

## ***Lithocaps* y su conexión a estructuras: de los datos abiertos a la prospección puntual de un sector del suroeste de Perú**

**Aldo Bendezú Juárez<sup>1</sup> y Cesar Cabellos Roncal<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Maskhay Consultores E.I.R.L, Lima, Perú (aldobendezujuarez@gmail.com)

<sup>2</sup> West Mountain Company S.R.L, Lima, Perú (cecabellos@gmail.com)

### **1. Resumen**

La exploración por *lithocaps* es vectorizada identificando sus rasgos mineralógicos, geofísicos, geoquímicos y elementos críticos de estructuras de escala regional genéticamente asociadas. *Lithocaps* de las franjas metalogenéticas del Mioceno, en la región suroeste de Ayacucho, son minados por Au+/-Ag, presentan ocurrencias minerales o anomalías importantes de metales. En esta región se documentó una familia principal de estructuras orientados ESE-ONO. Un grupo de estructuras de esta familia esbozan un corredor de ~180 km de largo cuyo ancho es muy estrecho (<10 km). Dentro del corredor, las estructuras están distribuidas en *échelon* cuyos segmentos miden decenas de kilómetros. Los segmentos "enlazan" *lithocaps* extensos (<30 km<sup>2</sup>) que hospedan cuerpos de alteración argílica avanzada y vetas polimetálicas marginales. Los cuerpos de argílica avanzada son conformados por sílice, alunita, natroalunita, dickita, pirofilita y minerales del grupo APS. Estos cuerpos presentan un control estructural, orientaciones sistemáticas y son análogos entre los *lithocaps*. La relación angular (20°- 40°) entre las orientaciones de la familia principal de estructuras y el paleoesfuerzo principal máximo indica que las estructuras estuvieron favorablemente orientadas para un movimiento sinistral. Las orientaciones de los cuerpos de alteración argílica avanzada son consistentes con ese movimiento. Estas características, y la relaciones espaciales y angulares sugieren que las estructuras ESE-ONO controlaron el desarrollo de los *lithocaps* en zonas locales de transpresión bajo un régimen de *strike-slip*.

### **2. Introducción**

Los *lithocaps* son áreas extensas, comúnmente mayor a 20 km<sup>2</sup>, de alteración argílica con núcleos de alteración argílica avanzada (Sillitoe, 1995) relacionados al desarrollo de sistemas de pórfidos

de Cu (Hedenquist et al., 1998). Estos son de interés por su potencial para hospedar diferentes tipos de mineralización de Au, Ag, Cu, Mo y metales base. Los tipos de mineralización asociados incluyen depósitos de: alta sulfuración de Au+/-Ag+/-Cu, ápices de stocks de pórfidos de Cu+/-Au +/-Mo y depósitos polimetálicos de sulfuración intermedia (Sillitoe, 2010).

Para vectorizar la exploración, es fundamental identificar las estructuras regionales que están relacionadas genéticamente al origen de *lithocaps*. Esa relación es pobremente entendida y escasamente documentada en la literatura. Sin embargo, la filiación genética puede ser inferida por la relación espacial entre estructuras y el *footprint* de *lithocaps*. Complementariamente, las orientaciones de estructuras subsidiarias dentro de los *lithocaps*, deben de ser consistentes con los movimientos de las estructuras regionales. Una identificación efectiva de esas estructuras se logra con el análisis refinado de: imágenes satelitales, procesamiento de imágenes DEM y estudios geofísicos.

A escala regional, los *footprints* mineralógicos de los *lithocaps* pueden ser detectados mediante sensores remotos Landsat y Aster (Hedenquist, et al. 2000; Robert et al, 2007). A escala del *lithocap* la mineralogía y su zonamiento se puede confirmar y refinar con análisis por espectrometría (e.g. PIMA, TerraSpec y Raman).

Anomalías geoquímicas concomitantes a *footprints* de alteración argílica avanzada pueden ser reveladas en el análisis de sedimentos de quebradas, donde anomalías de P son característicos (Sillitoe, 1995). Por otro lado, aunque las anomalías de Au y Ag son los mejores indicadores de potenciales cuerpos mineralizados dentro de *lithocaps*, se deben analizar otros importantes indicadores geoquímicos de la "suite" epitermal (John et al, 2018).

