



◀ Por:

Dr. Ing. Aldo Alván

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET)

Dirección de Geología Regional

ANÁLISIS DE MINERALES PESADOS EN EL PERÚ: IMPORTANCIA ECONÓMICA Y RESULTADOS

Tradicionalmente, los minerales pesados no son los primeros que llegan a la mente de los geólogos exploradores de minerales en el mundo, especialmente en Sudamérica. Sin embargo, éstos son de crucial importancia económica si los consideramos como concentrados naturales de sustancias metálicas y no-metálicas. Para empezar, los minerales pesados (o minerales accesorios) de importancia económica son aquellos que tienen densidades mayores a 2.87 g/cm^3 , y se hallan comúnmente en las rocas detríticas (tales como areniscas) generalmente en una proporción similar a 1% respecto al total de la muestra. Sin embargo, se conoce que esta proporción suele sobrepasar este límite excepcionalmente en sitios donde la hidráulica natural ha logrado acumularlos.

Tales depósitos son conocidos como “depósitos de placer” y “paleo-placeres”. Estos se hallan situados con mayor abundancia en países tropicales y subtropicales con alta proporción de denudación sedimentaria y tectónica activa al menos desde el Ordoviciano (aproximadamente 440 Millones de años), como el Perú. Los minerales pesados se comercializan a nivel mundial en grupos de granos individuales y asociaciones de grupos minerales. El objetivo de este artículo es demostrar la importancia

económica de los distintos tipos de minerales encontrados en rocas fanerozoicas en el mundo y su potencial en Perú.

En general, los grupos de minerales densos a investigar incluyen a los rutilos y titanitas (por su contenido de titanio, Figura 2), zircones y monazitas (uranio), granates, magnetitas (hierro), y turmalinas. El estudio inicia con un análisis detallado de los procesos sedimentarios (análisis de facies sedimentarias) de tal modo que pueda explicarse y predecirse dónde pueden estar los concentrados. Estas investigaciones sedimentológicas se apoyan además en mineralogía, petrografía y geoquímica de cada uno de los grupos minerales, con el objetivo de establecer correlaciones estratigráficas, entre otros indicadores estratigráficos. Estos criterios geocientíficos deben ir de la mano con la aplicabilidad económica, el cual se reflejaría en cálculos de volúmenes de facies (o mapas isópacos) con concentrados de minerales pesados, su uso en los productos a comercializar, y su potencial sustitución por otros minerales accesorios.

EJEMPLOS DE SU APLICACIÓN EN LA INDUSTRIA

Según Fredric et al. (2007), a lo largo de la costa atlántica de los EEUU (precisamente en el Golfo de México

y en Carolina del Norte) se extrajeron concentrados con minerales densos en sedimentos de playa y en quebradas, los cuales fueron evaluados en términos de interés económico por geólogos prospectores (Figura 2). En placeres actuales, la prospección continúa con la búsqueda de capas “oscuras”. Al examinar más de 1,250 km de línea costera, se puede deducir de donde provienen los minerales de interés (por ejemplo, gneises, granitos, etc.); sin embargo, en el caso de los placeres no es vital conocer la roca generadora de sedimentos, sino, conocer los procesos sedimentarios que dieron origen a las acumulaciones, y los tipos de facies donde pueden estar acumulados sus extensiones, y las asociaciones (espectros) típicas de

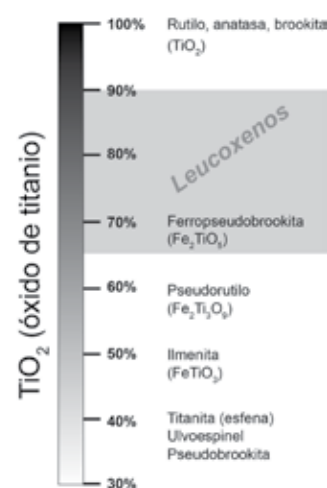


Figura 1. Contenido teórico de TiO_2 a lo largo de varias fases de formación mineral (después de Reynecke & Wallmach, 2007; Meinhold, 2010).

minerales pesados, dando lugar a un análisis predictivo. Por ejemplo, debido a su alto contenido de uranio, la monazita es el mayor proveedor de radiactividad, seguido del zircón, y pueden ser detectados en exploraciones aeromagnéticas, así como también sus minerales asociados.

En paleo-placeres o “placeres fósiles”, refiriéndose a estratos pre-holocénicos, la sistemática es la misma, y la estimación de reservas se hace más crucial, los cuales pueden ser reforzadas con datos geofísicos, perforaciones y/o estudios geoquímicos, para sustentar correlaciones estratigráficas.

