

ISÓTOPOS DE Pb EN LOS DEPÓSITOS DE LA FRANJA DE EPITERMALES DE LOS VOLCÁNICOS DE LA CORDILLERA OCCIDENTAL AL OESTE DE HUANCAMELICA, PERÚ

Michael Valencia^{1*}, César Chávez^{2,3**}, Alex Santisteban^{1***}

¹ Instituto Geológico Minero y Metalúrgico – INGEMMET. Dirección de Recursos Minerales y Energéticos. Av. Canadá N° 1460. San Borja. Lima – Perú.) **mvalencia@ingemmet.gob.pe* ****asantisteban@ingemmet.gob.pe*.

² Universidade de Brasilia – UnB. Laboratorio de Geocronología y Estudios Geodinámicos. Campus Darcy Ribeyro. Ciudad Universitaria. Brasilia DF - Brasil. ***cchavezm@gmail.com*

³ Southern Copper Corporation – Agencia en Chile – SCC. Exploraciones Chile. General Borgoño 934. Antofagasta – Chile. ***achavez@southerncopper.cl*

Palabras Clave: Isotopos de Pb, Epitermales, Cordillera Occidental.

Abstract

Huancavelica epithermal deposits are located in the volcanics of the Western Cordillera of the Central Andes, and present an isotopic signature of Pb of the terrains and their metallogenetic relationships. The Bethania mineralizing fluids have a strong interaction with the Jurassic-Cretaceous siliclastic rocks, which generate mineralization in the form of bodies and depth mantles. In La Virreyna, hydrothermal fluids interact with the Oligo-Miocene volcanic rocks, thus generating veins and bodies scattered in depth as well. While in Cahuiña they are strongly affected by the coastal batholith, generating enrichment in Cu, where it is expected to develop porphyry in depth.

Resumen

Los depósitos epitermales de Huancavelica se encuentran emplazados en los volcánicos de la Cordillera Occidental de los Andes Centrales, y presentan una signatura isotópica de Pb relacionada con el substrato, y posiblemente una injerencia del Terreno Paracas. Los fluidos mineralizantes de Bethania interaccionan con las rocas silicoclásticas Jurásico-Cretáceas, generadoras de mineralización. En La Virreyna, los fluidos hidrotermales interaccionan con las rocas volcánicas del Oligo-Mioceno, generando de esta manera vetas y cuerpos diseminados en profundidad. Mientras en Cahuiña están fuertemente afectados por el batolito de la costa, generando el enriquecimiento en Cu, donde se podría haber desarrollado pórfidos en profundidad.

1. Introducción

El margen oeste de Sudamérica está en subducción continua desde el Cambriano hasta la actualidad (Ramos & Aleman, 2000; Boeckhout *et al.*, 2012, 2015; Loewy *et al.*, 2004; Ramos, 2010, 2018), donde los arcos magmáticos generaron depósitos minerales, en diferentes épocas metalogenéticas (Acosta *et al.*, 2017; Perelló *et al.*, 2003). Diversos trabajos han establecido la signatura isotópica del Pb del basamento y su interacción con cuerpos intrusivos (Musaka *et al.*, 1990; Tosdal *et al.*, 1999). El Pb es fácilmente medible en depósitos minerales, considerando las concentraciones - intrínsecamente bajas- de U con respecto al Pb y la composición similar del Pb en el mineral y el fluido hidrotermal (Tosdal *et al.*, 1999). Los isotopos de Pb de sulfuros son ampliamente usados para estudios de fuentes de Pb (Tosdal *et al.*, 1999; Richards *et al.*, 1991). Así, este trabajo busca determinar las relaciones entre la mineralización de los yacimientos de este sector de la Cordillera y el posible substrato-fuente.

