

# El Ciclo del Azufre en Sedimentos de Lagos con Aportes Hidrotermales y Antrópicos: el Lago Sochagota (Boyacá - Colombia)

/ GABRIEL-RICARDO CIFUENTES (1), ROSARIO JIMÉNEZ ESPINOSA (2), CLAUDIA-PATRICIA QUEVEDO VARGAS (1), JUAN JIMÉNEZ MILLÁN (2)

(1) Facultad de Ciencias e Ingeniería, Grupo de Investigación Gestión de Recursos Hídricos, Universidad de Boyacá. Campus Tunja (Colombia).  
(2) Departamento de Geología y CEACTierra. Universidad de Jaén. Campus Las Lagunillas. 23071, Jaén (España).

## INTRODUCCIÓN

El azufre es un elemento esencial para la vida y juega un papel importante en los ciclos biogeoquímicos. Sin embargo, algunas de sus formas reducidas (como el H<sub>2</sub>S) son generalmente tóxicas para los organismos e influyen en la calidad de las aguas. El S puede aparecer bajo diferentes formas en los sedimentos, de lo cual depende su biodisponibilidad. Por ello, la comprensión de la especiación del S en sedimentos es esencial para la evaluación de su respuesta a cambios ambientales y su potencial impacto biológico. La disponibilidad del S en el agua y en los sedimentos está controlada por el desarrollo de reacciones de oxidación-reducción. De esta forma, las zonas lacustres desarrolladas en áreas volcánicas que puedan proporcionar fluidos ricos en S que se vean afectados por procesos antrópicos que alteren la oxigenación de las aguas por contaminación de materia orgánica constituyen un laboratorio natural para el estudio de las reacciones que condicionan la biodisponibilidad del S y la evaluación de su toxicidad.

El presente trabajo analiza la presencia de fases de S en los sedimentos del Lago Sochagota, recurso formado por aguas hidrotermales de facies sulfatadas-cloruradas relacionadas con el sistema geotérmico asociado al volcán existente en el municipio de Paipa (Colombia), donde el desarrollo de la industria turística ha generado diversos focos de contaminación antrópica.

## CONTEXTO GEOLÓGICO

Los relieves del entorno del Lago Sochagota están formados por rocas sedimentarias de composición silíceas cuya edad oscila entre el Cretácico y cuaternario, predominando limolitas y

areniscas cuarzosas, radiolaritas y arcillas con óxidos de hierro.

Al Sur de la pequeña cuenca endorreica que delimita el Lago Sochagota, aparecen los materiales que constituyen el volcán de Paipa (Pardo *et al.*, 2005), un edificio volcánico explosivo erosionado formado por depósitos piroclásticos ácidos (riolitas alcalinas y traquiandesitas) de edad Plioceno-Pleistoceno que incluye una caldera colapsada de 3 kilómetros de diámetro con varios respiraderos hidrotermales. La presencia de estos materiales puede tener relación con la fuente de calor del intenso sistema geotérmico de la zona.

## MINERALOGÍA DE LOS SEDIMENTOS

Macroscópicamente, los materiales depositados en el lago son sedimentos microlaminados, de tamaño de grano muy fino, con diferente grado de compactación. Los más compactos son de color claro mientras que los menos compactos muestran tonos más oscuros y se caracterizan por la presencia de abundantes restos de plantas. Los análisis de difracción de rayos X revelan que todos los sedimentos están formados mayoritariamente por cuarzo y caolinita. En algunos casos, pueden apreciarse cantidades significativas de feldespatos. Las imágenes de electrones secundarios de SEM muestran que la caolinita aparece como agregados lamelares cuyo tamaño de cristal oscila entre 500 nm y varios µm. El cuarzo y feldespato se concretan en láminas formadas por cristales subidiomorfos de mayor tamaño, desde 100 a 800 µm. Los cristales de feldespato se caracterizan por presentar superficies muy alteradas. Son también frecuentes partículas de vidrio volcánico ácido muy ricas en microvesículas cuyo tamaño oscila entre 2 y 10 µm. Así mismo, se ha identificado la presencia de cristales dispersos de biotita. La matriz de la roca

aparece frecuentemente atravesada por restos de tallos de plantas alargados cuyo diámetro puede alcanzar hasta 50 µm. De forma dispersa, entre los microporos del sedimento aparecen microcristales y esférulas de pirita de tamaño en torno a 500 nm, cuya agrupación produce framboides de tamaño generalmente inferior a 10 µm que se concentran especialmente en zonas ricas en restos orgánicos, en las que se aprecian algunas morfologías que recuerdan a las bacterias. En estas zonas es usual la presencia de granos xenomorfos de S nativo. Cementando los microporos del sedimento se desarrollan agregados de microcristales prismáticos idiomorfos de calcita de tamaño inferior a 2 µm.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los datos de difracción de rayos X y microscopía electrónica sugieren que en la formación de los sedimentos del lago estuvieron implicadas diversas fuentes de aportes: detrítica, hidrotermal y órgano-antrópica.