Otros factores geológicos asociados a *lithocaps* son las marginales ocurrencias de mineralización con estados de sulfuración intermedia y sus

*pathfinders* derivados (Sillitoe, 2010; Chang et al, 2011; Rainbow, 2009). *.(esta parte no se entiende bien, cual es el mensaje.*

En este estudio integramos los elementos geológicos descritos, más nuestras observaciones de campo, con el fin de revelar la conexión genética estructuras-*lithocaps*. Explotamos la información de plataformas de datos abiertos (datos GIS) para generar un marco conceptual del modelo. La principal fuente de datos usada fue del portal GEOCATMIN. Esto implica un programa de exploración rápido y de bajo costo.

El sector explorado en este estudio es un segmento de los cinturones metalogenéticos del Miocénico del suroeste de Ayacucho. En esa región, *lithocaps* han sido reconocidos, explorados y explotados. Las características e información de esta región brindan una oportunidad excelente para evaluar la relación estructuras-*lithocaps*. Proponemos que la actividad de las estructuras de escala regional es un control de primer orden en la localización de *lithocaps* y la focalización de cuerpos silíceos dentro de estos. Esa actividad es correlacionada con estudios estructurales en los alrededores (Ayala, 2015) y estudios a escala de *lithocaps* (García, 2017). Así, la vectorización de la exploración a lo largo del rumbo de estructuras favorables resultaría en un modelo de exploración altamente predictivo.

### 3. Geología Regional

El área de estudio se extiende sobre la región suroeste de Ayacucho cubriendo un área de ~180x60 km. Un resumen de la geología es proporcionada abajo, para más detalles deben consultarse las publicaciones: Olchanski (1980), Montoya et al. (1994), Brandmeier (2014) y Ayala (2015).

La litología en esta región incluye unidades desde el Jurásico al Mio-Plioceno. La unidad más antigua es el Grupo Yura del Jurásico-Cretácico, caracterizado por secuencias siliciclásticas (Fms. Puente, Cachios, Labra y Hualhuani) intercalada con una unidad intermedia carbonatada (Fm. Gramadal). En discordancia sobre el Grupo Yura sobreyacen las calizas del Cretácico Superior de la Fm. Arcurquina. Intruyendo estas unidades son reconocidas las Superunidades Incahuasi y Tiabaya, del Batolito de La Costa. Sobre estas reposan unidades volcano-sedimentarias del Eoceno al Mioceno temprano, del más antiguo al más joven: Fm. Para, Fm. San Pedro, Gp. Tacaza, y la Fm. Castrovirreyna. Sobreyaciendo estas

unidades se depositaron varias secuencias predominantemente piroclásticas conformadas por las Fm. Puquio, Fm. Huaylillas y Gp. Nazca. En discordancia sobre estas unidades se encuentran lavas más jóvenes, pertenecientes al Mio-Plioceno, del Gp. Barroso.

La geología estructural de región no está estudiada en detalle. Es ampliamente aceptado que tres procesos principales de deformación ocurrieron a escala regional. Las dos primeras (la Fases Peruana e Incaica) generaron pliegues y sobreescurrecimientos notables en las rocas pre Oligocénicas, y la Fase Quechua 1 que generó pliegues suaves en las unidades pre Miocénicas Medio. El último evento documentado, de edad post Mioceno Temprano, son fallas de rumbo regionales bajo un régimen de *strike-slip*.

Desde el punto de vista metalogenético el área de estudio abarca parte de los cinturones de Cretácicos y Mioceno (Fig. 1A).

### 4. Metodología de trabajo

El método de trabajo consistió en compilar toda la información disponible del portal GEOCATMIN, además de la obtención del DEM a partir de imágenes ALOS PALSAR obtenidas del portal de ASF (Alaska Satellite Facility) con las cuales se realizó el análisis de sombras. Un resumen gráfico es mostrado en la figura 1B. Tres categorías de análisis fueron consideradas: (I) Reconocimiento de estructuras de escala regional y distrital; (II) Elementos asociados a la actividad hidrotermal; y (III) Análisis de estructuras dentro de los *lithocaps*. Dentro de la primera categoría fueron consideradas cinco capas de información para definir las estructuras: (1) Imágenes aéreas de Bing Maps; (2) Imágenes de sombras en las 4 direcciones habituales E-O, N-S, NE-SO y NO-SE; (3) Imagen reducida al polo de magnetometría; (4) Imagen de la señal analítica de magnetometría y (5) Estructuras regionales identificadas. Con estos datos se procesó un mapa de densidad de fracturas para determinar las áreas de mayor permeabilidad.

Para la segunda categoría se consideraron los elementos asociados a la actividad hidrotermal: Imágenes Landsat (áreas con alteración), minas, proyectos de exploración, ocurrencias minerales y aguas termales.

