

Las rocas sedimentarias representan alrededor de 5% del volumen de la corteza terrestre. Sin embargo, 75% de todos los afloramientos rocosos de los continentes están compuestos por este tipo de rocas (Blatt, Middleton y Murray, 1972; Boggs, 2009).

Las rocas sedimentarias se forman a partir de la acumulación de sedimentos. Estos sedimentos consisten en fragmentos que fueron desprendidos de una roca parental o de organismos por procesos de meteorización (mecánica o química). El agua, el viento o el hielo glacial suelen ser agentes que sirven para transportar los productos de la meteorización a lugares de sedimentación conocidos como cuencas sedimentarias, donde se acumulan y por procesos de diagénesis forman rocas de tipo sedimentario. Incluso al experimentar aumentos drásticos en la profundidad de enterramiento se pueden formar rocas de tipo metamórfico a partir de las rocas sedimentarias previamente formadas (Raymond, 2002; Mackenzie, 2005).

Los sedimentos tienen orígenes diferentes. Uno de ellos está relacionado con la acumulación de material que es transportado en forma de clastos sólidos derivados de la meteorización mecánica y química, los depósitos de este tipo se denominan detriticos y forman rocas sedimentarias detriticas. Otra fuente principal de los sedimentos es el material soluble producido por meteorización química. Cuando estas sustancias disueltas son precipitadas mediante procesos orgánicos o inorgánicos, el material se conoce como sedimento químico y a las rocas formadas se les denomina sedimentarias químicas (Boggs, 2009).

El factor de que las rocas sedimentarias detriticas estén compuestas por fragmentos, llevó a los investigadores a cuestionarse si era posible identificar la fuente de la cual derivaron. Debido a estas preguntas se desarrollaron las técnicas conocidas como análisis de procedencia, que son empleadas en la industria minera, petrolera, así como en la investigación académica.

El término procedencia se deriva del verbo latino provenire, que significa salir u originarse (Basu, 2003). En petrólogía, el término procedencia ha sido utilizado para reconocer los factores relacionados a la producción de sedimentos y sedimentos metamorfizados, con referencia específica a la composición de la roca fuente, la fisiografía y el clima del área de origen de donde se deriva el sedimento. La intención de los estudios de procedencia es reconstruir e interpretar la historia del sedimento desde el punto de la erosión inicial de la roca madre hasta el sepultamiento de sus detritos y eventos previos antes del metamorfismo (Pettijohn, Potter, y Siever, 1987).

Los paquetes de sedimentos clásticos son archivos geológicos que registran y preservan firmas de eventos geológicos pasados en provincias de origen, durante el tránsito y depocentro. Sin embargo, durante el tránsito sufren procesos asociados con la intemperie, el transporte, la deposición, el reciclaje y la diagénesis, estos procesos pueden ser repetidos varias veces en la historia de una roca sedimentaria, destruyendo total o parcialmente las propiedades originales de la roca madre (McCann, 1991; Ghosh y Sarkar, 2010; Garzanti *et al.*, 2013). Por lo tanto, la confianza en las propiedades de los minerales más resistentes, y en la distribución de elementos menos móviles y sus relaciones, ha aumentado en todos los estudios de procedencias contemporáneas (Mange-Rajetzky, 1981; Bhatia y Taylor, 1981; Morton, 1985; Roser y Korsch, 1986; 1988; Fedo, Eriksson y Krogstad, 1996; Cullers y Podkorytov, 2002; Armstrong-Altrin, 2014; Götze, 2009; Morton y Chinery, 2009; Barbera, Critelli y Mazzoleni, 2011; Ali *et al.*, 2014; Imchen, Thong y Pongen, 2014).

