

# HALLAZGO DE ESPELEOTEMAS SILÍCEAS EN ROCAS GRANÍTICAS DEL BATOLITO DE ACHALA, SIERRAS PAMPEANAS DE CÓRDOBA

Marcela A. CIOCCALE<sup>1,2</sup>, Andrea I. PASQUINI<sup>3</sup> y Pedro J. DEPETRIS<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Ambiente de Montaña y Regiones Áridas (IAMRA) Universidad Nacional de Chilecito, 9 de julio 22, Chilecito, La Rioja.

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba.

<sup>3</sup> CICTERRA-CIGeS, Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra. CONICET-Universidad Nacional de Córdoba, Avenida Vélez Sarsfield 1611, X5016GCA Córdoba. Email: apasquini@com.uncor.edu

## RESUMEN

Se presentan los primeros resultados en relación con el hallazgo de espeleotemas silíceas en rocas graníticas del batolito de Achala (Córdoba). Estas espeleotemas constituyen formas de acumulación en un ambiente dominado por procesos erosivos; alcanzando un desarrollo de unos de pocos milímetros hasta dos centímetros de espesor. Se localizan en grietas abiertas y paredes de tafonis. Presentan morfologías variadas que incluyen estalactitas y espeleotemas tipo flowstone. Están compuestas por sílice amorfa (ópalo A), yeso y fragmentos detríticos de cuarzo, feldspatos y micas. El modelado geoquímico, mediante el programa PHREEQC, permite simular la formación de estas espeleotemas a partir de procesos de evaporación del agua que circula a través de la roca fracturada.

Palabras clave: *Espeleotemas, Rocas graníticas, Modelado geoquímico, Ópalo A, Argentina.*

**ABSTRACT:** *Occurrence of silica speleothems in granitic rocks of the Achala batholith, Sierras Pampeanas of Córdoba. We are reporting on the occurrence of silica speleothems in granitic outcrops of the Achala batholith (Córdoba). Speleothems are accumulation forms which occur in environments dominated by erosive processes. They usually reach a thickness that varies between a few millimeters and 2 cm, and grow in fractures or in tafonion walls. Its morphology is varied and includes stalactites and flowstone-type speleothems. They are mainly composed of amorphous silica (opal-A) and mineral detritus (quartz, feldspar, and mica). PHREEQC modelling allows simulating the genesis of speleothems, progressively increasing the evaporation of meteoric water that flows through fractured zones.*

Keywords: *Speleothems, Granitic rocks, Geochemical modelling, Opal-A, Argentina.*

