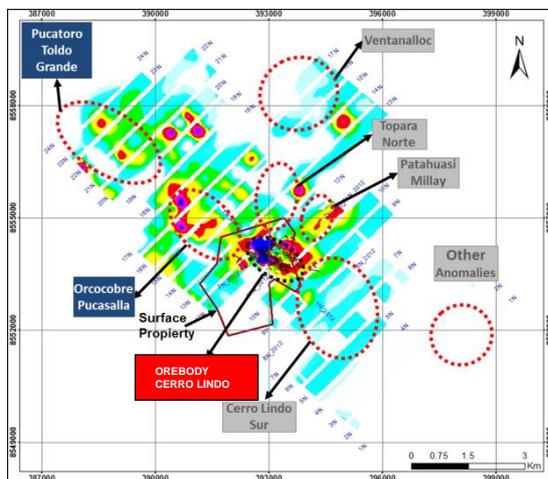
6.2. Cargabilidad HS (Ref (m-rads)-cota 1600



6.3. Resistividad DCMT Rho (ohm-m)-cota 1800



6.4. Resistividad DCMT Rho (ohm-m)-cota 1600



6.5. Cargabilidad y resistividad de la mineralización económica

Los cuerpos mineralizados económicamente presentan elevados contenidos de pirita y sulfuros de cobre y zinc subordinados. El carácter masivo de la mineralización prevee una respuesta muy baja de resistividad, con niveles altos de cargabilidad en zonas de diseminación y vetilero irregular de sulfuros que conforman la periferia de zonas de sulfuro masivo.

La geofísica Titan24 fue muy eficiente en delimitar, desde el punto de vista distrital (kilómetros), la zona conocida de ocurrencia de los sulfuros masivos. Sin embargo, en una mirada en la escala de depósito (decenas de metros) la respuesta del Titan24 es dudosa, marcando con baja precisión la zona a ser perforada.

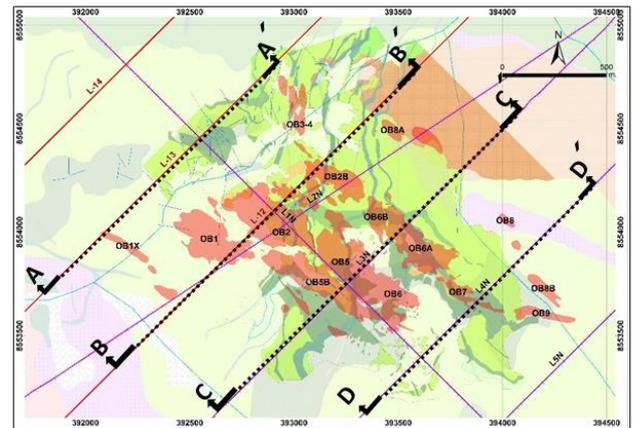


Figura 11. Secciones longitudinales en planta.

6.5.1. Cargabilidad

El área extensa de la anomalía alta de cargabilidad no denota necesariamente la presencia de sulfuros masivos ya que la diseminación de pirita en riolitas tiende a producir polarización aún más fuerte que en la zona masiva. Los contrastes laterales fuertes de la anomalía de muy alta cargabilidad parecen estar asociados a controles estructurales sobre los cuales se han formado los cuerpos mineralizados masivos.

6.5.2. Resistividad

En escala distrital (kilómetros) el Titan24 muestra buena correlación entre baja resistividad y cuerpos mineralizados conocidos. Sin embargo, en la escala de depósito (decenas de metros), la baja resistividad marca una zona extensiva que incluye los cuerpos mineralizados, pero no restringe a ellos. Eso sugiere que el Titan24 ha tenido éxito en marcar la zona mineralizada, pero con resolución dudosa para definir claramente *targets* de perforación.

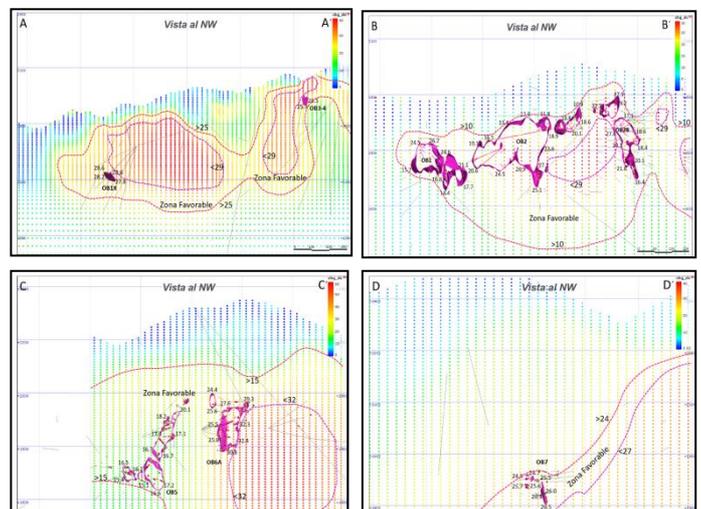


Figura 12. Cargabilidad en las 4 secciones longitudinales.