Para la tercera categoría se analizaron los *lithocaps*, minas y proyectos conocidas para definir anomalías geoquímicas relacionadas (la "suite" epitermal) y sus características estructurales. Esta

última es clave, estas deberían ser consistentes con el movimiento de las estructuras que las alojan.

La composición final de las tres categorías fue usada para reconocer las estructuras mayores que alojan la mayoría de potenciales *lithocaps*. Esta relación espacial implicaría un control de la actividad de las estructuras coetánea con procesos hidrotermales. Bajo esa hipótesis se evaluó el ángulo de reactivación (Sibson, 1985) de las estructuras con respecto al paleoesfuerzo principal máximo ( $\sigma_1$ ). Así, es establecido el marco tectono-hidrotermal para definir que estructuras focalizaron los *lithocaps*.

## 5. Resultados: Estructuras y Lithocaps

Las anomalías geofísicas de la señal analítica de rumbo ESE-ONO coinciden con *sets* de fracturas que cortan las rocas del Gp. Nazca, además, trazas de estas desplazan horizontalmente unidades geológicas del Mio-Plioceno. Las relaciones de corte indican que la actividad de estas estructuras fue post Mioceno Temprano. Esas estructuras son paralelas a las fallas sinestrales cartografiadas en las cercanías de la región. Este movimiento es consistente con los esfuerzos regionales, las estructuras estuvieron favorablemente orientados a la dirección del esfuerzo principal mayor ( $\sim 20^\circ$ - $40^\circ$ ) para una reactivación durante todo el Mioceno Medio y Tardío, época del desarrollo de los belts metalogénicos en ese sector.

Las estructuras ESE-ONO más resaltables forman un corredor con la misma orientación de  $\sim 180$  km de largo y ancho menor a 10 km. Este corredor focaliza los *lithocaps* más grandes, minas productivas, muchas áreas mineralizadas y algunas fuentes termales (Fig. 1C). Dentro del corredor, las estructuras delinean una distribución en *échelon* cuyos segmentos miden decenas de kilómetros y “enlazan” *lithocaps* (Fig. 1C). Las orientaciones de los cuerpos silíceos tabulares dentro los *lithocaps* son consistentes con el movimiento sinistral de las estructuras ESE-ONO (Fig 1D).

Actividad hidrotermal reconocida en este corredor, previo a este estudio, son las minas Breapampa y Huamanloma (y su *lithocap* asociado), el *lithocap* de Pampas Galeras, muchas minas pequeñas y fuentes termales. Además, dentro de este corredor dos nuevos *lithocaps* fueron reconocidos y analizados en este estudio: los *lithocaps* de Minaschayoc y de Candente. Un resumen de las características de los *lithocaps* se ofrece a continuación de noroeste a sureste:

### 5.1. Lithocap Minaschayoc [rango 3]

Está ubicado en el extremo noroeste del corredor. La alteración ocupa un área de  $\sim 10$  km<sup>2</sup>. Varios cuerpos de sílice residual son flanqueados por alteración cuarzo-alunita y un halo exterior más extenso de alteración argílica. Análisis por TerraSpec indican que los principales minerales de la alteración argílica avanzada son: sílice, alunita, natroalunita, dickita, pirofilita y caolinita (Alva, 2020). Se caracteriza por una área resaltante de anomalía de molibdeno ( $< 183$  ppm) de forma semicircular de una diámetro de 1.3 km que fue revelado con una campaña de exploración geoquímica. Las estructuras más importantes son de rumbo, dextrales y sinestrales, y están orientados en dos familias principales: NE-SO y NNO-SSE.

### 5.2. Lithocap Pampas Galeras

Este *lithocap* está ubicado al sureste de la reserva Pampas Galeras. Ocupa un área  $\sim 30$  Km<sup>2</sup>. Es claramente reconocido en imágenes de Landsat. Presenta centros silíceos bordeados por arcillas blancas pulvulentas. En sus márgenes existen unas minas pequeñas que producen Au. Las principales estructuras y lineamientos tienen rumbos N-S y NE-SO.