Desde el punto de vista geomorfológico, el lago es una pequeña cuenca endorreica que se desarrolla sobre materiales neógenos y cuaternarios. El contexto geológico sugiere que la mayor parte de los minerales de los sedimentos proceden de los aportes detríticos de los materiales geológicos del entorno. El elevado tamaño de grano de los cristales de cuarzo y feldespatos sugiere que estos minerales tienen su origen en los abundantes materiales sedimentarios silíceos del cretácico al neógeno que constituyen la cuenca de drenaje. La presencia de caolinita como mineral del grupo de arcilla apunta especialmente a las areniscas neógenas de la formación Tilatá, descritas previamente por Quintero-Ortiz *et al.* (2011) como ricas en dicho mineral formado por la alteración de

**palabras clave:** Pirita, Azufre Elemental, Reducción Orgánica

**key words:** Pyrite, Elemental Sulfur, Organic Reduction

feldespatos. La presencia de pequeñas cantidades de vidrio volcánico y biotita puede relacionarse con los aportes distales de la formación vulcanosedimentaria explosiva de edad neógena que constituyen el edificio volcánico de Paipa.

La presencia de abundantes microcristales idiomorfos que cementan los poros del sedimento indica que algunas de las fases minerales tuvieron su origen en procesos autigénicos. La formación de estos minerales en sedimentos superficiales de sistemas lacustres puede producirse como consecuencia de la saturación de la concentración de algunos iones en los fluidos intersticiales y procesos asociados a la descomposición de materia orgánica y la actividad microbiana (Vuillemin *et al.*, 2013). El desarrollo de condiciones reductoras en los sedimentos y las aguas de los poros es un factor esencial que controla la formación, transformación y preservación de los minerales autigénicos. En los sedimentos estudiados, las características texturales de pirita, S nativo y calcita podrían asociarse a la neoformación de minerales como consecuencia de la interacción entre los fluidos intersticiales y los componentes sólidos del sedimento. Las facies sulfatadas-cálcicas de las aguas hidrotermales que alimentan el Lago Sochagota pueden suponer la fuente de S y Ca necesarios para la formación de algunas de estas fases. La presencia de biotita en los sedimentos del lago y de óxidos de Fe en los sedimentos del entorno podrían aportar el Fe necesario para el desarrollo de las reacciones autigénicas.

En este tipo de ambientes, la formación de minerales que contienen S y/o Fe resulta indicadora de la evolución de las condiciones de oxidación del medio. La reducción de Fe<sup>3+</sup> es requerida para la formación de algunos de estos minerales. Especialmente, bajo condiciones eutróficas, la presencia de comunidades microbianas puede contribuir a la formación temprana de minerales autigénicos en sedimentos superficiales. La composición de las aguas del Lago Sochagota revela la existencia de focos emisores de contaminación orgánica por la actividad antrópica que podrían afectar notablemente las condiciones de oxidación de las aguas de los poros de los sedimentos. La descomposición de la materia orgánica y la actividad