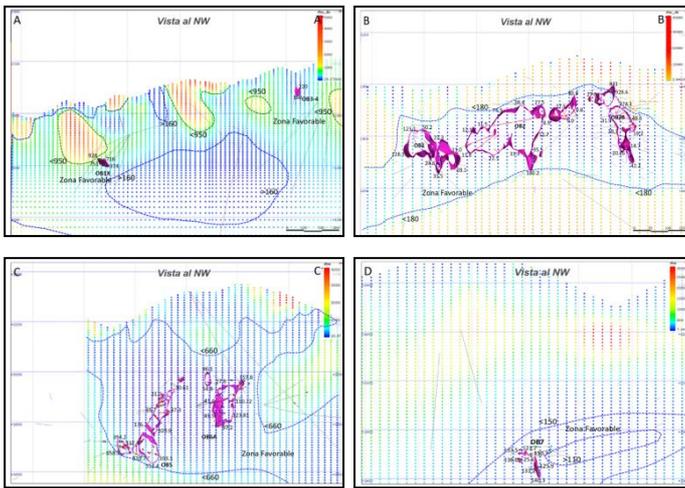


Figura 13. Resistividad en las 4 secciones longitudinales.

6.6. Aplicaciones de la geofísica en trabajos de exploración del OB 3-4

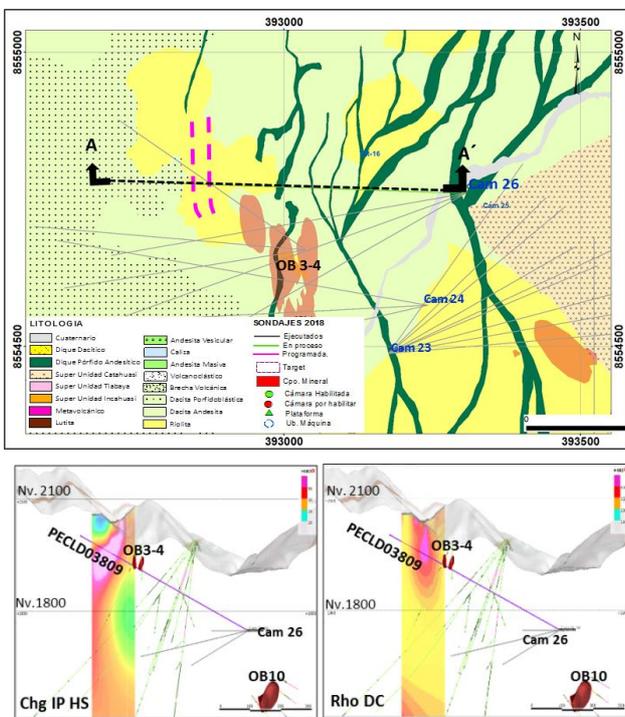


Figura 14. Sección en planta y transversales del sondaje programado el 2018 teniendo en cuenta las anomalías geofísicas Rho Dc: 50 – 260 mrads Chg IP HS: 30-40 Ohm-m.

Teniendo en cuenta la anomalía geofísica Rho Dc: 50–260 mrads Chg IP HS: 30-40 Ohm-m, se programó el sondaje PECLD03809, que interceptó en la zona de anomalía sulfuro semimasivo con textura brechada, los fragmentos son subangulosos de riolita, en matriz de dacita con contenido de sulfuro de Py 25%, Sp <1%, Cpy 1%.

7. Litogeoquímica

Como se sabe, los depósitos VMS tienen halos de alteración que se extienden a las zonas externas de la mineralización. Estos halos pueden ser dos a tres veces más anchos que la parte económica de los depósitos y, es por ello, que se planteó hacer una zonación por alteración teniendo en cuenta los análisis de litogeoquímica.