2. Marco Geológico Regional

Los yacimientos se localizan en la Cordillera Occidental, entre las provincias de Castrovirreyna y Paucar del Sara Sara (Figura 1). El substrato comprende rocas mesozoicas del Triásico al Cretáceo Superior, conformadas por la Fm. Chocolate de lavas andesíticas y niveles volcano-sedimentarios (Spikings *et al.*, 2016), estas son cubiertas por unidades silicoclásticas y carbonatadas del Jurásico-Cretáceo (Grupo Yura-Grupo Goyllarisquizga) y finalmente las capas rojas de la Formación Casapalca (Cenozoico). Las secuencias sedimentarias del basamento están

cubiertas por las formaciones Castrovirreyna y Caudalosa, y Gpo. Barroso (Salazar & Landa, 1993), todas estas unidades predominantemente volcánicas.

Bethania y La Virreyna forman parte de la Franja XXIII de depósitos epitermales de Au-Ag del Mioplioceno; mientras que Cahuiña de la Franja X de depósitos de pórfidos de Cu-Mo del Cretáceo Superior (Acosta et al., 2017). Los estudios petromineralógicos, en éstos yacimientos, nos muestran una mineralogía similar (Valencia et al., 2020).

silícea con biotita ligeramente alterada. La mineralización se encuentra en una veta de cuarzo con pirita, galena y esfalerita (Muestra 27m-MMT-012; Tabla 1).

Cahuiña: Emplazada en andesitas y metaandesitas grises, porfíricas, con niveles de *hornfels* y están cortadas por vetas de cuarzo con esfalerita, calcopirita, y pirita (Muestra 28m-MMT-018; Tabla 1). Las rocas corresponden a los Volcánicos María Elena, que se correlacionan con la Fm. Copara del Cretáceo Inferior, sobreyacidas por la Fm. Chúlec y el Gpo. Sacsaquero (De la Cruz. & Jaimes, 2003). El prospecto se encuentra

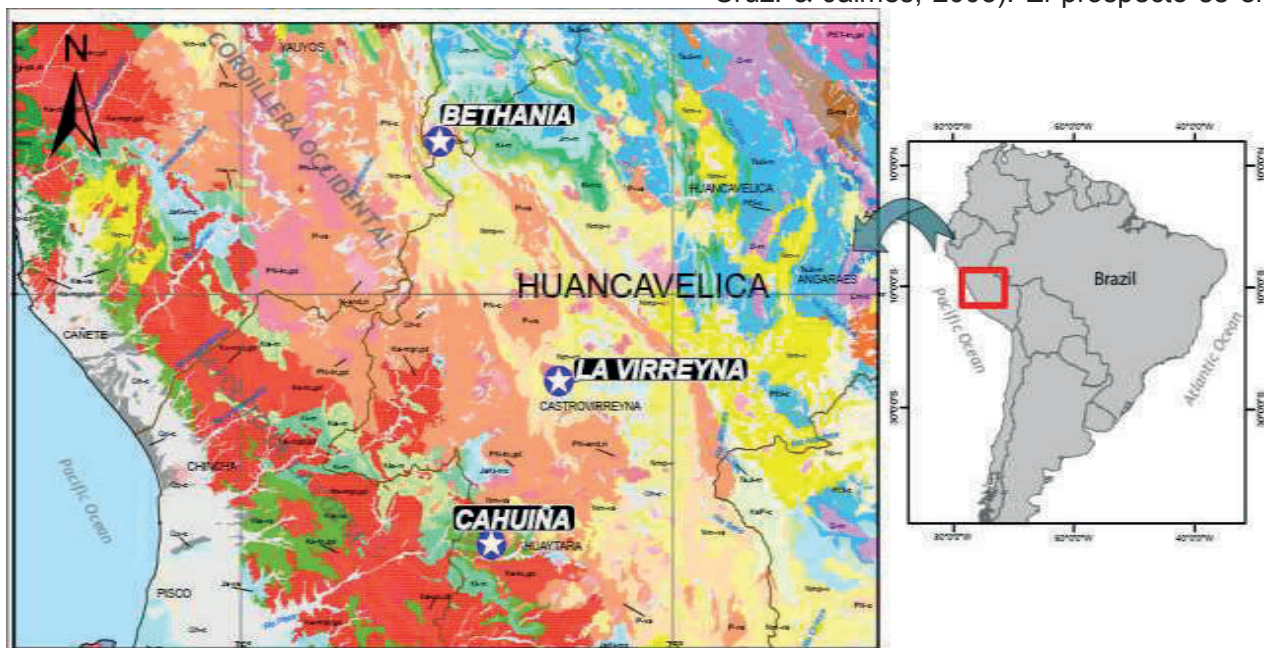


Figura 1 Mapa de localización de los depósitos Bethania, La Virreyna y Cahuiña, sobre el mapa geológico regional (Fuente: INGEMMET, Valencia et al., 2020). En rojo-rosado: intrusivos ; naranja-amarillo: volcánicos cenozoicos ; verde-azul : volc-sedimentarios mesozoicos

