

## Petrografía de inclusiones fluidas en espeleotemas: comparación con calcitas no espeleotémicas

### *Fluid inclusion petrography in speleothems: comparison with non speleothemic calcites*

M. Lopez-Elorza<sup>1,2</sup>, M.B. Muñoz-García<sup>1</sup>, L. González-Acebrón<sup>1</sup> y J. Martín-Chivelet<sup>1,2</sup>

1. Dpto. Estratigrafía, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid

2. Instituto de Geociencias IGEO (CISC-UCM), C/ José Antonio Novais 12, 28040 Madrid

**Resumen:** Los espeleotemas presentan inclusiones fluidas que pueden utilizarse como *proxy* paleoclimático ya que sus características dependen de las condiciones fisicoquímicas y ambientales bajo las que se generaron. En esta línea, su caracterización petrográfica aparece como una tarea fundamental, previa a cualquier otro tipo de análisis. En este trabajo se presenta el estudio petrográfico de las inclusiones fluidas de dos coladas de Cueva del Cobre (Palencia), que ha permitido clasificarlas en siete tipos en función de su morfología (*thorn shaped*, *boudin shaped*, *elongate*, *amorphous*, *oval shaped*, *pyriform* y *round shaped*). Todas ellas son monofásicas líquidas. Dependiendo del tipo de morfología de las inclusiones, su posición en relación al cristal encajante es variable, siendo las *elongated* y *thorn shaped* exclusivamente intercristalinas, y todas las demás intracristalinas. Un análisis comparativo con inclusiones descritas en calcitas no espeleotémicas revela que las inclusiones fluidas *elongated*, *amorphous* y *oval shaped* son también comunes en esas calcitas, mientras que las *pyriform* y las *boudin shaped* no han sido descritas hasta ahora.

**Palabras clave:** colada espeleotémica, inclusiones fluidas, petrografía, paleoclima, karst

**Abstract:** *Speleothems show fluid inclusions which can be used as paleoclimate proxy, as their features depend on the physicochemical and environmental conditions under which they were formed. In this line, their petrographic study arises as a fundamental task prior to any further analysis. This paper shows the petrographic study of the inclusions of two flowstones from Cueva del Cobre (Palencia), which has allowed the recognition of seven types of fluid inclusions according to their morphology (thorn shaped, boudin shaped, elongate, amorphous, oval shaped, pyriform and round shaped), all of them monophasic. It should be noted that elongated and thorn-shape inclusions are exclusively intercrystalline, and the others are intracrystalline. A comparative analysis of these inclusions with those described in non-speleothemic calcites reveals that elongated, amorphous, and oval shaped morphologies are also common in those calcites, but pyriform and boudin shaped inclusions have been never described in previous works.*

**Key words:** *flowstone, fluid inclusions, petrography, paleoclimate, karst*

## INTRODUCCIÓN

Los espeleotemas son una herramienta importante para la obtención de registros paleoclimáticos, debido a su amplia distribución geográfica en zonas continentales y a la gran resolución que permiten las dataciones radiométricas de estos materiales. Las inclusiones fluidas que albergan plantean grandes oportunidades en nuevas líneas de investigación y adquisición de series de paleotemperaturas, con técnicas tan novedosas como el análisis de gases nobles (Scheidegger *et al.*, 2008) o la nucleación de una fase gaseosa a partir del femtolaser y el posterior estudio microtermométrico (Krüger *et al.*, 2008). La mayoría de los experimentos relacionados con el análisis de gases nobles o isótopos estables (Vonhof *et al.*, 2006) se realiza mediante *crushing* de las muestras de calcita, normalmente sin trabajos previos de petrografía para determinar zonas óptimas con mayor concentración de inclusiones válidas para llevar a cabo el ensayo. En

consecuencia, hasta ahora hay escasos trabajos petrográficos de inclusiones fluidas (*e.g.*: Kendall y Broughton, 1978) en este tipo de materiales.