Estas muestras se analizaron por ICP-MS por los métodos MA200 (digestión multiácida que determina 45 elementos trazas) y por LF200 (fusión en metaborato de litio, para caracterización de elementos mayores y refractarios).

7.1. Alteración Box Plot

El gráfico que compara el índice de alteración de Hashimoto (AI; Ishikawa et al., 1976) versus el índice chlorite-carbonate-pyrite index (CCPI; (Large et al., 2001) es usualmente utilizado para identificar un vector de alteración para mineralización VMS. Se evidencia que la alteración cercana al cuerpo mineral corresponde al incremento progresivo de, sericita-clorita-pirita, aumento de la alteración clorita-pirita hacia la parte más proximal del cuerpo, generando el ensamble general al centro de los cuerpos (sericita+cuarzo) (Figura 15). Haciéndose una comparación entre los cuerpos mineralizados (Figura 16), tenemos que el OB5 es el que presenta mayor halo de alteración de sericita con respecto a los demás cuerpos mineralizados estudiados, ya que la mayor cantidad de sus muestras caen en este dominio. La sericita que marca estos diagramas presenta elevado contenido de K (ver figura 17, diagrama Na₂O vs K₂O). Tomando en cuenta este diagrama se estaría hablando de una sericita potásica en las rocas proximales al cuerpo, que aumenta progresivamente hacia el centro del sistema. Otro factor determinante es el incremento del contenido de hierro en las cloritas más proximales (Fe-clorita) que por esta razón adquieren un color verde más oscuro. Nótese que las rocas más alejadas presentan débil a moderada alteración de carácter menos ácido con presencia de venillas de calcita producto de alteración deutérica, pero presenta algunas anomalías de bario que podrían corresponder a niveles distales de nuevos horizontes mineralizados.

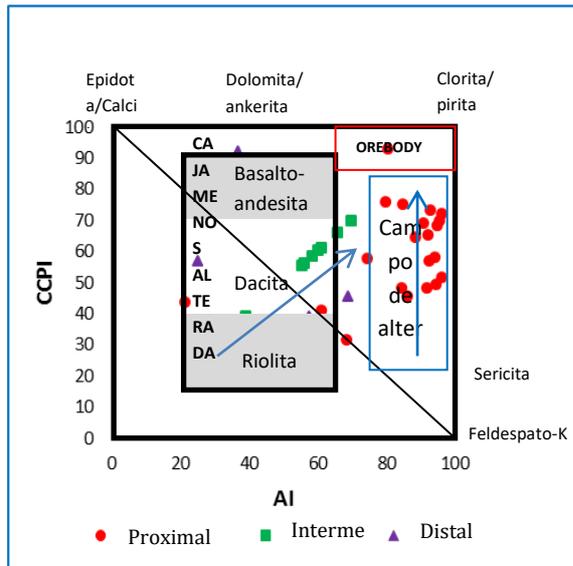


Figura 15. Alteración Box Plot (AI vs CCPI (Large et al., 2001).

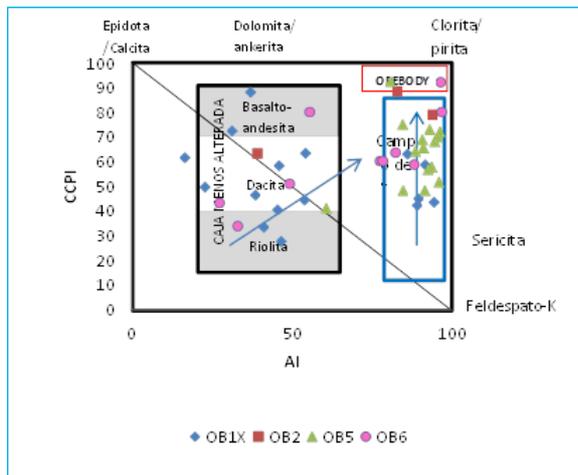


Figura 16. Alteración Box Plot teniendo en cuenta los cuerpos mineralizados (AI vs CCPI (Large et al., 2001).

