

# Influencia de la presión del aire en el goteo de una estalactita. Caso de la Cueva del Agua (Iznalloz, Granada)

*Air pressure influence in the drip of a stalactite. The case of the Cueva del Agua (Iznalloz, Granada)*

A. Fernández-Cortés, J.M. Calaforra, F. Sánchez-Martos y J. Gisbert

Departamento de Hidrogeología. Universidad de Almería. 04120 Almería. [acortes@ual.es](mailto:acortes@ual.es), [jcalafor@ual.es](mailto:jcalafor@ual.es), [fmartos@ual.es](mailto:fmartos@ual.es), [jgisbert@ual.es](mailto:jgisbert@ual.es)

## ABSTRACT

*The time series analysis of a drip rate and electric conductivity of a stalactite in Cueva del Agua (Granada) during five hydrological years, has allowed to characterize several themes of the vadose infiltration. The increase of air pressure variations is one of the main factors of drip rate non-linearity (cave air pressure oscillation of  $10 \pm 3.7$  mbar induce a drip rate variation of  $0.5 \pm 0.2$  mm/h). This air pressure increase provoke a rise of air phase thickness inside drip to the detriment of the water phase, decreasing so the stalactite drip rate.*

**Key words:** drips, speleothems, karst, cave, temporal linearity.

*Geogaceta*, 37 (2005), 95-98  
ISSN:0213683X

## Introducción y antecedentes

El estudio de la recarga en zonas kársticas a través del estudio de las filtraciones (goteos en espeleotemas, coladas, fracturas, etc.) en cavidades es una línea de investigación que despertó el interés en décadas pasadas, como lo demuestran los primeros estudios de Roques (1964) y Jackus (1977). Es a partir de finales de la década de los 90' cuando aparecen los estudios más completos y con una metodología más innovadora en relación al estudio de la recarga en zonas kársticas, mediante el análisis de la evolución temporal y del quimismo del agua de goteo en cavidades. Las cavidades son utilizadas como un laboratorio de medida de la infiltración en terrenos kársticos al igual que los manantiales. Análisis hidrológicos e hidroquímicos del agua de infiltración en terrenos kársticos, realizados en manantiales y cauces subterráneos, aportan información sobre la estructura y régimen de descarga de la red de conductos preferenciales del karst (Bakalowicz, 1975, 1981, 1992; Mangin, 1975; Atkinson, 1977; Williams, 1983; Bundschuh, 1997; Emblanch *et al.*, 1997; Grasso y Jeanin, 1997; Lastenet *et al.*, 1997). Sin embargo, la componente de infiltración lenta en un terreno kárstico no ha sido estudiada en los trabajos anteriores, siendo necesario para ello el control del goteo de espeleotemas en el interior de cavidades como herramienta para entender la estructura del karst y, en parti-

cular, la infiltración lenta asociada a la porosidad y pequeñas fisuras del karst (Harmon, 1979; Friederich y Smart, 1982; Even *et al.*, 1986). En este sentido, la hidrodinámica en la zona no saturada del karst ha sido caracterizada recientemente en los estudios particulares de Borsato (1997), Baker *et al.* (1997), Genty y Deflandre (1998), Sánchez-Martos *et al.* (1999), Sanz y López (2000), Baker y Brunndon (2003). Todos estos trabajos se analiza la relación entre la intensidad de goteo en estalactitas del interior de la cavidad con la cantidad e intensidad de las precipitaciones en el exterior, relacionando la intensidad de descarga en la cavidad con otras variables como la conductividad eléctrica del agua de goteo o la presión barométrica del aire en el interior.

## Contexto geológico y condiciones meteorológicas

La entrada de la Cueva del Agua se encuentra a una altitud de 1746 m.s.n.m, en el cambio de vertiente de Sierra Harana (Granada). La cavidad se encuadra dentro de la formación calizodolomítica del Lías-Inferior que llega a alcanzar los 900 m de potencia. Esta formación consta de dos términos, uno basal dolomítico y otro superior de calizas blancas (Pérez-López, 1986 a y b). La Cueva del Agua se desarrolla en el contacto entre estas dolomías brechoideas inferiores y la unidad superior de calizas

blancas, a favor de un plano de falla inversa. La dirección y sentido de desarrollo de la cavidad coincide en superficie con unas fuertes pendientes de hasta el 37%, de forma la topografía en superficie prácticamente coincide con el buzamiento del plano de falla (ENE) en el que se desarrolla la cavidad. En las calizas blancas que forman la roca encajante de la cavidad la fracturación y la estratificación subvertical de las calizas, favorecen significativamente la infiltración directa de los excedentes de lluvia en el epikarst.

