

# Incremento de CO<sub>2</sub> en cuevas profundas asociado a sismicidad cercana

## *Atmospheric CO<sub>2</sub> increasing in deep caves related to micro seismicity*

Pérez-López, R.<sup>1</sup>, M. Patyniak<sup>2</sup>, S. Sánchez-Moral<sup>3</sup>, E. Bañón<sup>4</sup>, J.J. Martínez-Díaz<sup>5</sup>, S. Cuezva<sup>3</sup>, J. Lario<sup>6</sup>, S. Martín-Velázquez<sup>7</sup>, P.G. Silva<sup>8</sup>, J.L. Giner-Robles<sup>9</sup> y M.A. Rodríguez-Pascua<sup>1</sup>

1 Área de Peligrosidad y Riesgos Geológicos. IGME, Instituto Geológico y Minero de España, C/Ríos Rosas 23, Madrid 28003, España, r.perez@igme.es, ma.rodriguez@igme.es

2 Institute of Earth and Environmental Science. University of Potsdam, Alemania. patyniak@uni-potsdam.de

3 Dpto. de Geología, Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC, C/José Gutiérrez Abascal 2, Madrid 28006, ssmilk@mncn.csic.es, scuezva@mncn.csic.es

4 Espeleoclub RESALTES Murcia. tritom\_99@yahoo.es

5 Dpto. Geodinámica, Facultad de Ciencias Geológicas de Madrid, Avda. Complutense S/N. Madrid 28004, España, jmdiaz@ucm.es

6 Facultad de Ciencias. UNED. Senda del Rey, 9. Madrid 28040. javier.lario@ccia.uned.es

7 Departamento de Biología y Geología, Física y Química Inorgánica. Universidad Rey Juan Carlos. Madrid, silvia.martin@urjc.es

8 Departamento de Geología. Universidad de Salamanca. SPAIN. Email: pgsilva@usal.es

9 Departamento de Geología y Geoquímica. Universidad Autónoma de Madrid, jorge.giner@uam.es

**Resumen:** Se han registrado variaciones del contenido de CO<sub>2</sub> en la Sima de Benis (Cieza, Murcia, SE de España), a una profundidad de 280m en la Sala de las Nubes durante los primeros 6 meses de 2015. El objetivo es analizar las variaciones de CO<sub>2</sub> con la micro-sismicidad en la zona. Para ello, se ha colocado un registrador de dióxido de carbono de tipo SENS AIR cuya frecuencia de muestreo es de 40 minutos. Se ha correlacionado los incrementos diarios en este gas con terremotos, obteniendo aumentos en 24h de hasta 300 ppm sobre un valor total cercano a 2000 ppm, en relación a terremotos localizados a menos de 15 km de la boca de la cavidad, cuya magnitud estimó el Instituto Geográfico Nacional en M3. Esta cavidad, que afecta a materiales carbonatados del Prebético Externo, se desarrolla a partir de una falla con evidencias de paleoterremotos durante el Pleistoceno Superior. Independientemente de su capacidad sismogénica, los datos muestran un aumento en la difusión y movilidad del CO<sub>2</sub> al tránsito de ondas sísmicas.

**Palabras clave:** CO<sub>2</sub>, terremoto, serie temporal, cueva, Béticas.

**Abstract:** *The Benis Cave is the deepest explored cave (-320m) affecting the Prebetic units of the Betic Cordillera, and it was related to an active fault. Evidence of Upper Pleistocene paleoseismic activity and the peculiar topography of the cave, hypogenic and fault-related halls, encouraged us to monitor the daily CO<sub>2</sub> content in the air composition at depth (280m), and for a time period of six months during the early 2015. Our results show a preliminary positive correlation between micro-seismic activity in the surroundings (up to 60 km away), and the CO<sub>2</sub> concentration (daily increasing till 300ppm for the closest microearthquakes). The maximum value of carbon dioxide recorded inside the cave was c.a. 2000 ppm, and the origin was established as pedogenic from the  $\delta^{13}C$  analysis. Therefore, we propose an increase in the CO<sub>2</sub> concentration into the air karst related to the micro-seismic activity. Despite this preliminary worthy results, more data are needed to establish an accurate model for earthquake forecasting.*