## INTRODUCCIÓN

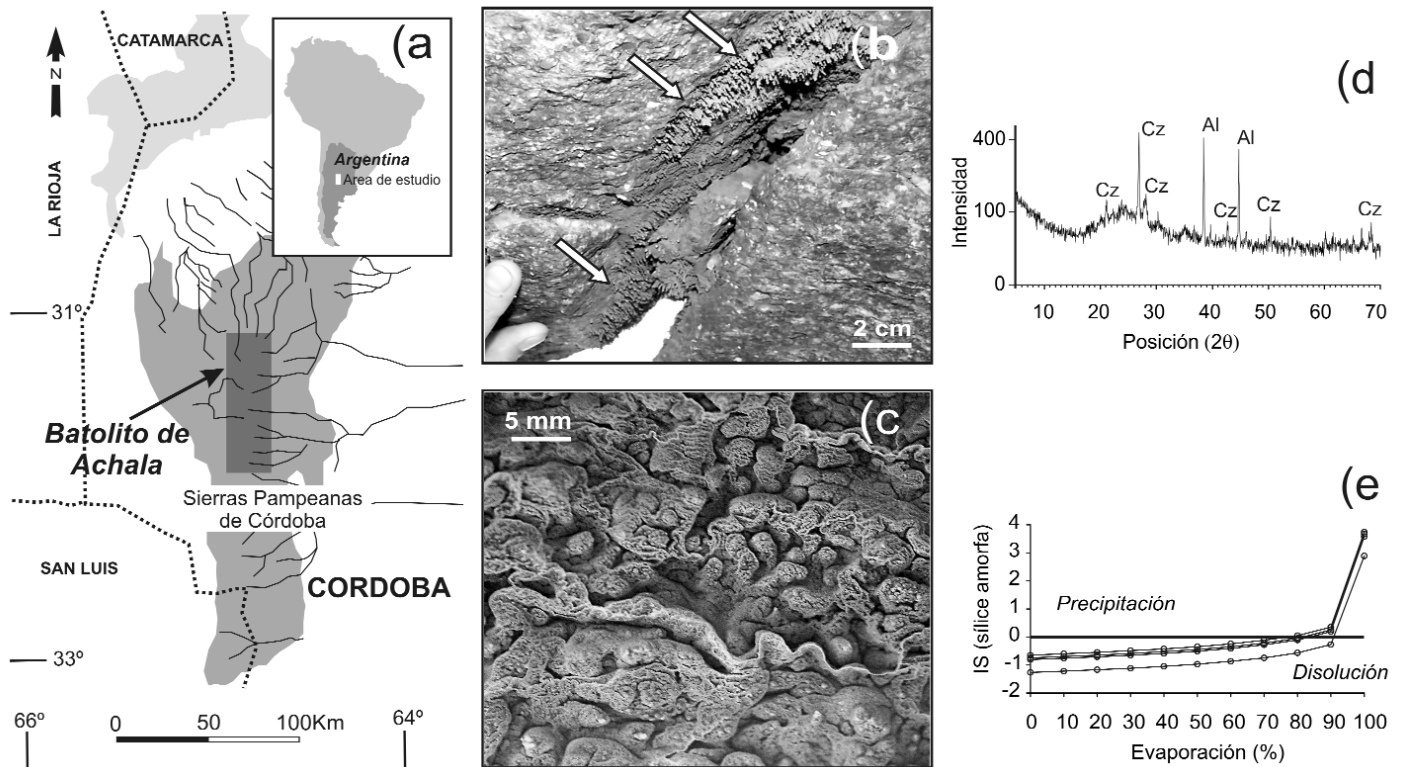
El batolito de Achala, en la sierra Grande de Córdoba, es un cuerpo intrusivo compuesto principalmente por un monzogranítico porfírico emplazado en el complejo metamórfico regional de las Sierras Pampeanas. Tiene una extensión de 105 km de largo y 43 km de ancho (Demange *et al.* 1996). Sus afloramientos representan un típico paisaje granítico dominado por formas de erosión. Las formas mayores están representadas por una llanura granítica con el desarrollo de *inselbergs*, *bornhardts* y *nubbis*, mientras entre las formas medianas y menores se encuentran los típicos tafonis, bloques, bochones y pilas (Cerutti y Cioccale 2006). Procesos de acumulación de sedimentos eólicos y regolito están restringidos a zonas topo-

gráficamente más bajas que el relieve circundante. En este paisaje, dominado por procesos erosivos, se observaron pequeñas formas de acumulación presentes en grietas abiertas y paredes de tafonis. Estas formas, que exhiben las típicas características morfológicas resultantes de los procesos de disolución-precipitación en cuevas y cavernas, han sido denominadas en la literatura como espeleotemas. Se presentan aquí los primeros resultados obtenidos en relación con el hallazgo de espeleotemas silíceas en rocas graníticas de las Sierras Pampeanas de Córdoba.

Existen en la bibliografía numerosas referencias en relación a la formación y desarrollo de espeleotemas carbonáticas, cuya importancia en reconstrucciones paleoambientales ha sido ampliamente destacada (por ej. Sancho *et al.* 2004, Mc

Garry y Caseldine 2004, Fairchild *et al.* 2006). Sin embargo son menos conocidos los estudios relacionados a formas resultantes de procesos de disolución-precipitación en rocas no carbonáticas. Una completa revisión bibliográfica de los trabajos publicados sobre espeleotemas silíceas ha sido presentada por Wray (1997), mientras entre los trabajos más relevantes pueden citarse los de Willems *et al.* (1998), Wray (1999), Willems *et al.* (2002), Vidal Romani *et al.* (2003) y Aubrecht *et al.* (2008).