Desde 1992 existe un control ambiental en el tiempo, gracias a la instalación de un laboratorio subterráneo consistente en equipos de medición continua de los principales parámetros físicos del aire y agua (González-Ríos *et al.*, 1995; Fernández-Cortés, 2004; Fig. 1)

El registro horario de la precipitación en el exterior de la Cueva del Agua (en mm/h) arroja un valor medio anual de 952 mm, en el periodo de 1997-2002. La distribución mensual media de las lluvias en este periodo tiene dos máximos propios de un clima mediterráneo continental; uno absoluto en otoño (177.3 mm en noviembre) y otro relativo en primavera (104.6 mm en marzo). En este período la lluvia útil representa un promedio del 67 % de las lluvias, disminuyendo este porcentaje al disminuir las precipitaciones (39 % en el año 1998/1999).



Fig. 1.- Control del goteo de estalactitas en la Cueva del Agua (Iznalloz, Granada).

Fig. 1.- Stalactite drip control in the Cueva del Agua (Iznalloz, Granada).

**Resultados**

La intensidad media de goteo de la sala de los Endriagos es de  $1.3 \pm 1$  mm/h ( $s=1$  mm/h). La máxima descarga de agua en una hora a través del goteo estudiado en la sala de los Endriagos es de 5 mm/h. Este valor máximo de intensidad de goteo en la mayoría de años hidrológicos induce a la idea de que el régimen de goteo en

la sala de los Endriagos también puede estar influenciado por la propia estructura del conducto de la estalactita, en cuanto que sus dimensiones limitan el caudal máximo que es capaz de transmitir (Sánchez-Martos *et al.*, 1999).

En la Tabla I se recogen los datos de variación interanual de la intensidad de goteo y del volumen total drenado por la estalactita de la sala de los Endriagos du-

rante el periodo de años hidrológicos 1997-2002. Las intensidades medias de goteo están correlacionadas positivamente con el volumen de agua drenado por la estalactita. Ambas variables dependen estrechamente del régimen pluviométrico en el exterior. En una escala anual la intensidad y, por tanto, el volumen de goteo presentan dos máximos relativos en otoño y primavera y un mínimo en verano, coincidiendo obviamente con la evolución temporal de las precipitaciones en el exterior.

Hay que añadir un tipo de variaciones de la intensidad de goteo de carácter diario e independientes del régimen de excedentes de lluvia. Estas variaciones tiene una duración media de 2-3 días y se relacionan con los cambios de presión barométrica del aire en el interior de la cavidad. De esta forma cuando el goteo es relativamente estable al no estar influenciado por los excedentes de lluvia, bien sea porque se encuentre en un estado de máximo goteo (primavera y otoño) o bien porque la infiltración sea mínima (verano), la intensidad de goteo se comporta de forma inversa a las variaciones de presión barométrica del aire (Fig. 2). En otros estudios se ha detectado un influencia importante de las variaciones de presión del aire sobre la intensidad de goteo, hasta el punto de generar cambios bruscos en la intensidad de goteo (incrementos del 95 %) o un régimen oscilatorio del goteo con una amplitud media de 1.4 ml/10 min