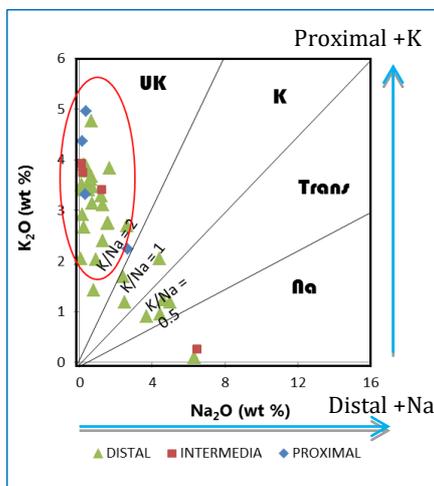


Figura 17. Cristalización de feldspatos por el enriquecimiento de Na-K y su relación con los minerales de alt. (Peccerillo & Taylor, 1976; modificado por Le Maitre, 1989).

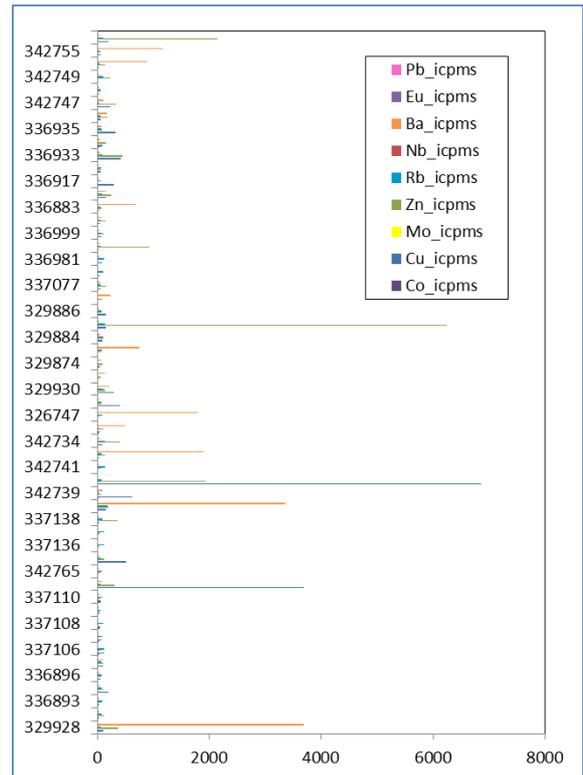


Figura 18. Comportamiento de los elementos en las rocas volcánicas más Proximal al cuerpo.

8. Modelo de alteración según resultados de terraspespec

La zona de alteración hidrotermal se caracteriza por la ocurrencia de los siguientes ensambles de alteración cuya representación espacial constituye un zoneamiento:

- ✓ Silicificación: en la parte centro y en las parte baja de los cuerpos mineralizados, la sílice presente es añadida en la zona de alteración. La silicificación está asociada a la presencia de sericita en la matriz.
- ✓ Cloritización: bordea las zonas de silicificación.
- ✓ Sericitización: en la parte lateral del sistema donde hay menor temperatura.

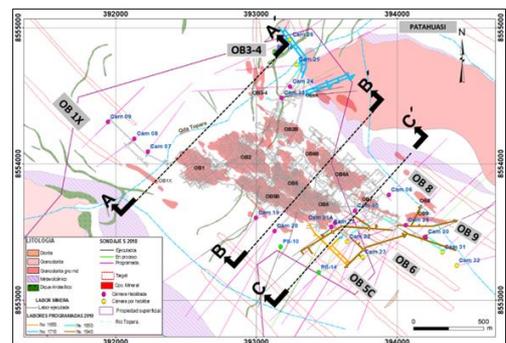


Figura 19. Distribución espacial de las 3 secciones longitudinales.

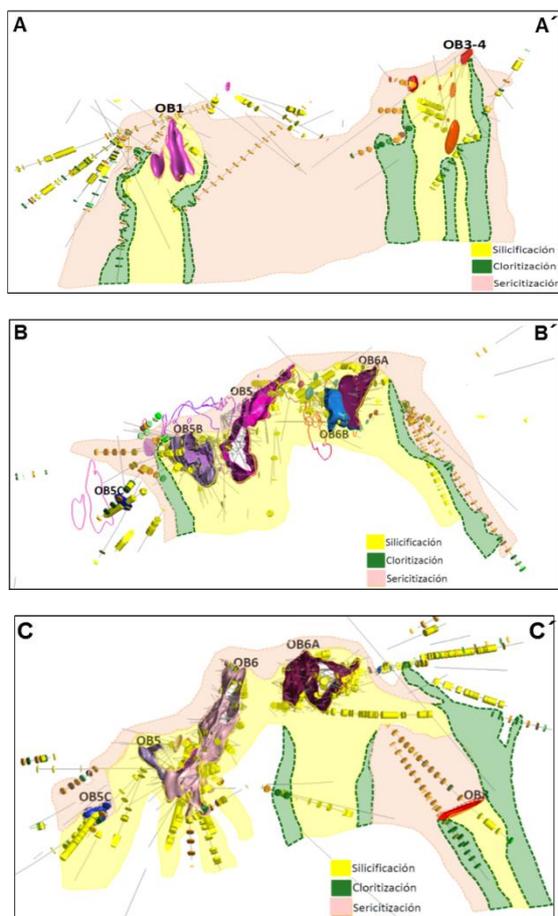


Figura 20. Modelo de alteración, para las 3 secciones longitudinales de la Figura 19.