Las espeleotemas estudiadas fueron halladas en la región central de la sierra Grande de Córdoba, entre los 31°10' - 32°00' S y 64°35' - 65°00' O (Fig. 1a). La roca aflorante en el área es un monzogranito porfírico de la facies B del batolito (Lira y Kirschbaum 1990) o serie Achala



**Figura 1:** (a) Mapa de ubicación del área de estudio. (b) Diaclasa abierta en roca granítica. Las flechas indican la presencia de espeleotemas coraloides (5-7 mm) desarrolladas en forma perpendicular a la pared de la grieta. (c) Detalle de la típica asociación de espeleotemas tabicadas y coraloides, con un alto grado de porosidad. (d) DRX de una muestra de espeleotema coraloides. Se observa el amplio pico difuso de base extendida correspondiente al ópalo A y se identifican los picos de cuarzo (Cz). El aluminio (Al) corresponde al portamuestra utilizado. (e) Variación de los índices de saturación (IS) de sílice amorfa en función de los porcentajes de evaporación del agua en cuatro muestras de vertientes del batolito de Achala (modelados con PHREEQC).

(Demange *et al.* 1993). Su mineralogía principal está representada por cuarzo, microclino, plagioclasa ( $An_{2-22}$ ), biotita y muscovita; los accesorios más abundantes son circón, magnetita-ilmenita, fluorapatita, rutilo, clorita, caolinita y minerales uraníferos. En esta región, las precipitaciones medias anuales oscilan entre los 900 y 1.000 mm y se concentran entre los meses de noviembre y marzo. La temperatura media anual es de 10°C, con máximas medias de 14 a 20°C y mínimas medias de 5°C (Capitanelli 1979). Estudios recientes indican la ocurrencia de modificaciones climáticas substanciales durante las últimas décadas (Pasquini *et al.* 2006). La vegetación dominante está representada por pastizales de altura. El desarrollo de suelos es incipiente y el alto índice de rocosidad (hasta 85 %) indica el predominio de afloramientos graníticos.

## DESCRIPCIÓN DE LAS ESPELEOTEMAS

### Condiciones micro-ambientales de yacencia

Las espeleotemas encontradas alcanzan un desarrollo de pocos milímetros a 2 cm de espesor. Se localizan principalmente en ambientes protegidos, en grietas abiertas y sobre las paredes de tafonias (Fig.1b). Estos microambientes albergan condiciones particulares: son lugares oscuros y húmedos, con temperaturas más uniformes que las reinantes en el exterior y un importante desarrollo de actividad biológica representada por musgos, líquenes e insectos.

### Morfología de las espeleotemas

Las espeleotemas desarrolladas en las ro-

cas graníticas del batolito de Achala presentan diferentes morfologías. Con el fin de describir y ordenar las formas observadas se tomó como base la clasificación previa de Wray (1999).

#### a) *Estalactitas*

**Coraloides:** Son el tipo más extendido en el área de estudio. Se trata de formas irregulares semejantes a corales ramiformes. En la literatura son también identificadas como formas de coliflor. Tienen un desarrollo entre 1 y 5 mm de diámetro y de 3 a 10 mm de largo. Su crecimiento es en general perpendicular a las paredes de las grietas (Fig. 1b) y presentan colores homogéneos que van de pardo a pardo amarillento. Poseen una textura porosa. **Tabicadas:** Son formas de tamaños similares a las coraloides, frecuentemente se hallan asociadas a ellas. Se trata de tabiques ondulados con secciones muy finas entre 1 y 3 mm, con alturas que alcanzan

los 8 mm (Fig. 1c). Son porosas y sus colores son también similares a las coraloides. Son frecuentes en el área de estudio. *Popcorns*: Se presentan en general asociadas a las formas coraloides. Presentan tamaños similares a ellas y se diferencian en su morfología típica y en sus secciones relativamente mayores alcanzando los 10 mm. Al igual que las coraloides son muy porosas y son comunes en el área de estudio.

*Cilíndricas*: Su desarrollo es perpendicular o inclinado respecto de la pared que las sostiene. En la zona de estudio presentan entre 1 y 10 mm de largo y de 0,5 a 5 mm de diámetro, aunque otros autores han observado espeleotemas cilíndricas de mayor desarrollo (por ej. Wray 1999). Su sección presenta estructura concéntrica. Son menos abundantes que las coraloides.

