



Boletín de la Sociedad Geológica del Perú

journal homepage: www.sgp.org.pe ISSN 0079-1091

Niveles relativos de formación, paragénesis mineral-Au y anomalías de sedimentos de quebradas de yacimientos epitermales de alta sulfuración de Perú

Aldo Bendejú Juárez

Maskhay Consultores EIRL, Lima, Perú

Resumen

La cordillera Andina peruana presenta un gran número de yacimientos de alta sulfuración de edad Miocénica relacionados *lithocaps*. Una característica notable de estos yacimientos es su nivel de formación relativo a las discordancias subyacentes a las rocas volcánicas relacionadas con la actividad hidrotermal. La mayoría de los yacimientos, incluidos los de clase mundial, se formaron +/- 250 m de las discordancias, en las bases de los *lithocaps* y en rocas del basamento subvolcánico. En la mayoría de los casos el Au se depositó después de la formación del estadio de alteración argílica avanzada correspondiente al *lithocap*, en diferentes eventos y volúmenes. En estos eventos, los principales minerales en ensamble con el Au son: 1) sílice parda 2) cuarzo-pirita, 3) enargita-pirita, 4) esfalerita-galena-sulfosales y 5) sulfuros-sulfosales-baritina. Otros ensambles secundarios relacionados al Au son cuarzo-wolframita-pirita y rejalgar-oropimente. Estas relaciones mineralógicas se reflejan en los análisis químicos de sedimentos de quebradas asociados a la mayoría de yacimientos. Los principales elementos relacionados al Au son As, Zn, Pb, Cu y Fe; y elementos secundarios son el W y Mo. La Ag presenta una buena correlación con el Sb. Valores anómalos de estos elementos alcanzan una dispersión de hasta 9 kilómetros más allá de los cuerpos minerales. Los yacimientos más grandes se formaron cerca a las discordancias y presentan más eventos de deposición de Au. Los principales eventos suelen ser tempranos asociados a pirita y enargita. Los valores más altos de Au en sedimentos de quebradas asociados a yacimientos tienen valores más altos de Zn, Pb y As.

Introducción

Los yacimientos de alta sulfuración (YAS) son la principal fuente de producción de Au del Perú (1). Estos son mayormente de edad Miocénica. Sus profundidades de formación son consideradas menores a 1 km y sus lapsos de tiempo de formación < 2 My (2, 3, 4, 5). Están relacionados, y son posteriores, a *lithocaps* que se caracterizan por su ensamble de alteración argílica avanzada. Un hecho notable es la relación YAS-*lithocaps*, existen muchos *lithocaps* que no presentan yacimientos de alta sulfuración. Esto sugiere que los YAS no se formaron después del desarrollo de los *lithocaps* o no están expuestos y se encuentran en los niveles más profundos (cerca de las bases de los *lithocaps*). Aquí se ofrece una recopilación de datos de tesis, publicaciones y datos libres (GEOCATMIN) de los YAS.

Un rasgo importante de los YAS peruanos es su nivel relativo de formación (NRF) respecto a las discordancias basales que se formaron antes del magmatismo relacionado a los yacimientos. Los yacimientos se desarrollaron en rocas magmáticas y sedimentarias subyacentes a las discordancias y también en rocas relacionadas a evento magmático-hidrotermal (sobre las discordancias). Analizar los NRF tiene aplicaciones directas en la exploración. En este estudio se hace una aproximación estadística de los NRF de 20 yacimientos. El Au (+/- Ag) en los YAS es introducido, normalmente, después de la formación de los *lithocaps* y está relacionado a minerales característicos de estados de alta e intermedia sulfuración. El tiempo relativo de deposición del Au en los yacimientos de alta sulfuración del Perú ha sido extraído del análisis detallado de las secuencias paragenéticas

de 7 yacimientos. La mayoría de los yacimientos de alta sulfuración presentan una mineralogía numerosa que es representada por los elementos que comprenden la “*epithermal suite*” (6). La mineralogía debe reflejarse en la geoquímica de sedimentos de quebradas aledañas a los YAS a lo largo de varios kilómetros. Aquí compilamos los análisis geoquímicos de sedimentos de quebradas de 14 yacimientos peruanos. El análisis de componentes principales debe representar la paragénesis mineral y definir qué elementos de la “*epithermal suite*” se relacionan con el Au. Esta relación en los sedimentos de quebradas podría predecir las características mineralógicas de los YAS explorados.