microbiana producen sustancias húmicas de tipo gel que promueven condiciones supersaturadas de las aguas de los poros (Zelibor *et al.* 1988), que traen como resultado la cristalización de agregados. Dependiendo de la composición de partida de las aguas de los poros y de la evolución de las condiciones de hipoxia pueden desarrollarse especies y morfologías minerales específicas. Por ejemplo, partiendo de facies acuosas sulfatadas, la génesis de metano puede promover la formación de formas más reducidas del S (como H<sub>2</sub>S) que en presencia de Fe disuelto produce la formación de pirita. El descubrimiento de concreciones de pirita en los sedimentos lacustres superficiales del Sochagota, permite la estimación de las condiciones que prevalecían en las aguas del fondo del lago y de los aportes necesarios para su formación. Los framboides de pirita muestran un tamaño homogéneo, pequeño y libre de recrecimientos, lo que sugiere que fueron probablemente formados en las aguas de los poros de los sedimentos bajo condiciones anóxicas (Böttcher y Lepland, 2000). El desarrollo de framboides se relaciona con la agregación de microcristales por atracción magnética (Wilkin y Barnes 1997). Las imágenes de SEM y los microanálisis de EDX revelan con frecuencia en los sedimentos del Sochagota micropartículas de S elemental. Su presencia sugiere que el Fe disponible en el sedimento no es suficiente para fijar la cantidad de H<sub>2</sub>S en los microporos. Miyabuchi y Terada (2009) indicaron que la existencia de S elemental en sedimentos de calderas volcánicas podría deberse a la reacción de SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S. La actividad fumarólica asociada al volcán de Paipa podría aportar el SO<sub>2</sub> necesario para el desarrollo de dicha reacción. Sheng *et al.* (2015), sugieren que las micropartículas de S elemental pueden producirse por la reacción del H<sub>2</sub>S con oxidantes como O<sub>2</sub> u óxidos de Fe<sup>3+</sup>. Por ello, procesos de oxigenación estacional de las aguas del lago en los periodos de lluvia también podrían explicar este proceso.

Uno de los riesgos ambientales que se evidencia en el Lago Sochagota, se relaciona con la presencia de S nativo en los sedimentos, que revela una concentración insuficiente de Fe disponible para restringir la toxicidad de las facies sulfuradas. La presencia en exceso de compuestos como el H<sub>2</sub>S

podría afectar a los organismos del lago y a la calidad de sus aguas, llegando a restringir el uso del recurso con fines recreativos y afectando, de este modo, el desarrollo de la actividad turística.

#### AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido financiado por: "Programa de becas para la formación de Doctores en Ciencias Básicas - Asociación Universitaria Iberoamericana de Postgrado AUIP - UJA - 2015"; Proyecto "Modelo integrado de gestión del Lago Sochagota y las aguas termales del municipio de Paipa, área de influencia del distrito de riego Usocicamocha, Grupo Gestión del Recurso Hídrico (Universidad de Boyacá - COL0005477"; Grupo de investigación RNM-325; y Proyecto UJA "Comportamiento Reológico Complejo de Zonas de Falla Activas en Secuencias Carbonatadas Multicapa: Aplicaciones a la estimación de riesgo sísmico y la explotación de recursos hídricos".

#### REFERENCIAS

- Böttcher, M.E., Lepland, A. (2000): *Biogeochemistry of sulfur in a sediment core from the west-central Baltic Sea: evidence from stable isotopes and pyrite textures*. *J. Mar. Syst.*, **25**, 299-312.
- Miyabuchi, Y., Terada, A. (2009): *Subaqueous geothermal activity revealed by lacustrine sediments of the acidic Nakadake crater lake, Aso Volcano, Japan*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **187**, 140-145.
- Pardo, N., Cepeda, H., Jaramillo, J.M. (2005): *The Paipa volcano, Eastern Cordillera of Colombia, South America: volcanic stratigraphy*. *Earth Sciences Research Journal*, **9**, 3-18.
- Quintero Ortiz, F.A., Torres Valenzuela, J., Ríos Reyes, C.A. (2011): *Zeolitisation of Neogene sedimentary and pyroclastic rocks exposed in Paipa (Boyacá), in the Colombian Andes: simulating their natural formation conditions*. *Earth Sciences Research Journal*, **15**, 89-100.
- Vuillemin, A., Ariztegui, D., De Coninck, A.S., Lücke, A., Mayr, C., Schubert, C.J. (2013): *J. Paleolimnol.*, **50**, 275-291.
- Sheng, Y., Sun, Q., Bottrell, S.H., Mortimer, R.J. (2015): *Reduced inorganic sulfur in surface sediment and its impact on benthic environments in offshore areas of NE China*. *Environ. Sci. Process Impacts*, **17**, 1689-1697.
- Wilkin, R.T., Barnes, H.L. (1997): *Formation processes of framboidal pyrite*. *Geochim Cosmochim Acta*, **61**, 323-339.
- Zelibor, J.L., Senftle, F.E., Reinhardt, J.L. (1988): *A proposed mechanism for the formation of spherical vivianite crystal aggregates in sediments*. *Sedimentary Geology*, **59**, 125-142.