#### **b) Espeleotemas tipo flowstones:**

*Laminares*: Son formas extremadamente delgadas, con espesores máximos de 1 mm, con estructuras de flujo apenas perceptibles. Su forma está estrechamente vinculada con la morfología de la roca que recubren. Son menos porosas y frágiles que las estalactitas.

*Botroidales*: Son formas relativamente más gruesas que las de tipo laminar, sus espesores van de 2 a 8 mm y presentan estructuras de flujo. Al igual que las laminares son menos frágiles y porosas respecto de las estalactitas. Son abundantes en el área de estudio y se desarrollan preferentemente en grietas inclinadas a verticales.

#### **Composición de las espeleotemas**

Sobre muestras de espeleotemas coraloides y botroidales se realizaron diagramas de difracción de rayos X (DRX) con el fin de identificar las especies minerales presentes. Los resultados obtenidos revelan claramente la presencia de sílice amorfa, formas cristalinas de  $\text{SiO}_2$ , y otros minerales típicos de las rocas graníticas. El DRX de la figura 1d muestra un pico difuso de base extendida con el centro situado alrededor de los  $26^\circ$  ( $2\theta \sim 3.4 \text{ \AA}$ ) que resulta típico del ópalo A (Smith

1998). En el DRX de la figura 1d son también claramente identificables picos correspondientes a sílice cristalina sobrepuestos al ópalo y en otros valores angulares ( $2\theta$ ). Otros minerales presentes a nivel de trazas son feldespatos y micas. Estos minerales, junto con la sílice cristalina, son de carácter detrítico. Otras muestras analizadas por DRX (no incluidas en la figura) revelaron también la presencia de yeso. Este mineral, de origen evaporítico, se presenta frecuentemente asociado al desarrollo de este tipo de espeleotemas (por ej., Vidal Romani *et al.* 2003).

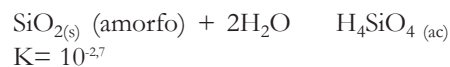
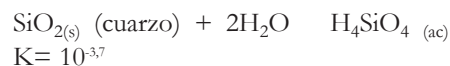
#### **ORIGEN DE LAS ESPELEOTEMAS SILÍCEAS**

El origen de las espeleotemas silíceas es aún discutido en la bibliografía, la mayor parte de los autores coinciden en que son el resultado de procesos de disolución y precipitación de sílice similares a aquellos que dan origen a las estalactitas y estalagmitas carbonáticas. Algunos autores (por ej., Willems *et al.* 1998, Vidal Romani *et al.* 2003) sugieren además que su formación está vinculada a procesos biogénicos o incluye, al menos en algún estadio de su desarrollo, la participación de microorganismos como bacterias u hongos. En un trabajo reciente, Aubrecht *et al.* (2008) atribuyen un origen biológico a las espeleotemas silíceas desarrolladas en la cueva Charles Brewer en Venezuela. Los autores denominan a estas formas como bioespeleotemas y sostienen que se forman directamente a partir de bacterias heterotróficas o cianobacterias.

Por otra parte, las espeleotemas silíceas parecen formarse en ambientes diversos con variables tenores de sílice disuelta en las aguas circulantes. Sin embargo, en la mayoría de los casos citados en la bibliografía, estas formas se desarrollan en lugares protegidos siendo infrecuente encontrarlas en áreas expuestas. Por esta razón se considera que las condiciones microambientales locales son más importantes en la formación de las espeleotemas que las condiciones climáticas regio-

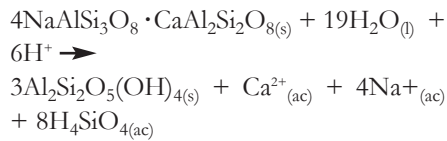
nales (Wray 1999).