Niveles relativos de formación (NRF)

Los niveles relativos de formación de los YAS fueron evaluadas y compiladas teniendo como nivel de referencia las discordancias basales previos al eventos magmático-hidrotermal relacionado a la mineralización. De las recientes publicaciones basadas en edades absolutas, edades relativas y detallada información de taladros de perforación en los YAS se puede analizar los

niveles relativos de

formación, las discordancias basales y las edades de las unidades que los hospedan (2,3,4,7,8,9,10). Dos niveles se usaron para el análisis de los NRF: el nivel medio y el nivel superior de los yacimientos respecto a la sus discontinuidades basales (Fig. 1A y 1B). Los yacimientos se formaron entre -300 m y +750 m de las discontinuidades y totalizan recursos por 88.9 Moz de Au. El intervalo más productivo está debajo del nivel +400 m, donde se desarrollaron 15 yacimientos, 88.5% del total de los recursos del Au. En este intervalo ocurren los yacimientos más grandes, incluyendo la mayoría de los *world class* (e.g. Cerro Yanacocha, 25 Moz; Lagunas Norte, 14 Moz), haciendo un promedio general de los recursos de los yacimientos se obtiene 5.2 Moz/yacimiento. Los depósitos de menor tamaño están por encima del nivel +400 m, con promedio ~2 Moz/yacimiento. Aparentemente ningún yacimiento se desarrolló en la misma superficie de la discordancia. Esto sugiere que las discordancias (superficies con abundante arcillas y limos?) controlaron en parte la hidrogeología de los fluidos hidrotermales por encima y debajo de estas.

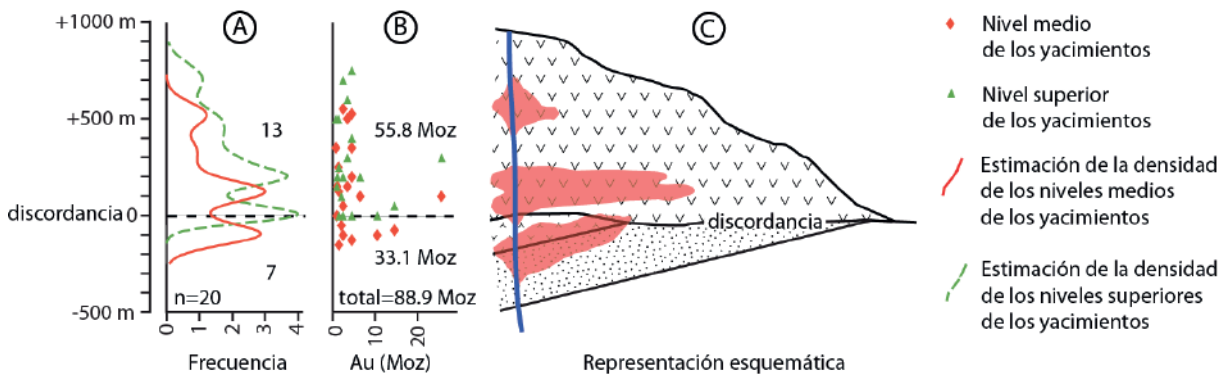


Figura 1. Estimación de la densidad de los niveles de formación relativa (medios y superiores) de yacimientos de alta sulfuración del Perú. La distribución de los yacimientos puede ser generalizada y esquematizada como el modelo en C. Notar que del total de yacimientos ($n=20$) 7 se formaron debajo de las discordancias (37% del total de los recursos de Au).