Sample	Lat.	Long.	Target	Unidad	Mineral	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	Error	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	Error	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	Error
26l-RMT-002	-12.636	-75.5318	Bethania	Gpo Barroso	Galena	18.7376	0.003	15.6467	0.001	38.717	0.003
27m-MMT-012	-75.2538	-13.2093	La Virreyna	Fm Caudalosa	Galena	18.6627	0.003	15.6173	0.001	38.631	0.003
28m-MMT-018	-13.564	-75.417	Cahuiña	Fm. Sacsaquero	Galena	18.5323	0.003	15.6375	0.001	38.514	0.003

Tabla 1: Cuadro con la información general y ratios de $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ y $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de las muestras analizadas en el presente trabajo.

4. Geología de los Depósitos

Bethania: Está emplazada en las tobas del Centro Volcánico Huayta (Grupo Barroso), que recubren a volcánicos de la Formación Alpabamba (correlacionable con la Formación Castrovirreyna), consisten en tobas de cristales de cuarzo y plagioclasa, en una matriz argilizada. La mineralización consiste en vetas de sulfuros con galena, calcopirita y pirita (Muestra 26l-RMT-002; Tabla 1). Regionalmente se advierte la presencia de rocas Jurásico-Cretáceas al este y norte

La Virreyna: Se encuentra en tobas riolíticas, de la Formación Caudalosa, con fenocristales de feldespatos argilizados (caolinita) en una matriz

al este del batolito de la costa (Figura 1).

5. Metodología

Se muestreó las estructuras mineralizadas de los yacimientos para la determinación de las fuentes de los metales, como: Au, Ag, Cu, Pb y Zn, a través de los isótopos de Pb; asumiendo que provienen del mismo fluido hidrotermal, por poseer un comportamiento geoquímico similar (Tosdal et al., 1999; Henley et al., 1984). Las muestras de galena (Tabla 1) fueron disueltas en ácido nítrico, las soluciones secadas y las sales purificadas usando un cromatógrafo de intercambio de iones (Thibodeau et al., 2012; Thibodeau et al., 2013).

Las medidas se tomaron en un espectrómetro de masa multicolor con el procedimiento descrito en Kamenov *et al.* (2004). Los errores reportados fueron calculados monitoreando la variación de NIST 981 menores de 0,003 (2Sigma) para estos valores (Tabla 1). Se utilizó el estándar NBS para control de errores: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = \pm 0.003$; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = \pm 0.001$; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = \pm 0.003$.

6. Resultados

Los isótopos de Pb en galena (Tabla 1), del yacimiento Betania, presentan un *trend* de pendiente moderada (Figura 2). Los sulfuros de Bethania ($^{261}\text{RMT-002}$), contenidos en el Gpo Barroso muestran un ratio $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.73$, más radioactivo respecto a los otros ratios ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.64$ y $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.71$) que son moderados. El incremento del valor de $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ podría deberse a un aporte de Pb de las rocas Jurásico-Cretáceas que afloran en este sector. La galena de Cahuiña ($^{28m}\text{MMT-018}$), en la Formación Sacsacero, presenta valores menos radiactivos de $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.53$ y se relacionan a un intrusivo; mientras que los valores de $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.63$ y $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.51$ son bajos y podrían obedecer a una potencial interacción entre granitoides carboníferos, y en menor proporción a rocas paleozoicas en profundidad. La galena de La Virreyna ($^{27m}\text{MMT-012}$) presenta valores intermedios de $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.66$; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.6173$ y $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.631$, éstos muestran claramente una interacción con un substrato posiblemente de edad Paleozoica, que no ha sido reconocida en la zona.