**Key words:** CO<sub>2</sub>, earthquake, temporal-series, cave, Betic Cordillera.

## INTRODUCCIÓN

Diferentes estudios se han preocupado en la búsqueda de precursores sísmicos capaces de avisar de la inminencia de un terremoto, con el fin de diseñar sistemas de alerta temprana (i.e. Bonfanti et al., 2012; Zheng et al., 2013, Hwa and Kim, 2015). De entre todos ellos, la búsqueda de emisiones gaseosas tanto en los instantes previos al terremoto como durante el mismo ha sido uno de los precursores más buscados a pesar de la escasa base científica que explique la relación causa-efecto entre el sismo y la emisión gaseosa. Si la emisión se produce antes del sismo, la teoría de la dilatancia (Scholz et al., 1973), explica que las variaciones en la presión de los fluidos contenidos

en la roca en el entorno de la falla sismogénica, provoca la emisión de gas disuelto.

Cualquier intento de utilizar un precursor sísmico como elemento para la prevención debe de contar con una observación muy completa, así como de un mecanismo científicamente creíble para explicar dicha observación. Las emisiones de gases han sido ampliamente declaradas como precursoras, pero actualmente no hay un único modelo que lo explique, y tampoco hay observaciones suficientemente de calidad. La monitorización en superficie se encuentra con el problema de la contaminación por acción antrópica y la monitorización en sondeo no coincide con puntos de interés señalados por geólogos de terremotos y sismólogos.

## HIPOTESIS DE PARTIDA

Una estrategia es trabajar en cuevas desarrolladas a través de fallas activas y con profundidad mayor a 50m, donde el intercambio con la atmósfera exterior es muy bajo. Para ello, utilizamos varios criterios: (a) Cuevas desarrolladas a favor de fallas con actividad Cuaternaria cosísmica, (b) Fallas con actividad sísmica instrumental, (c) Cuevas con evidencias paleosísmicas y (d) con anomalías térmicas. Hemos introducido sensores de CO<sub>2</sub>, por ser abundante en el interior de las cavidades y fácilmente monitorizado. El origen del CO<sub>2</sub>, se puede clasificar en tres tipos: (1) Endógeno, CO<sub>2</sub> profundo que asciende y embolsa en la cavidad, (2) químico, asociado a procesos normales de dinámica kárstica y (3) edáfico, asociado a la actividad propia de la génesis de suelos.

## GEOLOGIA Y PALEOSISMOLOGIA DE LA SIMA DE BENIS

La Sima de Benis, localizada en el municipio de Cieza, Murcia, (Fig.1), que se desarrolla en el Prebético Externo de las Cordilleras Béticas, alcanzando 350 metros de profundidad. Esta sima presenta evidencias de actividad paleosísmica (Pérez-López et al., 2009), así como una anomalía térmica significativa (Pérez-López et al., 2012a), con un gradiente geotérmico de 1,8°C/100m.

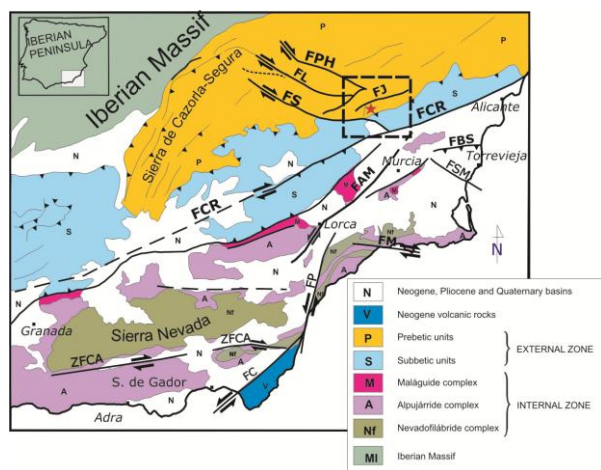


FIGURA 1. Localización geológica y geográfica de la Sima de Benis. FPH: Falla de Pozohondo, FL: Falla de Lietor, FS: Falla de Socovos, FCR: Falla de Crevillente, FAM: Falla de Alhama de Murcia, FBS: Falla Bajo Segura, FC: Falla de Carboneras, FP: Falla Palomares.