Una inclusión fluida se forma cuando una cavidad se rellena por uno o varios fluidos en el momento de formación del cristal, albergando algunas veces uno o más minerales sólidos. En el caso de los espeleotemas, las inclusiones fluidas intercristalinas se forman por un crecimiento competitivo de los cristales de calcita. Este mecanismo de formación genera una coalescencia parcial de los cristales, permitiendo la creación de espacios libres entre los distintos cristales de calcita y generando inclusiones de los tipos *elongated* y *thorn shaped*, descritos ya por Kendall y Broughton en 1978. Estas morfologías aparecen orientadas según el crecimiento del cristal. Por otro lado, las inclusiones intracristalinas se generan por defectos estructurales o

impurezas existentes dentro del cristal (inclusiones primarias) o bien por procesos diagenéticos (inclusiones secundarias) (Goldstein, 2003).

En este trabajo se presenta la caracterización petrográfica de las inclusiones fluidas existentes en coladas espeleotémicas holocenas procedentes de la Cueva del Cobre (Sierra de Peña Labra, Palencia) y una comparación de las mismas con las inclusiones fluidas de calcitas de diferentes orígenes (no espeleotémicas). La comparación se centrará en morfologías, fases existentes (líquido, sólido, gas) y posición cristalográfica (intercristalinas o intracristalinas).

## METODOLOGÍA

El estudio se ha centrado en dos coladas espeleotémicas (AP-95 y COB-2) de la Cueva del Cobre, en las que se han caracterizado y clasificado un total de 130 inclusiones fluidas sobre lámina delgada. Las láminas delgadas, de 350  $\mu\text{m}$  de espesor y formato grande de 5 x 8 cm, se pegaron en frío con cianocrilato siguiendo el procedimiento de Krüger *et al.* (2008) y se realizaron con una sierra de baja velocidad Isomet1000 Precision Cutter y sin pulido, con el objetivo de causar el menor daño posible a las inclusiones. En nuestro caso hemos añadido laca para facilitar el estudio petrográfico. El estudio se realizó con la ayuda de un microscopio óptico Nikon Eclipse VL100N POL.

## RESULTADOS

Las muestras de las coladas espeleotémicas AP-95 y COB-2 están formadas por fábricas *columnar elongate* y *columnar fascicular optic* en el sentido de Frisia (2015). La longitud de los cristales varía desde 500  $\mu\text{m}$  a 1,5 cm. Las inclusiones se encuentran en su mayoría dispersas en el seno del cristal, aunque algunas de tipo *round shaped* aparecen alineadas según direcciones cristalinias.

Basándonos en los aspectos morfológicos de las inclusiones, éstas se han agrupado en siete tipos, que denominamos *thorn shaped*, *elongated*, *boudin shaped*, *amorphous*, *pyriform*, *round shaped* y *oval shaped* (Fig. 1). Estas tipologías se han agrupado en función de su posición respecto al cristal huésped:

### Inclusiones intercristalinas

Incluye las de tipo *elongated* y *thorn shaped*, descritas previamente por Kendall y Broughton (1978).

Las inclusiones *elongated* constituyen el 36% de las inclusiones estudiadas. Suelen tener dimensiones que varían entre 20 y más de 100  $\mu\text{m}$  (Fig. 1A). Este tamaño depende de la propia longitud del cristal de calcita, formándose inclusiones más largas cuando los

cristales columnares son más grandes y por lo tanto la fase intercristalina es mayor. Las de tipo *thorn shaped* representan el 22,3% de las identificadas y también suelen tener variación de tamaños, pero en general son más pequeñas que las *elongated* (5-100  $\mu\text{m}$ ). Suelen ser fáciles de identificar, puesto que su anchura disminuye en la dirección del crecimiento del cristal, generando morfologías en punta (Fig. 1B).

### Inclusiones intracristalinas

El resto de las tipologías reconocidas son intracristalinas (*boudin shaped*, *amorphous*, *pyriform*, *round shaped* y *oval shaped*).