7. Discusión

En un sistema pórfido-epitermal, la composición isotópica del Pb se incrementa desde el núcleo del pórfido hacia la parte externa, en consecuencia los sistemas epitermales muestran valores altos de isótopos de Pb respecto a los valores en los pórfidos; sin embargo, existen sistemas muy complejos como consecuencia de la interacción de fluidos de fuentes variables (Bouse *et al.*, 1999; Richards *et al.*, 1991, Tosdal *et al.*, 1999). En Bethania ($^{261}\text{RMT-002}$) hay una fuerte interacción del substrato, de rocas Jurásico-Cretáceas, por su valor de $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, con una segunda fuente de rocas sedimentarias paleozoicas (Figura 2). Esto sugiere una potencial precipitación de sulfuros en los niveles silicoclásticos y calcáreos debido a la porosidad y permeabilidad que poseen, además del contenido de materia orgánica (Wang, 2010). Los valores de los isótopos de Pb, obtenidos en este estudio, son similares a los obtenidos por Tosdal *et al.* (1999) para yacimientos epitermales.

En La Virreyna ($^{27m}\text{MMT-012}$), los valores isotópicos intermedios de los ratios $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$,

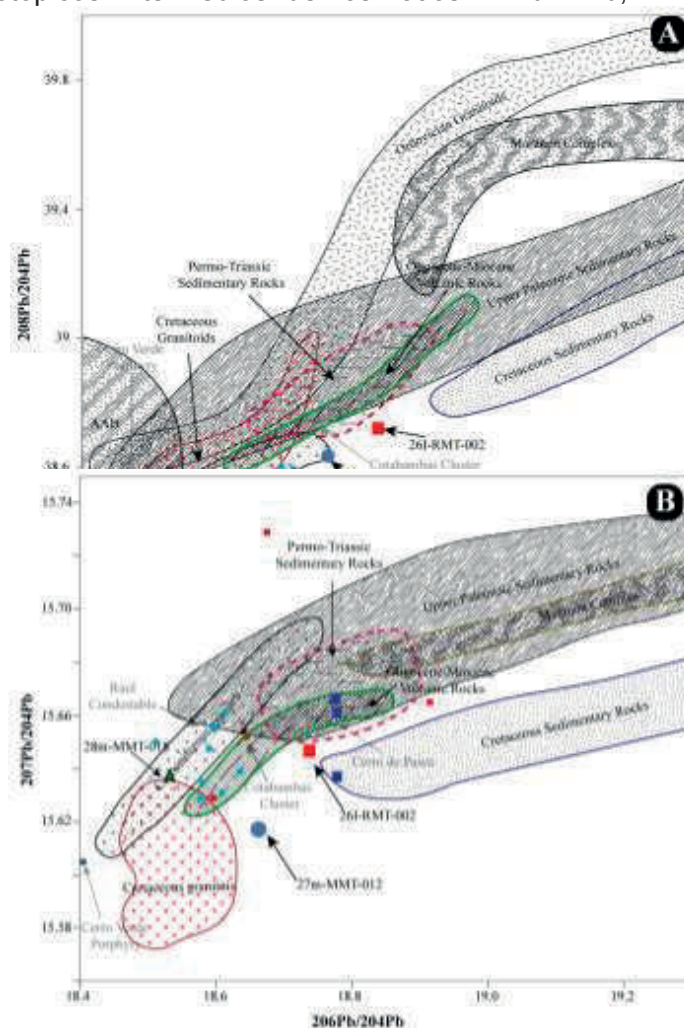


Figura 2: A, Campo Thoriogénico para $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ y B, Campo Urogénico $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ muestran los diagramas de evolución y sus potenciales fuentes que afectan los epitermales de Huancavelica. Se muestran los campos para rocas intrusivas sedimentarias y metamórficas. Thomson *et al.*, 2004; Tosdal *et al.*, 1999; Mamani *et al.*, 2010; Mukasa, 1986; Loewy *et al.*, 2004.

muestran un *trend* vertical, que nos indicaría la interacción del fluido mineralizante con las rocas volcánicas del Oligoceno. Como una segunda fuente tendríamos la interacción de los fluidos mineralizantes con rocas intrusivas carboníferas (Figura 2A), probablemente alojadas en profundidad.