La topografía de esta cavidad muestra dos secciones principales (Pérez-López et al., 2015a), la primera de origen hipogénico, -125m, y está formada por tubos verticales decorados por *scallops* afectando a la unidad de calizas masivas del Eoceno, desarrollados a partir de una vena de calcita de orientación E-O. A -125m, se encuentra con la falla, de orientación N-S, de carácter normal con componente en dirección,

mostrando un "fault gouge" en el contacto de espesor métrico afectando al contacto con el Cretácico superior.

En esta segunda sección, la cueva se desarrolla a partir del plano de falla, decorando la cavidad con diferentes folias hasta -225m, donde aparecen nubes y otras estructuras botroidales. La datación de restos de lince de las cavernas (Pérez-López et al., 2012b) indica que el último gran terremoto pudo ser hace 65 ka.

## RESULTADOS OBTENIDOS

Pérez-López et al (2015a y 2015b) mostraron unos resultados preliminares obtenidos durante el primer mes de registro en Benis. Posteriores registros muestran una correlación entre los terremotos que han ocurrido en un radio de 60 km alrededor de la Sima de Benis y la emisión de CO<sub>2</sub>. La figura 2 muestra en el eje de ordenadas izquierdo la variación de la cantidad de CO<sub>2</sub> en el interior de la sima en ppm (en gris el error de cada medida, ±25 ppm) a una profundidad de -220m en la Sala de las Nubes, en las abscisas aparece el tiempo en días como una serie temporal equidistante y en el eje ordenadas derecho aparece la distancia en km entre el epicentro calculado por el ING ([www.ign.es](http://www.ign.es)) y la boca de la sima. El tamaño y color de cada punto hace referencia al tamaño del sismo registrado (mbLg).

Podemos agrupar el incremento de gas en relación a la distancia en dos grupos, a 20 km y más de 30 km. El terremoto que produce el mayor incremento es de M2.9 localizado, a menos de 10 km de la boca, con un incremento de casi 150 ppm respecto al día anterior. Los terremotos localizados entre 20 y 40 km de distancia, provocan aumentos entre 50 y 100 ppm. En cuanto a la gráfica de valores registrados entre abril y mayo (Fig. 2), vuelve a observarse la correlación entre la ocurrencia de microsismos, sobre todo a una distancia inferior a 15 km de la boca, con el aumento de hasta casi 300 ppm en el contenido diario de CO<sub>2</sub>.

Sin embargo, también aparecen variaciones en el contenido de CO<sub>2</sub> de más de 300 ppm sin que exista registro de sismos en la zona por parte de la red sísmica nacional. Esto puede ser debido a que la magnitud de completitud de la red es para M1.5. También podría deberse a algún otro fenómeno, por lo que además realizamos un análisis de la traza isotópica del carbono para determinar su origen.

Se han llevado a cabo dos campañas de recogida de datos en la cavidad, entre enero y febrero del 2015. El suelo y aire de la cueva están en equilibrio y no se distinguen indicios de flujo neto. Los resultados son bastante coherentes e indican que el origen de la fuente de CO<sub>2</sub> en la cueva da un  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  es de -22.11 con un coeficiente de correlación ( $R^2$ ,0,96). Este valor confirma un origen edáfico relacionado con actividad vegetal típica de zonas áridas. La vegetación (tomillo, esparto, romero) es principalmente de tipo C4. Los

datos del interior podrían indicar que en la cota -220m hay una bolsa de aire menos ventilada.

Los valores de CH<sub>4</sub> son menores que en el exterior. Esto junto al origen edáfico actual del CO<sub>2</sub> no es

contrario a un posible origen hipogénico de la cavidad. La concentración de Radón es moderadamente alta en los dos puntos donde se ha registrado (8610 y 7849 Bq/m<sup>3</sup> a -125 y -225m) e indica escasa tasa de renovación del aire.