Minerales relacionados al Au

Los minerales relacionados al Au son diversos los cuales proveen un número importante de elementos que conforman la “*epithermal suite*” (6). Estos elementos son considerados como *pathfinders* para explorar por Au. Estudios detallados de las paragénesis mineral-Au de siete YAS peruanos selectos es presentado en la figura 2. Del análisis de las paragénesis se observa que los yacimientos más grandes tuvieron varios

eventos de deposición de Au que incluyen dos eventos tempranos distintivos: 1) Au-sílice-pirita y/o 2) Au-enargita-pirita-sílice. En el primer caso el Au está alojado en zonas de piritas con alto contenido en As y es de menor concentración que el Au presente en la enargita del segundo caso (11). En algunos depósitos (e.g. Yanacocha y Pierina) el Au asociado al evento sílice-pirita es volumétricamente más importante que el evento Au-sílice-pirita-enargita (4). Como en otros YAS

de clase mundial, en Pierina parte de la deposición de Au está asociado a la disminución del estado de sulfuración de enargita a galena-esfalerita-estibina, Ag es introducido en este estadio (12).

En Marcapunta, yacimiento más pequeño que los *world class*, el Au se depositó con enargita y también posterior a este junto son telururos y wolframita (13). Los YAS más pequeños tienen solo uno o dos eventos de Au, son posteriores a la enargita en transición hacia sulfuros de metales base y sulfosales de Ag. La baritina es por lo general tardía y asociado al Au cuando está en ensamble con sulfuros y sulfosales, excepto en Julcani donde el principal evento de Au es con cuarzo-wolframita pero baritina coexiste con metales base (14). Resumiendo en términos de elementos químicos, el Au presenta la siguiente relación: 1) Fe-As-Au, 2) Cu-As-Au, 3) Zn-Pb-

Cu-As-Sb-Ba-Au y 4) W-Au.

Geoquímica de sedimentos de quebradas relacionados a los yacimientos

La geoquímica de sedimentos de quebradas para 14 YAS ha sido recopilada de los datos libres del GEOCATMIN. Los sedimentos con anomalías geoquímicas se encuentran hasta 9 kilómetros de distancia de los YAS. El análisis de componentes principales (e.g. círculo de correlación, Fig. 3A) indica que el Zn, Pb, Ag, Sb y Cd están relacionados; sin embargo, en detalle los pares Ag-Sb y Pb-Zn presentan una buena a moderada correlación. El par Cu-As también presentan una moderada a buena correlación. Los elementos del grupo Ti, Zr, V, Na, W y Bi tienen una buena correlación negativa con el Au. Sin embargo, el