En Cahuiña ($^{28m}\text{MMT-018}$) se tendría la interacción del Batolito de la Costa (posiblemente relacionada a un sistema porfirítico en profundidad) con fluidos hidrotermales, esto corroborado por la presencia de los proyectos cercanos de Corihuarmi, Coripampa, Cori-Huacollo, donde este último corresponde a un sistema pórfido-epitermal (Valencia *et al.*, 2020), estos proyectos se ubican en

la Franja X de depósitos de pórfidos de Cu-Mo del Cretáceo Superior.

Chiaradia (2014) concluye que el enriquecimiento mineral está vinculado directamente al espesor de la corteza continental, basado en los valores isotópicos encontrados para Cerro Verde (Musaka *et al.*, 1990), donde las intrusiones relacionadas a la mineralización se encuentran directamente influenciadas por el Terreno Arequipa-Antofalla, cuyas causas serían el espesor de corteza y/o a la composición de la misma (Ramos, 2010). Para el área de estudio el responsable sería el Terreno Paracas (Ramos, 2008).

8. Conclusiones

-Los fluidos mineralizantes de Bethania muestran una fuerte interacción con las rocas silicoclásticas (Jurásico-Cretáceas), lo cual podría generar mineralización en cuerpos.

-En el caso de La Virreyna, los fluidos hidrotermales poseen una fuerte relación con las rocas volcánicas del Oligo-Mioceno, habiendo generado la mineralización encontrada.

-Los fluidos mineralizantes del yacimiento Cahuiña parecen estar fuertemente relacionados al batolito de la costa, éste habría generado el enriquecimiento en Cu con la presencia de calcopirita, esfalerita y pirita (Valencia *et al.* 2020).

-El sistema epitermal localizado en la zona de Cahuiña podría estar relacionado a un sistema porfirítico en profundidad, debido a la interacción de los fluidos hidrotermales con el Terreno Paracas, como se ha reconocido en el *cluster* de depósitos en la región (Valencia *et al.* 2020)

Agradecimientos

Se agradece el respaldo del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico- INGEMMET para la ejecución del presente trabajo.