| Goteo estalactita (mm) | 1997/1998   |              | 1998/1999   |               | 1999/2000   |              | 2000/2001   |              | 2001/2002   |              |
|------------------------|-------------|--------------|-------------|---------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
|                        | Media       | Total        | Media       | Total         | Media       | Total        | Media       | Total        | Media       | Total        |
| Septiembre             | 0.25        | 180.4        | 0.30        | 213           | 0.69        | 498          | 0.23        | 165.6        | 0.27        | 197          |
| Octubre                | 1.97        | 1464.2       | 0.17        | 129.6         | 1.07        | 795.2        | 0.19        | 139.2        | 0.99        | 739          |
| Noviembre              | 3.50        | 2519.4       | 0.15        | 109           | 2.59        | 1866         | 2.32        | 1669         | 2.29        | 1646.4       |
| Diciembre              | 2.48        | 1848.6       | 0.13        | 98.2          | 2.61        | 1942.8       | 2.94        | 2188.8       | 2.15        | 1598         |
| Enero                  | 2.48        | 1846.8       | 0.13        | 99            | 2.12        | 1577         | 2.48        | 1844.8       | 2.40        | 1784.4       |
| Febrero                | 2.43        | 1634.6       | 0.15        | 100.6         | 0.71        | 494.2        | 2.47        | 1658.2       | 2.01        | 1348.2       |
| Marzo                  | 1.31        | 973.2        | 2.19        | 1627.4        | 0.70        | 520.6        | 2.18        | 1618.2       | 2.06        | 1529.6       |
| Abril                  | 1.41        | 1016         | 1.55        | 1113.8        | 1.95        | 1401.4       | 1.14        | 819.6        | 2.07        | 1488.4       |
| Mayo                   | 2.82        | 2101.4       | 0.61        | 456.2         | 2.26        | 1682.6       | 1.23        | 916.8        | 1.07        | 798          |
| Junio                  | 2.44        | 1758         | 0.31        | 221.8         | 1.37        | 987.4        | 1.30        | 935.2        | 0.47        | 336.8        |
| Julio                  | 0.96        | 716.2        | 0.33        | 242           | 0.52        | 385.2        | 0.70        | 523          | 1.04        | 776.8        |
| Agosto                 | 0.52        | 386.2        | 0.67        | 496.6         | 0.30        | 220.6        | 0.38        | 279.6        | 0.63        | 470.2        |
| <b>TOTAL</b>           | <b>1.88</b> | <b>16445</b> | <b>0.56</b> | <b>4907.2</b> | <b>1.41</b> | <b>12371</b> | <b>1.46</b> | <b>12758</b> | <b>1.45</b> | <b>12713</b> |

Tabla I.- Variación interanual de la intensidad de goteo durante el periodo de años hidrológicos 1997-2002 (Fernández-Cortés, 2004).

Table I.- Inter-annual variation of drip rate during the hydrological years 1997-2002 (Fernández-Cortés, 2004).