*Universidad Autónoma de San Luis Potosí

**Universidad Autónoma de Nuevo León.

*** Universitetet i Stavanger, Noruega.

Contacto: soniatorressan@hotmail.com



En los estudios de procedencia, una de las técnicas más utilizadas es el análisis de minerales pesados. Los minerales pesados son considerados minerales accesorios de alta densidad ($> 2.8 \text{ g/cm}^3$) que típicamente comprenden 1% de sedimentos siliciclásticos (Mangey Maurer, 1992). El uso de minerales pesados en sucesio-

nes siliciclásticas y metasiliciclásticas ha demostrado ser una poderosa herramienta para determinar la roca fuente, la edad, la composición química e historia de formación de dichos detritos, además de ser ampliamente utilizada en la correlación estratigráfica de sucesiones con ausencia de registro bioestratigráfico.

Tabla I. Pettijohn *et al.*, en 1973, establecieron la siguiente clasificación de minerales pesados.

Muy inestable	Inestable	Moderadamente estables	Estable	Ultraestable
Olvino	Hornblenda, actinolita, augita, diópsido, hiperstena andalusita.	Epidota, cianita, granate (enriquecido en Fe), sillimanita, esfena, zoisita.	Apatito, granate (empobrecido en Fe), esfena, zoisita.	Rutilo, circón, turmalina, anatasa.

¿CÓMO ESTUDIAR MINERALES PESADOS?

Para estudiar los minerales pesados con eficacia, éstos se preparan en concentrados, los cuales se obtienen disgregando la roca a estudiar hasta obtener fragmentos separados de la fracción. Posteriormente, con la fracción fina a muy fina (0.063- 0.125mm) se separa la fracción densa mediante técnicas que incluyen drenaje, magnetismo, tamizado y el uso de líquidos densos o líquidos “pesados”, como el bromoformo o tetrabromoetano, con gravedad específica de 2.8 g/cm^3 y 2.97 g/cm^3 , respectivamente, densidades que pueden ser ajustables con etanol. Alternativamente, el politungstato sódico no tóxico con densidades ajustables. Los minerales pesados se hunden en estos líquidos, lo cual permite su completa segregación de los componentes menos densos (Mangey Maurer, 1992; figura 1a,b).

La mineralogía óptica ofrece una visión general de los minerales pesados, debido a que tienen propiedades ópticas que permiten su identificación, como el color natural y de interferencia, el ángulo de extinción, el pleocroísmo, entre otras. Con disponibilidad de instrumentos sofisticados como la difracción de rayos X (XRD), la espectrometría de fluorescencia de rayos-X (XRF), el microscopio electrónico de barrido (SEM), la microsonda electrónica (EDS-SEM), la catodoluminiscencia (CL), el multicolector de ablación láser (MC-ICP-MS), la microsonda iónica de alta resolución (SHRIMP) se obtendrá mayor información, resolución y precisión del análisis.

Las técnicas que analizan a un solo grano pueden subdividirse en tres grupos: (1) las microscópico-morfológicas (incluyendo microscopía electrónica de barrido y catodoluminiscencia) usan variaciones de forma, color y estructuras internas como zonificación y fracturas en una determinada fase mineral para restringir diferentes orígenes (Lihou y Mange-Rajetzky, 1996;

Seyedolali *et al.*, 1997; Dunkl, Di Giulio y Kuhlemann, 2001; figura 1c); (2) las geoquímicas de un solo grano (microscopía electrónica y análisis ICP-MS por ablación con láser) permiten determinar la composición química y su variabilidad entre los granos de una determinada fase mineral con fines de discriminación de procedencia, huellas litológicas y termobarométricas (Morton, 1991; Von Eynatten y Gaupp, 1999; Zack *et al.*, 2002), y las de (3) datación radiométrica de minerales detriticos simples para la datación geocronológica (figura 1c) y termocronología (Sircombe, 1999; Rahl *et al.*, 2003; Von Eynatten y Wijbrans, 2003).