Con el fin de realizar un ejercicio de simulación de formación de las espeleotemas por procesos de precipitación, se realizaron modelos geoquímicos de evaporación sucesiva mediante la utilización del programa PHREEQC (Parkhurst y Apello 1999). Los modelos se alimentaron con la composición del agua que circula en la fracturas de las rocas del batolito de Achala, estudiada por Pasquini *et al.* (2002). Las aguas son bicarbonatadas/sódico-potásicas a cálcicas, con pHs variables entre 7,3 y 8,8 y concentraciones de sólidos totales disueltos (STD) entre  $\sim 10$  y  $\sim 40$  mg/L. Los tenores de sílice disuelta oscilan entre 2,4 y 9,5 mg/L. En la mayoría de las aguas naturales a bajas temperaturas, con valores de pH entre 6 y 10 la tasa de disolución de la sílice cristalina es extremadamente baja, mientras la sílice amorfa tiene una solubilidad ligeramente mayor (Stumm y Morgan 1996):



donde las constantes de equilibrio dadas son válidas a  $25^\circ\text{C}$ . Bajo condiciones de pH neutros o ligeramente alcalinos la especie de sílice dominante, según los equilibrios arriba planteados, es el  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  mientras a pHs mayores de 9, el ácido silícico se disocia en  $\text{H}_3\text{SiO}_4^-$  y  $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$  y la concentración total de especies de Si disueltas se incrementa drásticamente (Drever 1997).

Teniendo en cuenta las condiciones ambientales actuales de la región (que determinan una tasa de denudación superior que la de meteorización), es probable que la sílice disuelta aquí provenga principalmente de la meteorización de la oligoclasa, plagioclasa dominante en los granitos de Achala. La reacción teórica de alteración de oligoclasa ilustra el aporte de sílice disuelto a partir de la meteorización de este mineral:



La figura 1e muestra los resultados obtenidos mediante los sucesivos porcentajes de evaporación de las aguas ensayados con el programa PHREEQ-C. Los valores del índice de saturación (IS) obtenidos para la sílice amorfa indican claramente que a partir del 80% de evaporación del agua de las vertientes, la precipitación de esta especie es posible, por cuanto los IS son positivos (IS>0). Por otra parte, la actividad del ácido silícico ( $\alpha \text{H}_4\text{SiO}_4$ ) en las muestras de vertientes utilizadas para el modelado oscila entre  $10^{-4,060}$  y  $10^{-3,587}$  indicando que las muestras se encuentran subsaturadas en  $\text{SiO}_2$  amorfa. En las muestras evaporadas entre el 80 y 90%, la  $\alpha \text{H}_4\text{SiO}_4$  aumenta notablemente a valores comprendidos entre  $10^{-2,587}$  y  $10^{0,674}$ , lo cual indica que en este caso las aguas se encuentran sobresaturadas en  $\text{SiO}_2$  amorfa y por lo tanto esta especie puede precipitar. Por otra parte, según el modelo, otros minerales como yeso, calcedonia y calcita pueden también precipitar en estas condiciones. Los resultados obtenidos a través de estos modelos, sugieren que las espeleotemas pueden formarse en las condiciones ambientales actuales por procesos de precipitación de sílice, tal como ha sido sugerido en la bibliografía. Esto no significa que las espeleotemas tengan necesariamente una edad reciente.

Trabajos publicados en otras regiones hacen referencia a la presencia de polen, esporas y microorganismos (como poliquetos y dinoflagelados) en el interior de las espeleotemas (por ej. Willems *et al.* 2002, Vidal Romaní *et al.* 2003), los que constituyen una valiosa fuente de información ambiental. Futuros estudios detallados de las espeleotemas del batolito de Achala, que permitan profundizar en el conocimiento de su edad y tasa de formación, podrán contribuir a la comprensión de parte de la historia ambiental de

las Sierras de Córdoba.  
AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocemos el apoyo de FONCYT (PICT 7-25594) y CONICET (PIP 5947).

#### TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Aubrecht, R., Brewer-Carías, Ch., Šmída, B., Audy, M. y Kováčik, L'. 2008. Anatomy of biologically mediated opal speleothems in the World's largest sandstone cave: Cueva Charles Brewer, Chimantá Plateau, Venezuela. *Sedimentary Geology* 203: 181-195.
- Capitanelli, R.G. 1979. Clima. En Vásquez, J.B., Miatello, R.A. y Roqué, M.E. (eds.) *Geografía Física de Córdoba*, p. 45-138, Ed. Boldt, Córdoba.
- Cerutti, N. F. y Cioccale, M. A. 2006. Clasificación y análisis de las geoformas graníticas del batolito de Achala. 3° Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología. *Actas* 2: 523-531. Córdoba.
- Demange, M., Alvarez, J.O., López, L. y Zarco, J. 1996. The Achala Batholith (Córdoba, Argentina): a composite intrusion made of five independent magmatic suites. *Magmatic evolution and deuteric alteration. Journal of South American Earth Sciences* 9: 11-25.
- Drever, J.I. 1997. *The geochemistry of natural waters. Surface and groundwater environments*. Prentice Hall, 436 p., New Jersey.
- Fairchild, I.J., Smith, C. L., Baker, A., Fuller, I., Spötl, C., Mathey, D., y McDermott, F. 2006. Modification and preservation of environmental signals in speleothems. *Earth-Science Reviews* 75: 105-153.
- McGarry, S. y Caseldine, C. 2004. Speleothem palinology: undervalued tool in Quaternary studies. *Quaternary Science Reviews* 23: 2389-2404.
- Parkhurst, D.L. y Apello, C.A.J. 1999. User's guide to PHREEQC - A computer code program for speciation, path-reaction, one-dimensional transport and inverse geochemical calculations. United States Geological Survey Water Resource Investigation Report 99-4259.
- Pasquini, A.I., Grosso, L., Mangeau, A.P. y Depetris, P.J. 2002. Geoquímica de ríos de montaña en las Sierras Pampeanas: I. Vertientes y arroyos del batolito de Achala, provincia de

Córdoba, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 57: 437-444.

- Pasquini, A.I., Lecomte, K.L. y Depetris, P.J. 2004. Geoquímica de ríos de montaña en las Sierras Pampeanas: II. El río Los Reartes, Sierra de Comechingones, provincia de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 59: 129-140.
- Pasquini, A.I., Lecomte, K.L., Piovano, E.L. y Depetris, P.J. 2006. Recent rainfall and runoff variability in central Argentina. *Quaternary International* 158: 127-139.
- Sancho, C., Peña, J.L., Mikkan, R., Osácar, C. y Quinif, Y. 2004. Morphological and speleothemic development in Brujas Caves (South-ern Andean range, Argentina): palaeoenvironmental significance. *Geomorphology* 57: 367-384.
- Smith, D.K. 1998. Opal, cristobalite, and tridimite: noncrystallinity versus crystallinity, nomenclature of of the silica minerals and bibliography. *Powder Diffraction* 13: 2-19.
- Stumm, W. y Morgan, J.J. 1996. *Aquatic chemistry. Chemical equilibria and rates in natural waters*. Wiley-Interscience, 1024p., New York.
- Vidal Romaní, J.R. y Twidale, R.T. 1998. *Formas y paisajes graníticos*. Universidad de la Coruña, Monografía 55, 411 p. CIUDAD.
- Vidal Romaní, J.R., Bourne, J.A., Twidale, C.R. y Campbell, E.M. 2003. Siliceous cylindrical speleothems in granitoids in warm semiarid and humid climates. *Zeitschrift für Geomorphologie* 47: 417-437.
- Willems, L., Compere, P. y Sponholz, B. 1998. Study of siliceous karst genesis in eastern Niger: microscopy and X-ray microanalysis of speleothems. *Zeitschrift für Geomorphologie* 42: 129-142.
- Willems, L., Compère, P., Hatert, F., Pouclet, A., Vicat, J.P.C. y F. Boulvain. 2002. Karst in granitic rocks, South Cameroon: cave genesis and silica and taranakite speleothems *Terra Nova* 14: 355-362.
- Wray, R.A.L. 1997. A global review of solutional weathering forms on quartz sandstones. *Earth-Science Reviews* 42: 137-160.
- Wray, R.A.L. 1999. Opal and chalcedony speleothems on quartz sandstones in the Sidney region, southeastern Australia. *Australian Journal of Earth Science* 46: 623-632.

Recibido: 28 de febrero, 2008

Aceptado: 30 de junio, 2008