9. Conclusiones

El depósito Cerro Lindo se emplaza dentro de una franja volcánico sedimentaria de la formación Huaranguillo (cretácico medio). Estas rocas, así como la mineralización VMS, se acumularon en un ambiente extensional marino en los estadios iniciales de *rifting* asociados a vulcanismo transicional y sedimentación pelágica carbonatada. Otros depósitos de sulfuros masivos de similar envergadura y edad se ubican en la cuenca Lancones, Tambo Grande VMS, pero estos difieren en tener una afinidad magmática más primitiva, toleítica y transicional.

Cerro Lindo, presenta características similares a los depósitos VMS del tipo Kuroko. El depósito tiene un claro control estructural, con sus cuerpos elongados en el azimut N120° (NW-SE). Esas estructuras trabajaron junto con estructuras N-S y NE-SW controlando la sedimentación de la cuenca y posiblemente la ascensión de los fluidos hidrotermales responsables de la formación del depósito.

Desde el punto de vista geológico la presencia de domos riolíticos y brechas son utilizados como guías prospectivas. Estas zonas típicamente están

asociadas con el ensamble de alteración hidrotermal de sericita+cuarzo+óxidos de hierro. Estas evidencias son comparadas con los índices. CCPI, AI y el diagrama de Na-K marcan tendencias para priorización de *targets* para perforación.

Utilizándose todos los datos geoquímicos, geofísicos y geológicos queda claro el potencial existente en los *targets* de exploración: Topara, Pucasalla-Orcocobre, Patahuasi Millay, Pucatoro, y Ventalloc, *targets* regionales de Cerro Lindo donde poca o ninguna perforación fue todavía ejecutada.

Agradecimiento

A la compañía Minera Nexa Resources por facilitar la información requerida para la elaboración del presente trabajo y al revisor Marcello Imaña por la revisión de este paper.

Referencias

- Canales, J. 2015. Cartografiado geológico y muestreo geoquímico y litogeoquímico cerro lindo.
- Hinostroza de la Cruz, J.H. 2009. Proyecto Cerro Lindo. Geología y Zonamiento Cu-Zn. Tesis para Optar el Título Profesional de Ingeniero Geólogo. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica. Lima, Perú.
- Hochschild Plaut. 1999. Instituto de Ingenieros de Minas del Perú. Pro Explo 99.
- McCourt, J. 1981. The geochemistry and petrography of the Coastal Batholith of Peru, Lima segment. Vol. 138, pp. 407-420.
- McSween, H.; Richarson, S. & Uhle, M. 2003. Geoquímica: Pathways and Processes, 2ª edición. Columbia University Press. New York. 380 p.
- Meyers, J. 1980. Geología de los cuadrángulos de Huarney y Huayllapampa, Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico del Perú, Ingemmet. Boletín N°033.
- Piercey, S.J. Paradis, S, Murphy, D.C. and Mortenses, J. K. 2001. Geochemistry and tectonic setting of felsic volcanic rocks in the Finlayson Lake district Yukon Canada. Economic Geology v.96 p.1877-1905.
- Salazar, H., Landa, C. 1993. Geología de los Cuadrángulos de Mala, Lunahuana, Tupe, Conoyca, Chíncha, Tanatara y Castrovirreyna. Ingemmet, Sector Energía y Minas. Peru. Boletín No. 44.
- Steinmuller, K., Chacon Abad, N., Grant, B. 2000. Volcanogenic Massive Sulphide Urabe, T., Scott, S.D., Hattori, K., 1983. A Comparison of

Foot-Wall Alteration and Sulfides Deposits. In
The Kuroko and Related Volcanogenic Massive
Sulfide.

Vidal C. 1980. Mineral deposits associated with the
Coastal Batholith and its volcanic country rock.
Thesis, Universidad de Liverpool, 239 p.