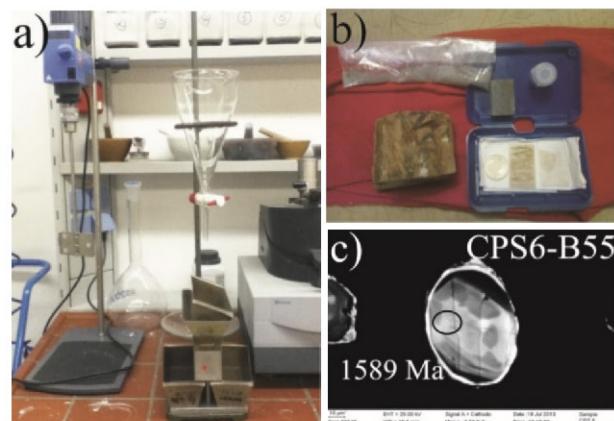


Figura 1. a) Equipo utilizado para el drenaje de los minerales pesados, b) muestra de mano, polvos, lámina delgada y concentrados de minerales pesados, c) imagen retrodispersada que muestra la textura en circón detritico redondeado con intercrecimiento y zonación oscilatoria y la edad.

¿QUÉ INFORMACIÓN BRINDAN LOS MINERALES PESADOS?

Existen minerales pesados muy diversos en las rocas; se pueden reconocer más de cincuenta tipos. Un rasgo importante es que la paragénesis de muchos de estos minerales pesados está restringida a ciertas condiciones dinamotérmicas; por tanto, las concentraciones de minerales pesados son útiles como indicadores de la génesis de los sedimentos dependiendo de la química primaria y el nivel de erosión del terreno fuente (Stattegger, 1976). Por consiguiente, la información obtenida por medio de la caracterización óptica y química de minerales pesados, provee información acerca de las posibles áreas alimentadoras de las cuencas sedimentarias (Felicka, 2000; Bradley *et al.*, 2014).

Por ejemplo, si en una muestra se encuentran minerales asociados a rocas metamórficas, como glaucofana o cordierita, se puede inferir que el área fuente es una unidad geológica de origen metamórfico, y no un área de origen ígneo. Por otra parte, si al realizar análisis isotópicos en un circón de una muestra se obtiene una edad de 1000 millones de años, entonces la roca que dio origen a ese mineral debe tener la misma edad.

Según las bases de la geología, las rocas se distribuyen de manera finita en la superficie de la Tierra. Por lo tanto, si observamos el mapa geológico de una región, por ejemplo el noreste de México, veremos que el territorio está conformado por diversas unidades litológicas, restringidas a un área específica.

Estas unidades de roca han sido clasificadas de acuerdo a los procesos que las formaron, ya sean volcánicos, plutónicos, metamórficos o sedimentarios. Además de que en muchos casos se conoce previamente su composición mineral y su edad. De esta manera, los mapas geológicos son fundamentales para discriminar las posibles áreas fuente de una muestra con contenido de minerales pesados.

Otras áreas en la que los análisis de minerales pesados son de utilidad

Exploración de yacimientos minerales

Por ejemplo, las arenas ricas en minerales pesados son la principal fuente de rutilo (TiO_2) utilizado para materia prima en la industria de pigmentos, a través de la recuperación de los minerales ilmenita ($Fe^{2+}TiO_3$), y leucoxeno (a la alteración del producto de la ilmenita), de circón ($ZrSiO_4$). Otros minerales pesados produci-

dos como coproductos de algunos depósitos son siliimanita, cianita, estaurolita, monacita y el granate. La monacita $[(Ce, La, Nd, Th) PO_4]$ es una fuente de elementos de tierras raras. Como el torio, éstos se utilizan en el subdesarrollo de energía nuclear (Dunkl, Di Giulio y Kuhlemann, 2001).

Industria petrolera

El análisis de minerales pesados complementa la correlación bioestratigráfica tradicional de los reservorios clásticos. Diversos procesos dan lugar a cambios estratigráficos en la composición de los sedimentos, incluyendo el levantamiento del área fuente, los cambios climáticos, la extensión del almacenamiento aluvial en la llanura de inundación y la interacción entre diferentes sistemas de deposición. El análisis de minerales pesados es una técnica confiable y probada para la correlación de sucesiones clásticas debido a que proporciona una comprensión detallada de los efectos de los procesos que alteran la señal de procedencia durante el ciclo sedimentario, como la diagénesis.