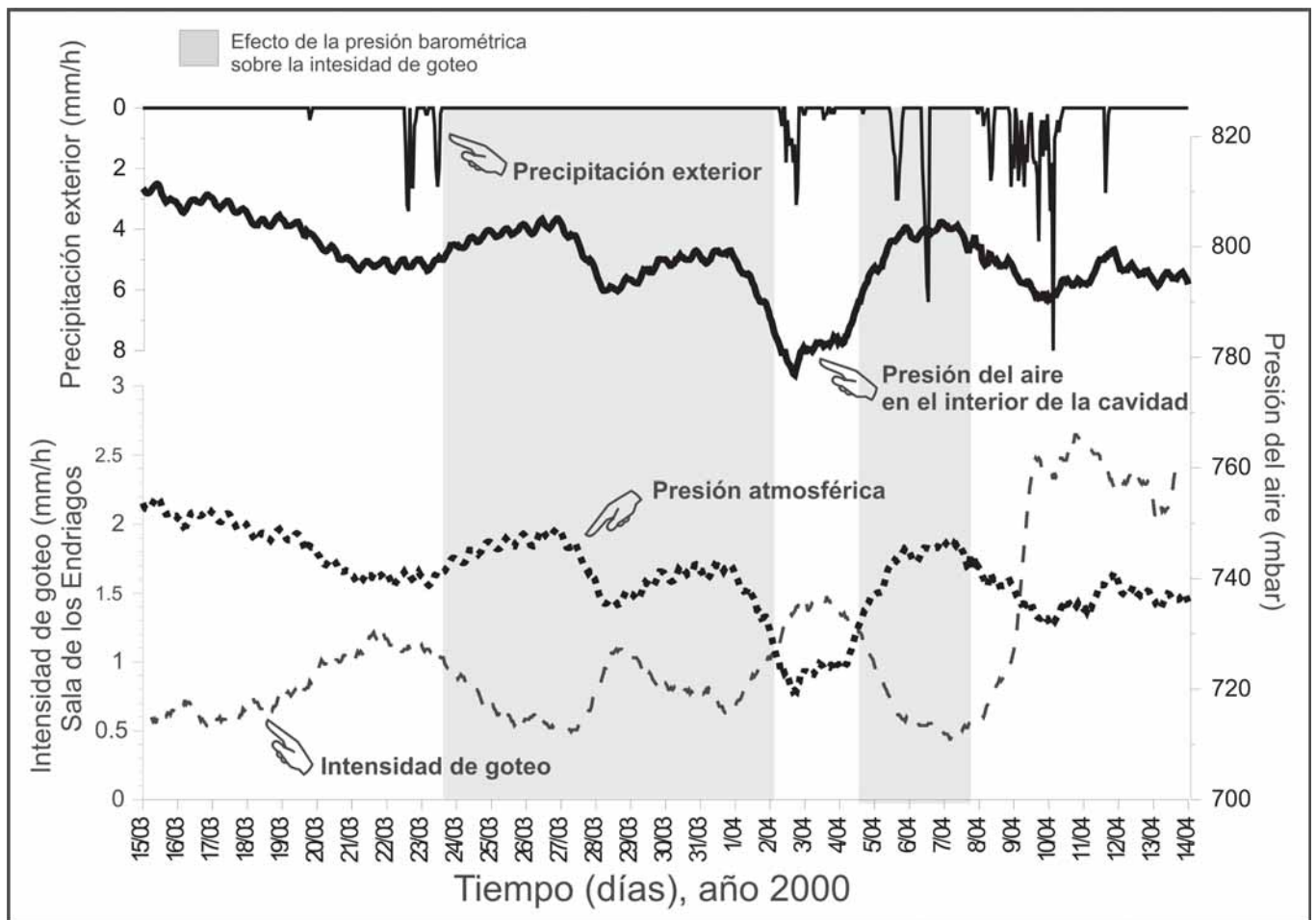


Fig. 2.- Relación entre la intensidad de goteo, la presión barométrica del aire interior y las lluvias (Fernández-Cortés, 2004).

Fig. 2.- Relationship between the drip rate, cave air pressure and rainfall (Fernández-Cortés, 2004).

(Genty y Deflandre, 1998; en Père Noël cave de Bélgica). En la Cueva del Agua una oscilación media de la presión barométrica en el interior de la cavidad de  $10 \pm 3.7$  mbar provoca una variación media de la intensidad de goteo en la sala de los Endriagos de  $0.5 \pm 0.2$  mm/h, valores muy inferiores a los incrementos repentinos de la intensidad de goteo provocados por “efecto pistón” ( $>1.5$  mm/h).

Para explicar la relación entre la variaciones de intensidad de goteo de una estalactita y los cambios presión de la aire de una cavidad, Genty y Deflandre (1998) proponen un cambio de la presión del fluido alojado en el sistema de poros que circunda el goteo. Estos factores externos provocan que la infiltración en la cavidad cambie de un régimen estacional (estados de mínima y máxima recarga y periodos de recesión) a otro régimen caótico, caracterizado por una falta de linealidad en el tiempo o en relación con la señal de entrada que representan los excedentes de lluvia.

### Conclusiones

Este trabajo aporta nuevas conclusiones sobre la descarga de agua en cavidades a través de goteos. El cotejo de los resultados con otros estudios en nuevas cavidades (escasos hasta la fecha), a diferente profundidad, geología, estructura o en otras regiones climáticas, es de gran importancia a la hora de comprender el fenómeno de la no linealidad en la señal de entrada (excedentes de lluvias), en el proceso de infiltración del agua en la zona no saturada y en la señal de salida (goteo en la cavidad).

La ausencia de linealidad en el goteo de una estalactita es un hecho inherente a la heterogeneidad física del karst en el espacio y a su variabilidad dinámica en el tiempo, junto al carácter aleatorio de la señal de entrada (precipitaciones) y, en ocasiones, de la señal de salida (puntos de descarga; goteos, coladas, manantiales, etc.). Por este motivo los modelos lineales no reflejan el comportamiento hidrológico de los puntos de descarga del

karst en situaciones extremas debido a la naturaleza no lineal y no estacionaria del sistema kárstico (Labat *et al.*, 2000 a,b y 2002). Por otra parte, las irregularidades en la linealidad del goteo de una estalactita es un aspecto importante a tener en cuenta a la hora de realizar reconstrucciones paleoclimáticas a partir del estudio de espeleotemas (Lauritzen y Lundberg, 1999). En relación a lo anterior, el conocimiento actual de las características no lineales de la hidrología del goteo en una cavidad puede mejorar la interpretación de los periodos climáticos extremos en el pasado a partir de los análisis isotópicos de espeleotemas.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Diputación Provincial de Granada dentro del convenio de colaboración con la Universidad de Almería. Nuestro más sincero agradecimiento a D.Manuel González Ríos, responsable de la gestión de la Cueva del Agua.