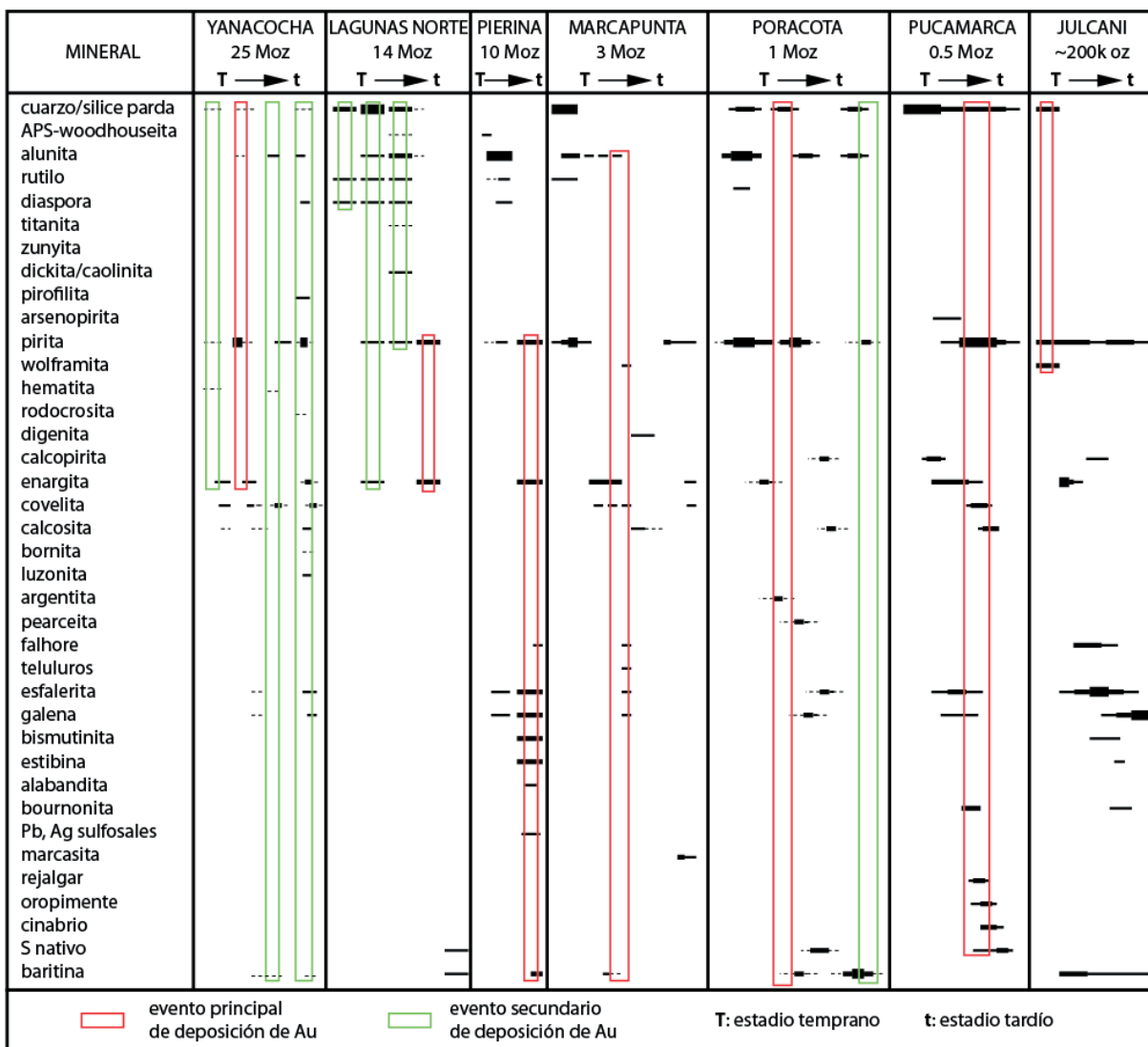


Figura 2. Secuencia paragenética de yacimientos seleccionados. Los yacimientos están ordenados de izquierda a derecha por el volumen de sus recursos.

par W-Bi tiene buena a moderada correlación entre ellos y están relacionados a eventos tardíos en los YAS; y el par Ti-Zr tiene una buena correlación pero suelen ser característicos a eventos tempranos en los YAS. El aluminio tiene un comportamiento similar al Ti y Zr con respecto al Au (correlación negativa), aunque esto no es revelado en el círculo de correlación.

Los grupos de elementos químicos de las secuencias paragenética (Cu-As-Au y Zn-Pb-Cu-As-Sb-Ba-Au) y los pares con buena a moderada correlación de los sedimentos de quebradas (Cu-As y Zn-Pb) son consistentes y relacionables. Anomalías de Au clasificadas como baja y moderada-alta graficadas en el diagrama ternario de Cu+As, Zn+Pb y 25xFe% delinea tres grupos de anomalías compuestas: 1) “Fe-rich, Au-poor, Cu-poor”, 2) “Cu-rich, Au-poor” y 3) “Au-rich,

Cu-poor”. Estos grupos son consistentes con eventos clasificados en otros depósitos alrededor del mundo como “Cu-rich, Au-poor” relacionado a enargita y “Au-rich, Cu-poor” relacionado a tenantita más tardía (15). El grupo de anomalías “Fe-rich, Au-poor, Cu-poor” es sugerido aquí como evidencia del evento de Au más temprano de sílice-pirita.

La relación aluminio-Au (Al/Au) presenta una buena relación con el nivel relativo de formación de los YAS. Altos valores de Al son debidos a ser característicos de niveles más altos de los YAS donde remanentes del ensamble de *steam heated* son esperados. En los niveles de desarrollo de *steam heated* son comunes valores bajos de Au (18). Entonces el ratio Al/Au podría ser un proxy para predecir los niveles de exposición de yacimientos de alta sulfuración.