Geología forense

El examinador necesita un amplio conocimiento de la geología y mapas geológicos y de suelos para responder preguntas. Por ejemplo, si el suelo de un cuerpo no coincide con el lugar donde se encuentra el cuerpo, ¿desde dónde se movió el cuerpo? Análogamente, los examinadores pueden comparar dos muestras, una asociada con el sospechoso y la otra recogida de la escena del crimen, para ver si tenían una fuente común: ¿el suelo del zapato del sospechoso se compara con el tipo de suelo recogido en la escena del crimen?

En estudios recientes, investigadores del Instituto de Geología, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí y de la Facultad de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de Nuevo León estudiaron el basamento metamórfico paleozoico de la Sierra Madre Oriental en el noreste de México (Barboza-Gudiño *et al.*, 2011; Torres *et al.*, 2015; figura 2a), con el objetivo de entender las distribución de las rocas y conocer su fuente principal antes del metamorfismo relacionado con el cierre del supercontinente Pangea.

Al estudiar estas rocas se encontró un mineral pesado conocido como zircón, los investigadores pudieron determinar dos fuentes principales de edades a) grenvillianas (1250-920 Ma) y b) panafricanas (730-530



Ma) (Torres *et al.*, 2015; Torres, s.a.). Estas edades indican que podrían proceder del bloque de corteza de Oaxaquía y de los bloques de Yucatán y Florida (figura 2b), así como otras posibles áreas relacionadas al paleo-continente Gondwana. Sustentándose el origen de estas rocas a la porción noroccidental de Gondwana, debido al acercamiento de los megacontinentes durante el cierre de la Pangea.

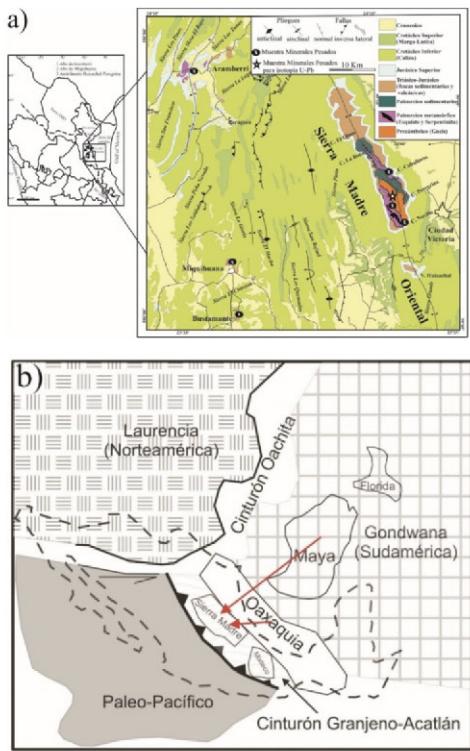


Figura 2. a) Localización del área de estudio (modificado de Torres *et al.*, 2015), b) mapa paleogeográfico de México durante el Pennsylvánico-Pérmino (300 Ma). Las líneas rojas indican la procedencia del área de estudio.

CONCLUSIONES

Estudios como el que se presentó demuestran que a partir del análisis de minerales pesados es posible proponer hipótesis paleogeográficas que expliquen la distribución de los continentes a lo largo del tiempo. Estos estudios tienen implicaciones en el entendimiento de las orogénesis, la generación de cuencas sedimentarias y de sistemas fluviales del pasado.

Las asociaciones de minerales pesados brindan información única, que no es proporcionada por otro tipo de análisis; sin embargo, esta información se encuentra codificada, así que sólo el uso de las técnicas adecuadas y propiamente aplicadas podrá resolver el problema.