Las inclusiones *boudin shaped* (23,8% de las estudiadas) tienden a formar morfologías tubulares con estrechamientos a lo largo de la inclusión (Fig. 1C). Su tamaño varía entre 5 y 30  $\mu\text{m}$  y no siguen ninguna orientación cristalina predominante.

Las denominadas *amorphous* (7,6% del total) son más equidimensionales que las anteriores y no tienen ninguna forma en particular (Fig. 1D). El tamaño suele variar entre 5 y 30  $\mu\text{m}$ . A pesar de que algunas de ellas no presenten ninguna orientación predominante en relación al cristal huésped, sí se han podido observar algunas protuberancias que se alargan hacia el eje de crecimiento del cristal (Fig. 1D).

Las inclusiones tipo *pyriform* (3,8%) presentan una morfología característica que se compone por una “cabeza” redondeada, seguida por una punta que muchas veces es paralela al eje cristalino (Fig. 1E). Suelen tener tamaños generalmente pequeños en comparación con las demás (5-15  $\mu\text{m}$ ).

Las llamadas *round shaped* (3,8%) son redondeadas, tienden a aparecer agrupadas y muestran tamaños muy pequeños (2-5  $\mu\text{m}$ , Fig. 1F).

El último tipo de inclusiones son las *oval shaped* (1,5% del total). Tienen una morfología parecida a la elipse con dos ejes simétricos y perpendiculares, cuyo eje mayor se orienta paralelamente al eje de crecimiento del cristal (Fig. 1G). El tamaño de este tipo de inclusiones es parecido a los de las *amorphous*.

## DISCUSIÓN

La comparación de las inclusiones descritas en las coladas espeleotémicas de la Cueva del Cobre con las inclusiones normalmente encontradas en calcitas no espeleotémicas de diferentes orígenes revela notables analogías, pero también interesantes diferencias.

En las calcitas no espeleotémicas las inclusiones elongadas y amorfas son las más comunes.