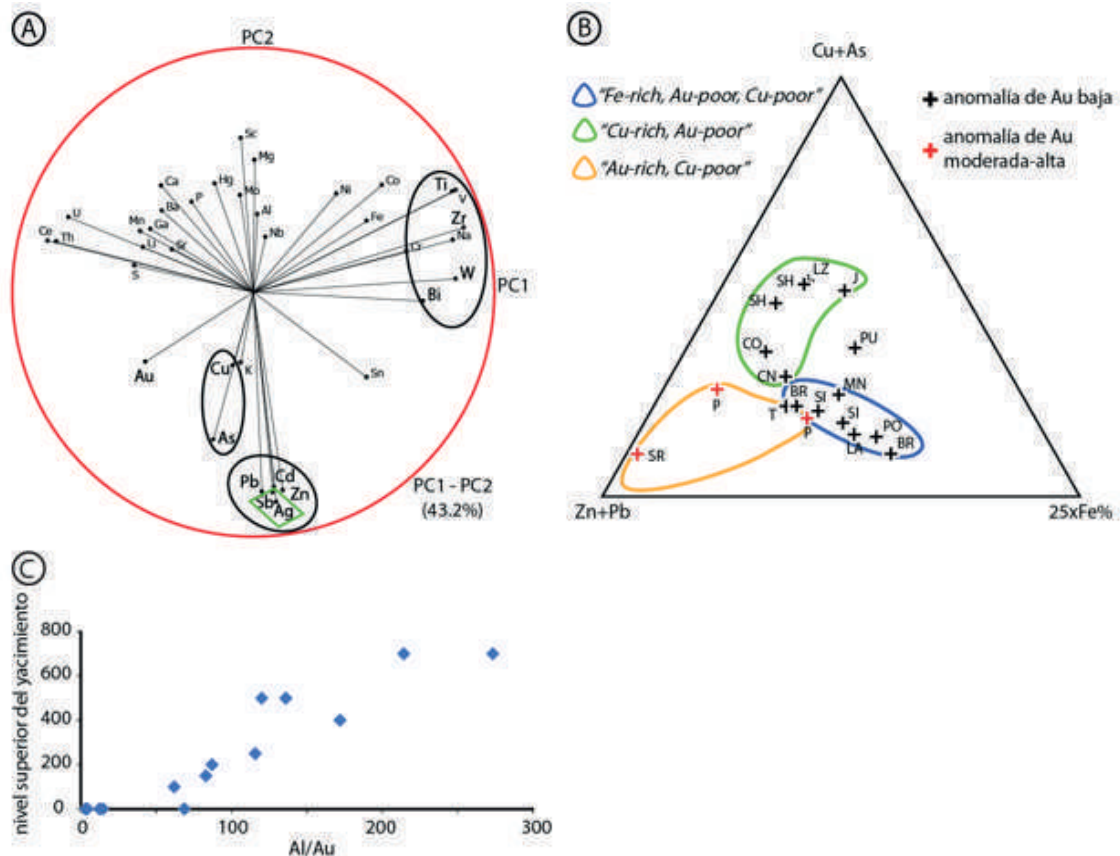


Figura 3. Geoquímica de sedimentos de quebradas de los YAS peruanos. A) Círculo de correlación basado en los componentes principales 1 y 2. B) Diagrama ternario Zn+Pb, Cu+As y 25xFe% mostrando las anomalías baja y moderada-alta de Au. C) Niveles superiores (en metros) de los YAS vs. el ratio aluminio-Au (Al/Au). SR: Santa Rosa, P: Pierina, T: Tantahuatay, BR: Breapampa, CN: Cerro Negro, CO: Corihuarmi, SH: Shahuindo, LZ: La Zanja, J: Jesica, PU: Pucamarca, MN: Minasnioc, SI: Sipan, PO: Poracota, LA: La Arena.