## Referencias

- Atkinson, T.C. (1977). *Journal of Hydrology*, 35, 93-110.
- Bakalowicz, M. (1975). *Annales de Spéléologie*, 4, 581-589.
- Bakalowicz, M. (1981). En: *8<sup>th</sup> International Congress of Speleology*. Comunicaciones, 710-713.
- Bakalowicz, M. (1992). En: *Bordeaux Karsts et évolutions climatiques* (Université de Bordeaux, Ed.). Presses Universitaires de Bordeaux, 61-74.
- Baker, A., Barnes, W.L. y Smart, P.L. (1997). *Hydrological Processes*, 11 (11), 1541-1555.
- Baker, A. y Brunson, C. (2003). *Journal of Hydrology*, 277, 151-163.
- Borsato, A. (1997). En: *Proceedings of the 6<sup>th</sup> Conference on Limestone Hydrology and Fissured Media and the 12<sup>th</sup> International Congress of Speleology*. Comunicaciones, 57-60.
- Bundschuh, J. (1997). En: *Proceedings of the 6<sup>th</sup> Conference on Limestone Hydrology and Fissured Media and the 12<sup>th</sup> International Congress of Speleology*. Comunicaciones, 129-132.
- Emblanch, CH., Mudry, J., Lastenet, R. y Puig, J.M. (1997). En: *Proceedings of the 6<sup>th</sup> Conference on Limestone Hydrology and Fissured Media and the 12<sup>th</sup> International Congress of Speleology*. Comunicaciones, 5-8.
- Even, H., Carmi, I., Magaritz, M. y Gerson, R. (1986). *Earth Surface Processes and Landforms*, 11, 181-191.
- Fernández Cortés, A. (2004). *Caracterización microclimática de cavidades y análisis de la influencia antrópica de su uso turístico*. Tesis Doctoral, Univ. de Almería, 423 p.
- Friederich, H. y Smart, P.L. (1982). En: *Proceedings of the University of Bristol - Speleological Society*. Comunicaciones, 143-159.
- Genty, D. y Deflandre, G. (1998). *Journal of Hydrology*, 211, 208-232.
- González-Ríos, M.J., Tinaut, A., Calaforra, J.M. y Sánchez-Martos, F. (1995). *Subterránea*, 4, 30-33.
- Grasso, D.A. y Jeannin, P.Y. (1997). En: *Proceedings of the 6<sup>th</sup> Conference on Limestone Hydrology and Fissured Media and the 12<sup>th</sup> International Congress of Speleology*. Comunicaciones, 91-94.
- Harmon, R.S. (1979). *Water Resources Research*, 15, 476-480.
- Jackus, L. (1977). *Morphogenetics of Karst Regions. Variants of Karst Evolutions*. Adam Hilger Ltd., 268 p.
- Labat, D., Ababou, R. y Mangin, A. (2000). *Journal of Hydrology*, 238, 123-148.
- Labat, D., Ababou, R. y Mangin, A. (2000). *Journal of Hydrology*, 238, 149-178.
- Labat, D., Mangin, A. y Ababou, R. (2002). *Journal of Hydrology*, 256, 176-195.
- Lastenet, R., Mudry, J. y Emblanch, C. (1997). En: *Proceedings of the 6<sup>th</sup> Conference on Limestone Hydrology and Fissured Media and the 12<sup>th</sup> International Congress of Speleology*. Comunicaciones, 17-20.
- Lauritzen, S.E. y Lundberg, J. (1999). *Holocene*, 9, 659-669.
- Mangin, A. (1975). *Annales de Spéléologie*, 28, 283-332.
- Pérez-López, A. (1986). *Estudios Geológicos*, 42, 397-405.
- Pérez-López, A. (1986). *Mediterránea, Serie Geológica*, 5, 147-156.
- Roques, M. (1964). *Annales de Spéléologie*, 2, 255-484.
- Sanz, E. y López, J.J. (2000). *Ground Water*, 38, 247-253.
- Sánchez-Martos, F., Calaforra, J.M. y González-Ríos, M.J. (1999). En: *Contribución del estudio científico de las cavidades kársticas al conocimiento geológico* (B. Andreo, F. Carrasco y J.J., Eds.). Patronato de la Cueva de Nerja, 371-380.
- Williams, P.W. (1983). *Journal of Hydrology*, 61, 45-67.