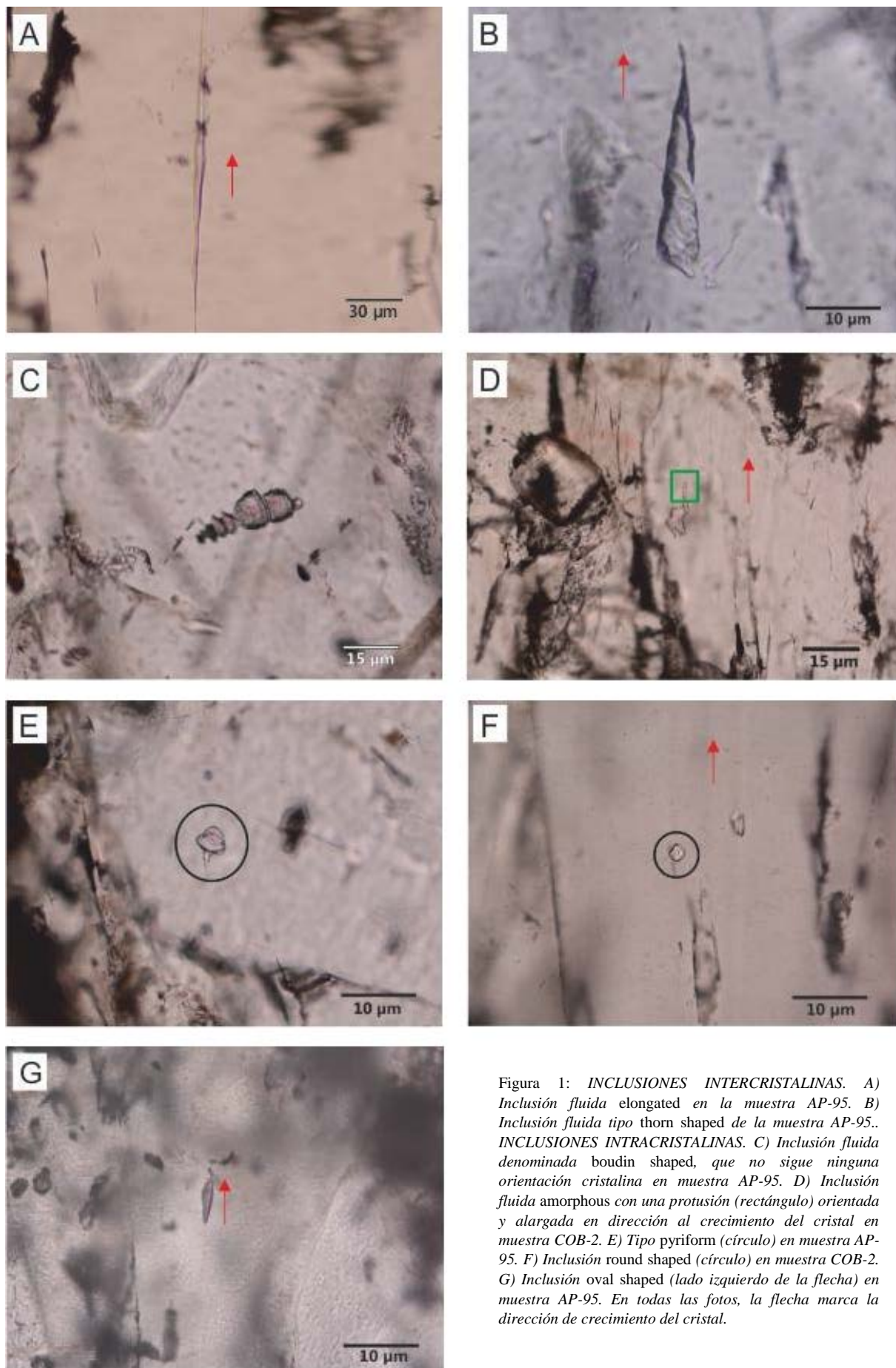


Figura 1: *INCLUSIONES INTERCRISTALINAS*. A) *Inclusión fluida elongated en la muestra AP-95*. B) *Inclusión fluida tipo thorn shaped de la muestra AP-95*. *INCLUSIONES INTRACRISTALINAS*. C) *Inclusión fluida denominada boudin shaped, que no sigue ninguna orientación cristalina en muestra AP-95*. D) *Inclusión fluida amorphous con una protusión (rectángulo) orientada y alargada en dirección al crecimiento del cristal en muestra COB-2*. E) *Tipo pyriform (círculo) en muestra AP-95*. F) *Inclusión round shaped (círculo) en muestra COB-2*. G) *Inclusión oval shaped (lado izquierdo de la flecha) en muestra AP-95*. En todas las fotos, la flecha marca la dirección de crecimiento del cristal.

Por ejemplo, las calcitas hidrotermales albergan gran cantidad de inclusiones con estas morfologías, así como inclusiones de formas ovaladas (Peter *et al.*, 1994). Estas morfologías también han sido observadas en las coladas estudiadas, donde las intercrystalinas *elongated* son las más comunes. Otro tipo de morfologías que también suelen aparecer en las calcitas no espeleotémicas son las cuadradas, por ejemplo, en calcitas telodiagenéticas (Muech y Slobodnik, 1996), pero no se han observado en espeleotemas hasta ahora.

Por otro lado, morfologías más anómalas como las *thorn shaped*, se pueden considerar morfologías en cristal negativo (Kendall y Broughton, 1978). Se entiende por cristal negativo las inclusiones fluidas con morfologías regulares que siguen las caras de crecimiento del cristal huésped (Goldstein, 2003). Las morfologías *thorn shaped* no han sido descritas hasta ahora en las calcitas no espeleotémicas, ni tampoco las inclusiones *pyriform* o las *boudin shaped*, cuyo modo de formación queda todavía por definir.