REFERENCIAS

- Ali, S., *et al.* (2014). The provenance of Cretaceous to Quaternary sediments in the Tarfaya Basin, SW Morocco: evidence from trace element geochemistry and radiogenic Nd-Sr isotopes. *Journal of African Earth Sciences*, 90, 64-76.
- Armstrong-Altrin, J.S. (2014). Evaluation of two multidimensional discrimination diagrams from beach and deep-sea sediments from the Gulf of Mexico and their application to Precambrian clastic sedimentary rocks. *International Geology Review*, 57, 1446-1461.
- Barbera, G., Critelli, S., y Mazzoleni, P. (2011). Petrology and geochemistry of Cretaceous sedimentary rocks of the Monte Soro Unit (Sicily, Italy). Constraints on weathering, diagenesis, and provenance. *Journal of Geology*, 119, 51-68.
- Barboza-Gudiño, J.R., *et al.* (2011). Geocronología de círculos detriticos de diferentes localidades del Esquisto Granjeno en el noreste de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63, 2, 201-216.
- Basu, A. (2003). A perspective on quantitative provenance analysis, in: Valloni, R., y Basu, A. (Eds.), *Quantitative Provenance Studies in Italy*, Memorie Descrittive della Carta Geologica dell'Italia, vol. 61, p. 11-22.
- Bhatia, M.R., y Taylor, S.R. (1981). Trace-element geochemistry and sedimentary provinces: a study from the Tasman geosyncline, Australia. *Chemical Geology*, 33, 115-125.
- Blatt, H., Middleton, G.V., y Murray, R.C. (1972). *Origin of sedimentary rocks*. Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
- Boogs, S. (2009). *Petrology of sedimentary rocks*. Cambridge University Press.
- Bradley S., Van Gosen, *et al.* (2014). Deposit Model for Heavy-Mineral Sands in Coastal Environments. Virginia, Scientific Investigations Report 2010-5070 L, U.S. Geological Survey.
- Cullers, R.L., y Podkorytov, N. (2002). The source and origin of terrigenous sedimentary rocks in the Mesoproterozoic Ural group, southeastern Russia. *Precambrian Research*, 117, 157-183.
- Dunkl, I., Di Giulio, A., y Kuhlemann, J. (2001). Combination of single-grain fission-track geochronology and morphological analysis of detrital zircon crystals in provenance studies-sources of the Macigno formation (Apennines, Italy). *Journal of Sedimentary Research*, 71, 516-525.
- Fedo, C.M., Eriksson, K.A., y Krogstad, E.J. (1996). Geochemistry of shales from the Archean (~3.0 Ga) Buhwa Greenstone Belt, Zimbabwe: implications for provenance and source-area weathering. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60, 1751-1764.