Conclusiones

El mayor número y los más grandes yacimientos de alta sulfuración se desarrollaron cerca a sus discordancias basales. Es decir los *lithocaps* más erosionados que presentan ensambles de alteración argílica avanzada de alta temperatura (e.g. pirofilita-dickita) pueden ser importantes y altamente prospectables. Los yacimientos más grandes presentan más eventos de Au y están relacionados a un gran número de elementos correspondientes a la “*epithermal suite*”. Dentro del dominio de un *lithocap* los sectores donde coinciden el mayor número de estos elementos con las más altas anomalías podrían ser blancos de exploración de prioridad.

Agradecimientos

Agradezco por las discusiones y aportes a Valery Garcia, Gustavo Villon, Javier Veliz, Jorge Leon, Oscar Cano, Luis Bocanegra, Alexandra Choque y Luis Silva.

Referencias bibliográficas

- (1) Acosta, J. (2014) Pasado, presente, futuro de la producción de Oro en el Perú. *Horizonte Minero*, 97, 66-70.
- (2) Longo, A. A., Dilles, J. H., Grunder, A. L., & Duncan, R. (2010). Evolution of calc-alkaline volcanism and associated hydrothermal gold deposits at Yanacocha, Peru. *Economic Geology*, 105(7), 1191-1241.
- (3) Montgomery, A. T. (2012). Metallogenetic controls on Miocene high-sulphidation epithermal gold mineralization, Alto Chicama district, La Libertad, Northern Peru. Queen's University. 455 p.
- (4) Rainbow, A. (2009). Genesis and evolution of the Pierina high-sulphidation epithermal Au-Ag Deposit, Ancash, Perú. Queen's University. 292p.
- (5) BendeZú, R., Page, L., Spikings, R., Pecskey, Z., & Fontboté, L. (2008). New 40 Ar/39 Ar alunite ages from the Colquijirca district, Peru: evidence of a long period of magmatic SO₂ degassing during formation of epithermal Au-Ag and Cordilleran polymetallic ores. *Mineralium Deposita*, 43(7), 777.
- (6) John, D. A., Vikre, P. G., du Bray, E. A., Blakely, R. J., Fey, D. L., Rockwell, B. W., & Graybeal, F. T. (2018). Descriptive models for epithermal gold-silver deposits: Chapter Q in *Mineral deposit models for resource assessment* (No. 2010-5070-Q). US Geological Survey.
- (7) Vidal, C., & Ligarda, R. (2004). Enargite-gold deposits at Marcapunta, Colquijirca Mining District, Central Peru: mineralogic and geochemical zoning in subvolcanic, limestone-replacement deposits of high-sulfidation epithermal type. *Econ Geol Special Publications*, 11, 231-242.
- (8) Daniel, Roth., Art, Ibrado., Terry, M., Charlie, M. (2018) Technical Report on the La Arena Project, Peru.
- (9) Deen, J. A., Rye, R. O., Munoz, J. L., & Drexler, J. W. (1994). The magmatic hydrothermal system at Julcani, Peru; evidence from fluid inclusions and hydrogen and oxygen isotopes. *Economic Geology*, 89(8), 1924-1938.
- (10) Cerón, F. (2010). Pucamarca: nuevo yacimiento epitermal de oro de alta sulfuración en el sur del Perú. 141 p.
- (11) Deditius, A. P., Utsunomiya, S., Ewing, R. C., Chryssoulis, S. L., Venter, D., & Kesler, S. E. (2009). Decoupled geochemical behavior of As and Cu in hydrothermal systems. *Geology*, 37(8), 707-710.
- (12) Sillitoe, R. H., & Hedenquist, J. W. (2003). Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits. *Special Publication-Society of Economic Geologists*, 10, 315-343.
- (13) BendeZú, R., & Fontboté, L. (2009). Cordilleran epithermal Cu-Zn-Pb-(Au-Ag) mineralization in the Colquijirca district, central Peru: Deposit-scale mineralogical patterns. *Economic Geology*, 104(7), 905-944.
- (14) Petersen, U., Noble, D. C., Arenas, M. J., & Goodell, P. C. (1977). Geology of the Julcani mining district, Peru. *Economic Geology*, 72(6), 931-949.
- (15) Arribas Jr, A. (1995). Characteristics of high-sulfidation epithermal deposits, and their relation to magmatic fluid. *Mineralogical Association of Canada Short Course*, 23, 419-454.