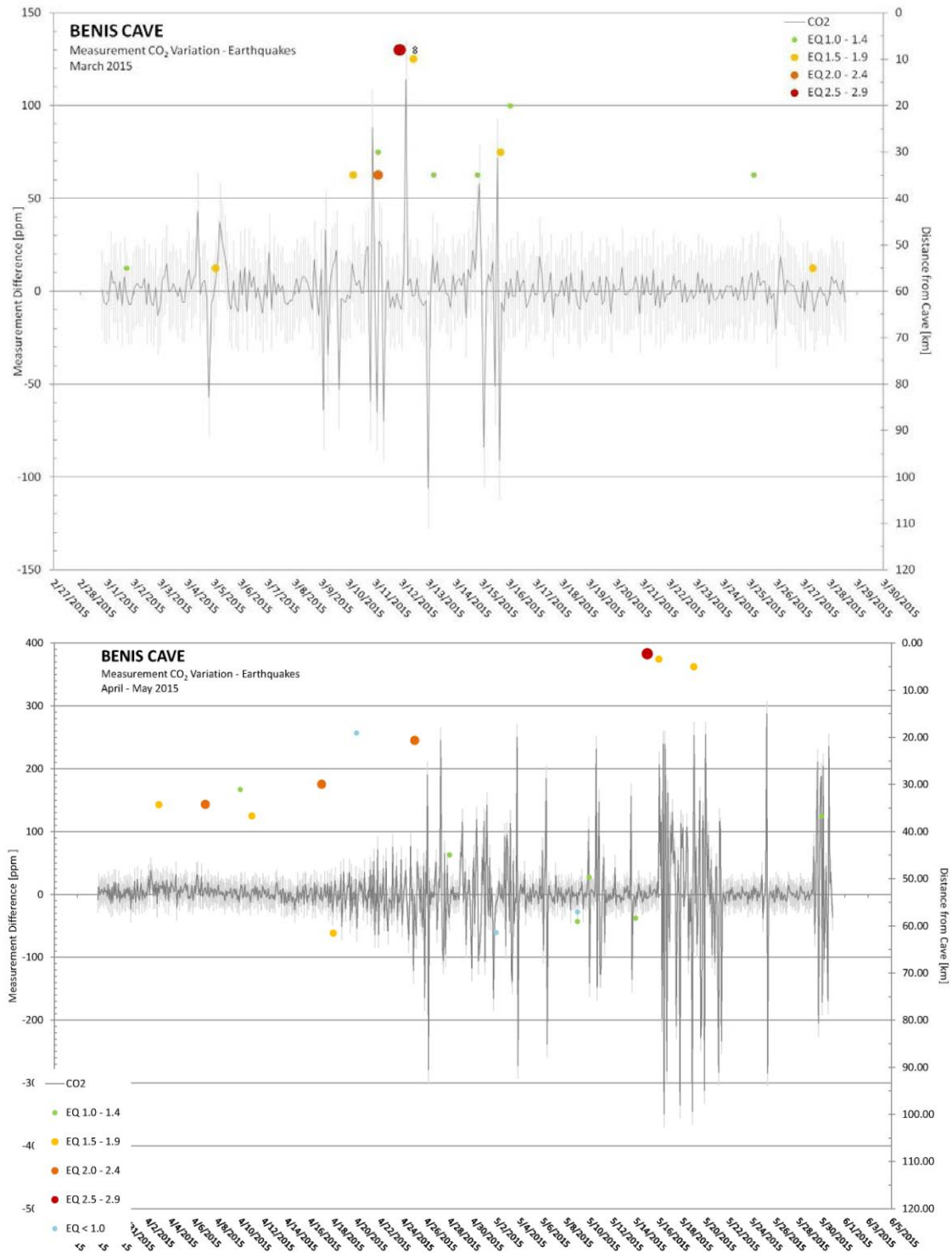


FIGURA 2. Variación de la cantidad de CO<sub>2</sub> en la Sala de las Nubes -220m en la Sima de Benis, Murcia. Ordenada izquierda, CO<sub>2</sub> en ppm, ordenada derecha, distancia entre el epicentro y la boca de la cueva, abscisas: días. Superior: datos correspondientes a marzo, 2015. Inferior: datos registrados en abril mayo de 2015.

## DISCUSION Y CONCLUSIONES

Se ha constatado una correlación positiva entre micro terremotos e incremento de CO<sub>2</sub> en la Sima de Benis, de hasta 300 ppm para un terremoto de M3, a menos de 10 km de distancia de la cavidad.

El origen del CO<sub>2</sub> es de edáfico, acumulado en la parte profunda de la cavidad debido a una mala ventilación (valores elevados de radón).