### 5.3. Lithocap Candente

Este *lithocap* se ubica 25 km al sursureste del *lithocap* Pampas Galeras. Tiene un área aproximada de 20 km<sup>2</sup>. Es caracterizado por abundantes cuerpos de sílice residual y sílice-alunita con un fuerte control estructural que están configurados como *networks*. Estos son tabulares cuyas longitudes alcanzan varias centenas de largo hasta 1.4 km y sus anchos varían de unas decenas de centímetros hasta 15 m. Análisis de espectrometría Raman indican la presencia de alunita y minerales APS. Este *lithocap* exhibe importantes anomalías de Mo de hasta 299 ppm. Las estructuras silíceas están preferentemente orientadas NE-SO y los lineamientos NNO-SSE.

### 5.3. Lithocap Huamanloma [rango 3]

El *lithocap* Huamanloma hospeda mineralización epitermal tipo HS y produjo Au-Ag (García, 2017). Tiene un forma alargada de orientación N-S ocupando un área de  $\sim 32$  km<sup>2</sup>. Los principales minerales de alteración son sílice residual, alunita y arcillas. Los cuerpos de alteración y mineralización están orientados principalmente entre NS y NNO-SSE. Estructuras menores tienen orientaciones NE-SO y ESE-ONO.

### 5.4. Otras ocurrencias hidrotermales

La mina Breapampa, cae dentro de este corredor a 30 kilómetros de Huamanloma. Este yacimiento

es epitermal del tipo *HS*, los minerales de alteración principal son sílice, alunita y caolinita; Au y Ag están relacionados a oropimente y pirita; enargita ocurre marginalmente (Alatrística, 2018). Cerca al extremo sureste del corredor son ubicadas fuentes termales de baja a moderada temperatura y distribuidas a lo largo del rumbo ESE-ONO. En el sector sureste más extremo del corredor dos minas artesanales (mina Luicho) producen Au de estructuras orientadas NE-SO cuyas longitudes alcanzan unas centenas de metros.

## 6. Conclusiones

*Lithocaps* de los cinturones metalogenéticos del Miocénico en Ayacucho presentan un fuerte control estructural consistente con un régimen de *strike-slip*. Estos fueron controlados por sistemas de estructuras de escala regional orientados ESE-ONO las cuales constituyen un control de orden principal. Dos nuevos *lithocaps* fueron reconocidos en este estudio. Estos carecen de valores significantes de Au y Ag pero presentan altos valores de elementos guía (e.g. Mo, etc). La actividad y tipo de movimiento de las estructuras relacionadas a los *lithocaps* deben de ser consistentes con el marco tectono-hidrotermal en un lapso de tiempo definido. Comprobar el rol y relación de estructuras de escala regional con la formación de *lithocaps* permite vectorizar en un programa de exploración. Así, es fundamental la identificación precisa de estructuras favorables que focalizaron *lithocaps* para una exploración eficaz dentro de un modelo altamente predictivo. (el sentido de esta frase tampoco es claro, explicar mejor).

## Referencias

- Alatrística, M.E., 2018. Estudio geológico y control estructural empleando espectrómetro en la Unidad Minera Breapampa, Parccorcco-Parinacochas Ayacucho.
- Alva, L., 2020. Geoquímica, características mineralógicas y modelo en 3D del proyecto Minaschayoc: Exploración sistemática en *lithocaps* (Tesis de ingeniero-en proceso).
- Ayala, L., 2015. Sedimentología, estratigrafía y tectónica de la cuenca puquio, departamento de Ayacucho, Peru (Tesis de Ingeniero).
- Brandmeier, M., 2014. A remote sensing and geospatial statistical approach to understanding distribution and evolution of ignimbrites in the Central Andes with a focus on Southern Peru (Doctoral dissertation).
- Chang, Z., Hedenquist, J.W., White, N.C., Cooke, D.R., Roach, M., Deyell, C.L., Garcia Jr, J., Gemmell, J.B., McKnight, S. and Cuisson, A.L., 2011. Exploration tools for linked porphyry and epithermal deposits: Example from the Mankayan intrusion-centered Cu-Au district, Luzon, Philippines. *Economic Geology*, 106(8), pp.1365-1398.
- García, V., 2017. Prospección y exploración en el yacimiento epitermal de alta sulfuración de Au Huamanloma, Lucanas -Ayacucho, Perú (Tesis de Ingeniero).
- Hedenquist, J.W., Arribas, A.Jr, and Reynolds, T.J., 1998. Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system: Far Southeast-Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines: *Economic Geology*, 93, 373-404.
- Hedenquist, J.W., Arribas, A., and Gonzalez-Urien, E., 2000. Exploration for epithermal gold deposits. *Reviews in Economic Geology*, 13(2), pp.45-77.
- John, D.A., Vikre, P.G., du Bray, E.A., Blakely, R.J., Fey, D.L., Rockwell, B.W., Mauk, J.L., Anderson, E.D. and Graybeal, F.T., 2018. Descriptive Models for Epithermal Gold-Silver Deposits; USGS Scientific Investigation Report 2010-5070-Q.
- Montoya, M.A., García, W. and Caldas, J., 1994. Geología de los cuadrángulos de Lomitas, Palpa, Nasca y Puquio, USGS, Boletín 53A.
- Olchanski, E., 1980. Geología de los cuadrángulos de Jaquí, Coracora, Chala y Cháparra, INGEMMET, Boletín 34A.
- Rainbow, A., 2009. Genesis and evolution of the Pierina high-sulphidation epithermal Au-Ag Deposit, Ancash, Perú (Doctoral dissertation).
- Robert, F., Brommecker, R., Bourne, B.T., Dobak, P.J., McEwan, C.J., Rowe, R.R. and Zhou, X., 2007. Models and exploration methods for major gold deposit types: Proceedings of exploration 07: Fifth decennial international conference on mineral exploration.
- Sibson, R.H., 1985. A note on fault reactivation. *Journal of Structural Geology*, 7(6), pp.751-754.
- Sillitoe, R.H., 1995. Exploration of porphyry copper lithocaps. In Pacrim Congress 1995 'Exploring the Rim', Aust. Inst. MiningMetall., p. 527-532.
- Sillitoe, R.H., 2010. Porphyry copper systems. *Economic geology*, 105(1), pp.3-41.