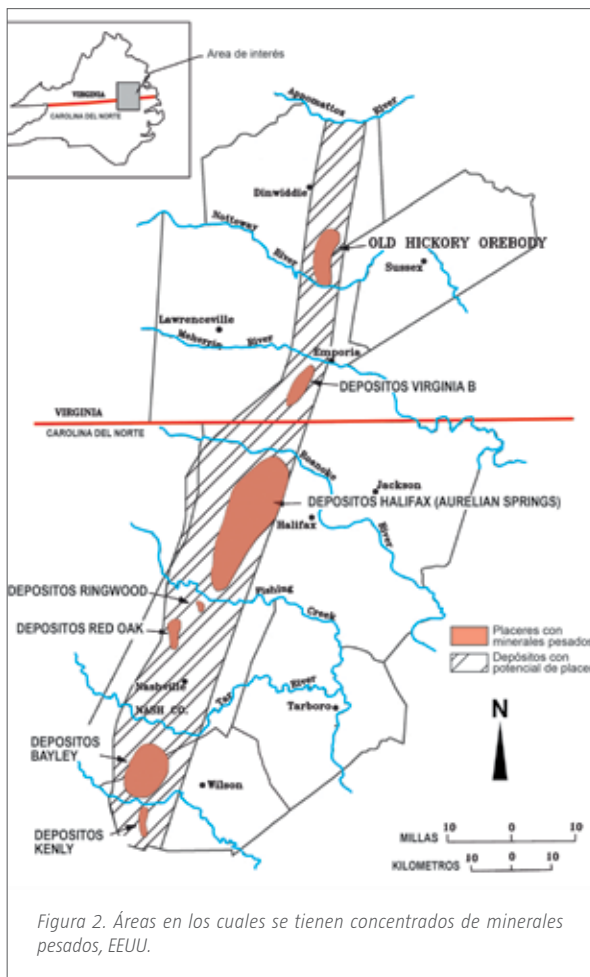


Figura 2. Áreas en las cuales se tienen concentrados de minerales pesados, EEUU.

Por otro lado, desde el punto de vista de prospección de yacimientos económicos, los minerales pesados también han demostrado ser un aliado útil. Por ejemplo, Brundin & Bergstrom (1977) en Suecia se basaron en muestreo de sedimentos (3-5 muestras por km²) en depósitos glaciares (tilitas), logrando rastrear depósitos ocultos con schelita, wolframita, casiterita y cromita, y mineralizaciones con sulfuros. Iniciaron sus investigaciones con la separación de minerales pesados índices (utilizando el politungstato de sodio o “líquido pesado”, $\rho=2.87 \text{ g/cm}^3$) tales como

anfíboles, granates y magnetitas, y posterior análisis químico (XRF). Los resultados demostraron que estos minerales arrojaron anomalías de Ni, Zn, Cu y Cr, y sugirieron valores importantes.

Similar a este caso y en territorio peruano, se introdujo en la exploración de recursos minerales hidrotermales, al estudio geoquímico de minerales pesados tales como los anfíboles ($\text{Ca,Mg,Fe,Na[Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$), los cuales pueden ser de crucial ayuda si se tiene en consideración que estos pueden tener valiosa información de elementos traza útiles. Por ejemplo, Chambefort et al. (2013) en rocas volcánicas miocénicas de Yanacocha (Cajamarca), analizaron mediante LA-ICP-MS anfíboles con alto y bajo contenido de Al, en las cuales además detectaron elementos trazas indicadores de magmas ricos en cristales. Dedujeron que los magmas con alto Al están asociados a las principales etapas de formación de Au, y los magmas con bajo Al están asociados a formaciones de Zn. La prospección de los depósitos sedimentarios que incluyen estos anfíboles puede llevar al descubrimiento de más depósitos con importante valor económico, los cuales aún podrían estar ocultos (cubiertos por sedimentos).

Otro ejemplo análogo al arriba citado se respalda en el estudio de los apatitos ($\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3[\text{F,Cl,OH}]$). En un afán de explorar pórfidos ocultos de cobre en Columbia, EEUU, Bouzari et al. (2016) afirmaron que los apatitos, aparte de ser minerales accesorios de rocas volcánicas y plutónicas, ocurren también comúnmente en rocas con alteración hidrotermal. A partir de la colecta de apatitos detríticos en sedimentos que cubren la zona de interés mineral (cuenca sedimentaria), se determinó mediante elementos transferidos a éstos tales como Sr^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , REE, Y^{3+} , Na^+ , Ca^{2+} , As_5 , U, Th, etc. (identificados por LA-ICP-MS, Figura 3, y discriminados por luminiscencia), que los apatitos representativos de un pórfido de cobre muestran una complicada historia de corrosión y redepositación. Tales características fueron cruciales para identificar si existen cuerpos minerales debajo del apilamiento sedimentario. Demostraron además que los apatitos detríticos con estas características suelen ser detectados a aproximadamente 1 km de distancia del cuerpo intrusivo mineralizado.

La detección de tales elementos contenidos en los apatitos detríticos fue crucial para identificar características y procesos importantes en el sistema mineral, tales como los fluidos mantélicos, asimilación y grado de fraccionamiento y hasta el estado de oxidación del magma.