En cuanto a su posición en relación al cristal, en el caso de los espeleotemas y muchas calcitas hidrotermales, la mayoría de las inclusiones *elongated* y *thorn shaped* primarias son intercrystalinas. Además, tanto en los espeleotemas como en calcitas de otros orígenes, las inclusiones intracrystalinas tienden a tener morfologías equidimensionales.

Respecto a las fases que alberga una inclusión (líquido y vapor; L:V), también hay diferencias según el origen de la calcita. Las inclusiones de los espeleotemas estudiados suelen ser monofásicas líquidas o bifásicas líquidas con burbujas de aire pequeñas. Estas características no son las habituales en inclusiones formadas en ambientes vadosos, puesto que tienden a ser bifásicas con proporciones variables de L:V (Goldstein, 2003). Según Krüger *et al.* (2008), esto probablemente se debe a las bajas temperaturas de formación de los espeleotemas. En cambio, las calcitas no espeleotémicas presentan diferentes fases, y pueden albergar gases o minerales hijo, que se forman a partir del enfriamiento de un líquido sobresaturado (Goldstein, 2003). Dada la baja salinidad del agua kárstica, hasta ahora no se ha podido observar la presencia de minerales hijo en las inclusiones fluidas de los espeleotemas.

## CONCLUSIONES

Las coladas de la Cueva del Cobre presentan inclusiones fluidas monofásicas que han sido clasificadas en siete tipologías basadas en criterios morfológicos. Algunas de estas tipologías como las *elongated*, *amorphous* o las *oval shaped* son parecidas a las inclusiones que se observan en calcitas no espeleotémicas. Estos tipos en algunos casos

comparten otras características además de la morfología, por ejemplo, las inclusiones *elongated* son intercrystalinas en todos los materiales. Por otro lado, las inclusiones tipo *thorn shaped*, *pyriform* o *boudin shaped* solo han sido descritas en espeleotemas.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo es una contribución al proyecto de investigación CGL2013-43257-R (MINECO) y al Grupo de Investigación de “Paleoclimatología y Cambio Global (910198)” de la UCM.

## REFERENCIAS

- Frisia, S. (2015): Microstratigraphic logging of calcite fabrics in speleothems as tool for paleoclimate studies. *International Journal of Speleology*, 44 (1): 1-16
- Goldstein, R.H. (2003): Petrographic analysis of fluid inclusions. En: *Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation*. (I. Samson, A. Anderson, & D. Marshall, eds.). Mineral. Assoc. Can., Short Course Ser. 32: 9-53
- Kendall, A. C. y Broughton, P. L. (1978): Origin of fabrics in speleothems composed of columnar calcite crystals. *Journal of Sedimentary Petrology*, 48: 519-538
- Krüger, Y., Fleitmann, D. y Frenz, M. (2008): Paleotemperatures from fluid inclusion liquid-vapor homogenization in speleothems. *PAGES News*, 16 (3): 13-14
- Muech, P. y Slobodnik, M. (1996): Recognition and significance of multiple fluid inclusion generations in telogenetic calcites. *Mineralogical Magazine* 6: 813-819
- Peter, J. M., Goodfellow, W. D. y Leyourne, M. I. (1994): Fluid inclusion petrography and microthermometry of the Middle Valley Hydrothermal System, Northern Juan de Fuca Ridge. En: *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results* (Mottl, M.J., Davis, E.E., Fisher, A.T., Slack, J.F., eds.) 139: 411-428
- Scheidegger, Y., Kluge, T., Kipfer, R., Aeschbach-Hertig, W. y Wieler, R. (2008): Paleotemperature reconstruction using noble gas concentrations in speleothem fluid inclusions. *PAGES News*, 16 (3): 10-12
- Vonhof, H. B., Van Breukelen, M. R., Postma, O., Rowe, P. J., Atkinson, T. C. y Kroon, D. (2006): A continuous-flow crushing device for on-line  $\delta^2\text{H}$  analysis of fluid inclusion water in speleothems. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 20: 2553-2558.