Referencias

- Acosta, J., & Sempere, T. 2017. Evolución Tectónica & Metalogénesis del Perú. Horizonte Minero Perú. p: 1-4.
- Boekhout, F., Roberts, N.M.W., Gerdes, A., Schaltegger, U., 2015. A Hf-isotope perspective on continent formation in the south Peruvian Andes. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* 389, 305–321. <https://doi.org/10.1144/SP389.6>
- Bouse, R., Ruiz, J., Tittley, S., Tosdal, R., Wooden, J., 1999. Lead isotope composition of the Late Cretaceous and early Tertiary igneous rocks and sulfide minerals in Arizona: Implications for the sources of plutons and metals in porphyry copper deposits: *Economic Geology*. 94: 211-244.
- Chiaradia, M. 2014. Copper enrichment in arc magmas controlled by overriding plate thickness. *Nature Geosci* 7 : 43–46
- De la Cruz, N. & Jaimes, F. (2003) - Memoria descriptiva de la revisión y actualización del cuadrángulo de Santiago de Chocorvos (28-m), Escala 1:50 000.
- Henley, R.W. Truesdell, A.H., Barton, P.B., Whitney, J.. 1984. Fluid-mineral equilibria in hydrothermal systems : *Society of Economic Geologists, Reviews in Economic Geology*. 1 : 267p
- Kamenov, G. D., Mueller, P. A., and Perfit, M. R., 2004. Optimization of mixed Pb-Tl solutions for high precision isotopic analyses by MC-ICP-MS: *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, v. 19, no. 9, p. 1262-1267.
- Loewy, S.L., Connelly, J.N., Dalziel, I.W.D., 2004. An orphaned basement block: The Arequipa-Antofalla Basement of the central Andean margin of South America. *Bull. Geol. Soc. Am.* 116, 171–187. <https://doi.org/10.1130/B25226.1>
- Mamani, M., Wörner, G., Sempere, T., 2010. Geochemical variations in igneous rocks of the Central Andean oroclinal (13°S to 18°S): Tracing crustal thickening and magma generation through time and space. *Bull. Geol. Soc. Am.* 122, 162–182.
- Musaka, S.B. 1986. Common Pb isotope compositions of the Lima, Arequipa and Toquepala segments in the Coastal batholith, Perú: Implications for magmagenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 50: 771-782.
- Mukasa, S.B., Vidal, C. E. & Injoque-Espinosa, J., 1990. Pb isotope bearing on the metallogenesis of sulfide ore deposits in central and southern Peru: *Economic Geology*, 85: 1438-1446.
- Perelló, J., Carlotto, V., Zárate, A., Ramos, P., Posso, H., Neyra C., Caballero A., Fuster, N., Muhr, R. 2003. Porphyry-Style Alteration and Mineralization of the Middle Eocene to Early Oligocene Andahuaylas-Yauri Belt, Cuzco Region, Peru. *Economic Geology* ; 98 (8): 1575–1605.
- Ramos, V.A., Aleman, A., 2000. Tectonic evolution of the Andes. In: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filha, A., Campos, D.A (Eds.), *Tectonic Evolution of South America. 31st International Geological Congress, Rio de Janeiro*, pp. 635–685
- Ramos, V.A., 2018. Tectonic Evolution of the Central Andes: From Terrane Accretion to Crustal Delamination. *Am. Assoc. Pet. Geol.* 1–34.
- Ramos, V. 2010. The Grenville-age basement the Andes. *Journal South America Earth Sciences* 29 :77-91.
- Ramos, V.A., 2018. Tectonic Evolution of the Central Andes: From Terrane Accretion to Crustal Delamination. *Am. Assoc. Pet. Geol.* 1–34.
- Richards, J., McCulloch, M., Chappell, B., Kerrich, R. 1991. Sources metals in the Pongora gold deposits, Papua New Guinea: Evidence from alteration, isotope and noble gas geochemistry: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55: 565-580.
- Salazar, H. & Landa, C. (1993) - Geología de los cuadrángulos de Mala, Lunahuaná, Tupe, Conayca, Chíncha, Tantará y Castrovirreyna. INGEMMET. Boletín. Serie A: Carta Geológica Nacional, 44, 96 p.
- Spikings, R., Boekhout, F., Chiaradia, M., 2016. Characterization of Triassic Rifting in Peru and implications for the early disassembly of western Pangaea. *Gondwana Research*, 35:124-146.
- Thibodeau, A. M., Chesley, J. T., and Ruiz, J., 2012. Lead isotope analysis as a new method for identifying material culture belonging to the Vázquez de Coronado expedition: *Journal of Archaeological Science*, v. 39, no. 1, p. 58-66.
- Thibodeau, A. M., Habicht-Mauche, J. A., Huntley, D. L., Chesley, J. T., and Ruiz, J., 2013. High precision isotopic analyses of lead ores from New Mexico by MC-ICP-MS: implications for tracing the production and exchange of Pueblo IV glaze-decorated pottery: *Journal of Archaeological Science*, v. 40, no. 7, p. 3067-3075.
- Tosdal, R., Wooden, J., Bouse, R., 1999. Pb isotopes, Ore deposits and Metallogenic Terranes. In *Application of Radiogenic Isotopes to Ore Deposits Research and Exploration*. Society Economic Geologists, p. 1-26.
- Valencia, M., Santisteban, A., Marchena, A., León, L. 2020. Características Geológicas y Geoquímicas de los depósitos minerales de la Faja Magmática Cretáceo-Paleógena entre Huancavelica y Tacna – Bloque Norte. INGEMMET. Boletín. Serie B: Geología Económica, 168 p. < <https://www.ingemmet.gob.pe/programa-de-metalogenia1>>
- Wang, Y., 2010. Physical and chemical characteristics of the host rocks in controlling the mineralization of the Chinkuashih high-sulfidation gold–copper deposits, northeastern Taiwan. *Journal of Geochemical Exploration* 10, 61-68