- Felicka, E. (2000). Heavy minerals in the Carboniferous sediments of the Intra-Sudetic Basin as palaeogeographic indicators. *Geologia Sudetica*, Vol. 33, No.1, 49-65.
- Garzanti, E., *et al.* (2013). Weathering and relative durability of detrital minerals in equatorial climate: and petrology and geochemistry in the East African Rift. *Journal of Geology*, 121, 547-580.
- Ghosh, S., y Sarkar, S., (2010). Geochemistry of Permo-Triassic mudstone of the Satpura Gondwana Basin, Central India: clues for provenance. *Chemical Geology*, 277, 78-100.
- Götze, J. (2009). Chemistry, textures and physical properties of quartz—geological interpretation and technical application. *Mineralogical Magazine*, 73, 645-671.
- Imchen, W., Thong, G.T., y Pongan, T. (2014). Provenance, tectonic setting and age of the sediments of the Upper Disang Formation in the Phek District, Nagaland. *Journal of Asian Earth Sciences*, 88, 11-27.
- Lihou, J.C., y Mange-Rajetzky, M.A. (1996). Provenance of the Sardona flysch, eastern Swiss Alps: example of high-resolution heavy mineral analysis applied to an ultrastable assemblage. *Sedimentary Geology*, 105, 141-157.
- Mackenzie, F.T. (2005). Sediments, diagenesis, and sedimentary rocks: Treatise on Geochemistry, vol. 7, Elsevier.
- Mange-Rajetzky, M.A. (1981). Detrital blue sodic amphibole in recent sediments, southern coast, Turkey. *Journal of the Geological Society of London* 138, 83-92.
- Mange, M. A., y Maurer, H. F. (1992). Heavy minerals in colour London: Chapman & Hall. Vol. 147, p. 145.
- McCann, T. (1991). Petrological and geochemical determination of provenance in the southern Welsh Basin. *Geological Society of London, Special Publication*, 57, 215-230.
- Morton, A.C. (1985). Heavy minerals in provenance interpretation. In: Zuffa, G.G. (Ed.), *Provenance of Arenites*. NATO Adv. Sci. Srs., C-148. Reidel, pp. 249-277.
- Morton, A.C. (1991). Geochemical studies of detrital heavy minerals and their application to provenance research. In: Morton, A.C., Kronz, A., Haughton, P.D.W. (Eds.), *Developments in Sedimentary Provenance Studies*. Geol. Soc. Lond. Spec. Publ., vol. 57, pp. 31-45.
- Morton, A.C. y Chinery, S. (2009). Detrital rutile geochemistry and thermometry as guides to provenance of Jurassic-Paleocene sandstones of the Norwegian Sea. *Journal of Sedimentary Research*, 79, 540-553.
- Pettijohn, F.J., Potter, P.E., y Siever, R. (1987). *Sand and Sandstone*, Springer, 553 p.
- Rahl, J.M., *et al.* (2003). Combined single-grain (U-Th)/He and U/Pb dating of detrital zircons from the Navajo Sandstone, Utah. *Geology*, 31, 761-764.
- Raymond, L.A. (2002). *Petrology: the study of igneous, sedimentary, and metamorphic rocks*. McGraw-Hill Science, Engineering & Mathematics.
- Roser, B.P., y Korsch, R.J. (1986). Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratios. *Journal of Geology*, 94, 635-650.
- Roser, B.P., y Korsch, R.J. (1988). Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data. *Chemical Geology*, 67, 119-139.
- Seyedolali, A., *et al.* (1997). Provenance interpretation of quartz by scanning electron microscope-cathodoluminescence fabric analysis. *Geology*, 25, 787-790.
- Sircombe, K.N. (1999). Tracing provenance through the isotopic ages of littoral and sedimentary detrital zircon, eastern Australia. *Sedimentary Geology*, 124, 47-67.
- Stattegger, K. (1976). Schwermineraluntersuchungen in den klastischen Serien der Variszischen Geosynklinalen der Ost- und Zentral-Pyrenäen. *Mitt. Osterr. Geogr. Ges.* 69, 267-290.
- Torres S., S.A., *et al.* (2015). Magmatic source and metamorphic grade of metavolcanic rocks from the Granjeno Schist: was northeastern Mexico a part of Pangaea? *Geological Journal*, Vol. 51, 845-863.
- Torres S., S.A. (s.a.), *Implicaciones geodinámicas del Complejo Metamórfico Paleozoico de la Sierra Madre Oriental en el Noreste de México*. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra, 236 p.
- Von Eynatten, H., y Gaupp, R. (1999). Provenance of Cretaceous synorogenic sandstones in the Eastern Alps: constraints from framework petrography, heavy mineral analysis, and mineral chemistry. *Sedimentary Geology*, 124, 81-111.
- Von Eynatten, H., y Wijbrans, J.R. (2003). Precise tracing of exhumation and provenance using Ar/Ar-geochronology of detrital white mica: the example of the Central Alps. *Geological Society London, Special Publication*, 208, 289-305.
- Zack, T., *et al.* (2002). Trace element abundances in rutiles from eclogites and associated garnet mica schists. *Chemical Geology*, 184, 97-122.