## Ilustraciones

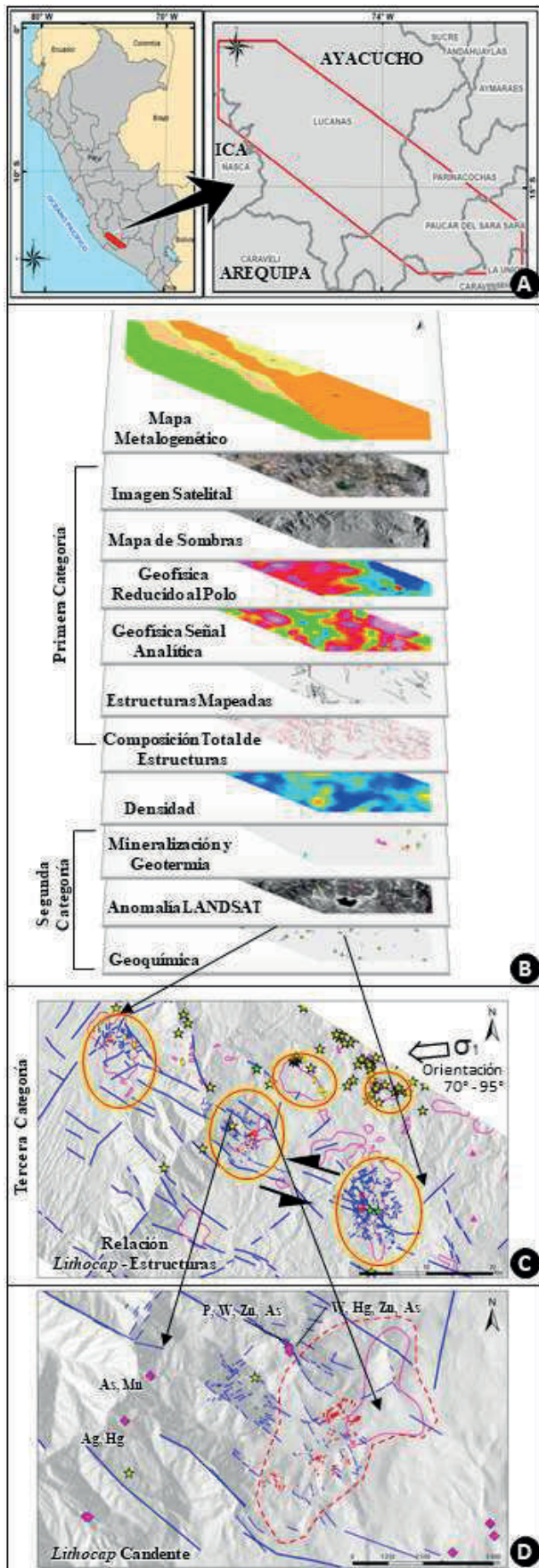


Figura 1. Resumen gráfico del análisis sistemático para ubicar *lithocaps* en el suroeste de Ayacucho.