De acuerdo a los primeros resultados del Proyecto GR41A de la Dirección de Geología Regional del INGEMMET, se pone en evidencia que en rocas detríticas fanerozoicas que existen en el sur del Perú son potenciales reservas de minerales con valor económico considerable (Figura 4). Estas afirmaciones se basan en estudios integrados de proveniencia sedimentaria en rocas mesozoicas: Formación Hualhuani, y rocas paleozoicas: Grupo Mitu, los cuales incluyen análisis de facies sedimentarias, petrografía de minerales pesados y ligeros (QFL) y litogeoquímica de roca total (whole rock) en areniscas. En función a la integración de estos datos, se deduce que los minerales pesados han sido acumulados cuando decrece la energía del flujo y los minerales más densos no logran ser transportados; por ejemplo en las partes inferiores de los point-bar meándricos y la parte basal de los canales fluviales de escalas menores (<2 m de longitud horizontal).

Después de un análisis detallado de las facies sedimentarias (Figura 5) se interpreta que las areniscas de la Formación Hualhuani han sido depositadas en un ambiente fluvial meándrico, en el cual las acumulaciones de minerales pesados que se hallan en la base de los canales tienen altos porcentajes y pueden ser considerados de importancia económica, por ejemplo, 8% de rutilo, 4% de zircón, y 88% de sílice (del total de la muestra).

Consideramos que con minería responsable y con mucha atención a los potenciales impactos ambientales, estas técnicas pueden resultar muy provechosas para la comunidad y para el país.

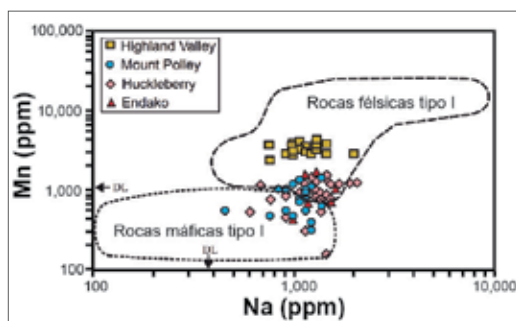


Figura 3. Diagrama binario comparando la relación Mn-Na del apatito en los depósitos estudiados en Columbia con los que ocurren en granitoides félsicos y máficos tipo I de Lachlan, Australia (estándar). Los apatitos luminiscentes indicadores de cuerpos minerales ocurren en el campo félsico tipo I (modificado de Bouzari et al., 2016).

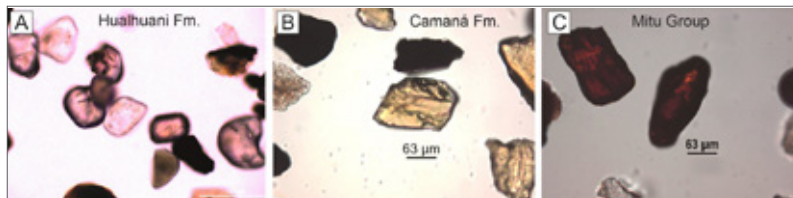


Figura 4. Minerales pesados extraídos de rocas sedimentarias mesozoicas, cenozoicas y paleozoicas en el sur de Perú. En A: concentraciones de zircones ($ZrSiO_4$) y turmalinas ($Ca,K,Na[Si,Al,B]_6O_{18}$) de la Fm. Hualhuani, Jurásico. En B: concentraciones de titanitas ($CaTiSiO_5$) y anfíboles ($Ca,Mg,Fe,Na[Si_8O_{22}(OH)_2]$) en la Formación Camaná, Cenozoico. En C: concentraciones de rutilo (TiO_2) en el Grupo Mitu, Paleozoico.



Figura 5. Estratigrafía del Jurásico en el departamento de Tacna, sur de Perú. La Formación Hualhuani se halla en la parte superior de la Quebrada Chachacumane, y se le ha medido en esta localidad en alrededor de 200 m de espesor.

REFERENCIAS

- Bouzari, F., Hart, C., Bissig, T., Barker, S., 2016. Hydrothermal Alteration Revealed by Apatite Luminescence and Chemistry: A Potential Indicator Mineral for Exploring Covered Porphyry Copper Deposits. *Economic Geology*, v. 111, pp. 1397-1410.
- Chambefort, I., Dilles, J.H., Longo, A.A., 2013. Amphibole Geochemistry of the Yanacocha Volcanics, Peru: Evidence for diverse Sources of Magmatic Volatiles related to Gold Ores. *Journal of Petrology*, v. 54 (5), pp. 1017-1046.
- Meinhold, G., 2010. Rutile and its applications in earth sciences. *Earth-Science Reviews*, v. 102, pp. 1-28.
- Brundin, N., Bergström, J., 1977. Regional prospecting for ores based on heavy minerals in glacial till. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 7, pp. 1-19.
- Fredric, L., Pirkle, W., Pirkle, E., 2007. Heavy-Mineral of the Atlantic and Gulf Coastal Plains, USA. In: *Heavy Minerals in Use*, (Eds.: Mange, M., Wright, D.), pp. 1145-1232.
- Reyneke, L., Wallmach, T., 2007. Characterization of FeTi-oxide species occurring in the Ranobe heavy mineral deposit, Madagascar. *The 6th International Heavy Minerals Conference 'Back to Basics'*, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, pp. 151-158.