Los carbonatos donde se desarrolla la cavidad, acumulan CO<sub>2</sub> intersticialmente, el cual se emite por encima del valor de equilibrio entre la atmósfera de la cavidad y la roca, con el tránsito de las ondas sísmicas. Ese CO<sub>2</sub> intersticial se ha acumulado en la roca con una traza edáfica, por lo que proviene del exterior de la cavidad.

Sin embargo, es necesario registrar mas terremotos y sobre todo, más grandes en cuanto a su tamaño, para establecer leyes empíricas sobre el incremento de CO<sub>2</sub> y la energía liberada. Por otro lado, la frecuencia de muestreo de 40 minutos no es compatible para poder establecer un modelo realista entre la liberación de CO<sub>2</sub> y la ocurrencia del sismo. Aun así, en aquellos sismos donde existe una ocurrencia entre los terremotos y el aumento de CO<sub>2</sub>, aparentemente se observa como un fenómeno "a posteriori". Un terremoto de tamaño mayor (i.e. M6), podría arrojar luz sobre la dilatación, instantes antes de que ocurra.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos CGL2013-47412-C2-2-P, CGL2013-47412-C2-1-P y CGL2013-43324-R. Además, sus conclusiones se enmarcan dentro del proyecto CGL2012-37281-C02.01 y CGL2015-67169-P.

## REFERENCIAS

Bonfanti, P., Genzano, N., Heinicke, J., Italiano, F., Martinelli, G., Pergola, N., Telesca L., Tramutoli, V., (2012): Evidence of CO<sub>2</sub>-gas emission variations in the central Apennines (Italy) during the L'Aquila seismic sequence (March-April 2009).

*Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 53, 1, 147-168.

- Pérez-López, R., Rodríguez-Pascua, M.A., Giner-Robles, J.L., Martínez-Díaz, J.J., Marcos, A., Bejar, M. and Silva, P., (2009): Spelaeoseismology and palaeoseismicity of the "Benis Cave" (Murcia, SE of Spain): coseismic effects of the 1999 Mula earthquake (mb 4.8). *Geological Society of London Special Publications*, 316: 207-216.
- Pérez-López R., E. Bañón, J. Lario, P.G. Silva, M.A. Rodríguez-Pascua, J. García-Mayordomo, E. Pueyo, A. Marcos-Nuez, (2012a): Shallow Vertical Geothermal Gradient and Heat Flow within the Benis Cave (-320m, Cieza): Quaternary slip-rate for active fault-caves. *Geotemas* 13: 463-466.
- Pérez-López, R., T. Torres, G. Romero, E. Bañón, M.T. Rentero, J.E. Ortiz y P.G. Silva., (2012b): "Lynx pardinus spelaeus" extraction from the Benis Cave -350m (Cieza.): RX and radonization dental analyses. *Geotemas* 13: 265-268.
- Pérez-López, R., Bañón, E., López-Gutiérrez, J., Lario, J., Rodríguez-Pascua, M.A., Martín-Velázquez, S., Giner-Robles, J.L., Silva, P.G., del Moral, B., Pueyo-Morer, E.L., (2015a): Positive correlation between CO<sub>2</sub> daily peaks and micro-earthquakes occurrence in deep fault-caves: an empirical model. En: 6<sup>th</sup> International INQUA Meeting on Paleoseismology, Active Tectonics and Archaeoseismology. Pescino. Italia. 4pp.
- Pérez-López, R., M. Patyniak, S. Sánchez-Moral, E. Bañón, A. Manzanares, J. L. Giner-Robles, P. G. Silva, S. Cuezva, J. López-Gutiérrez y M. A. Rodríguez-Pascua, (2015b): Relationship between CO<sub>2</sub> content in fault caves and microseismicity. *Advances in Active Tectonics and Speleotectonics 2015*, Vienna, Austria.
- Scholz C.H., Syke L.R., Aggarwal Y.P., (1973): Earthquake prediction: a physical basis. *Science*, 181: 803-809.
- Zheng, G., S. Xu, S. Liang, P. Shi, J. Zhao, (2013). Gas emission from the Qingzhu River after the 2008 Wenchuan Earthquake, Southwest China. *Chemical Geology* 339, 187-193.