

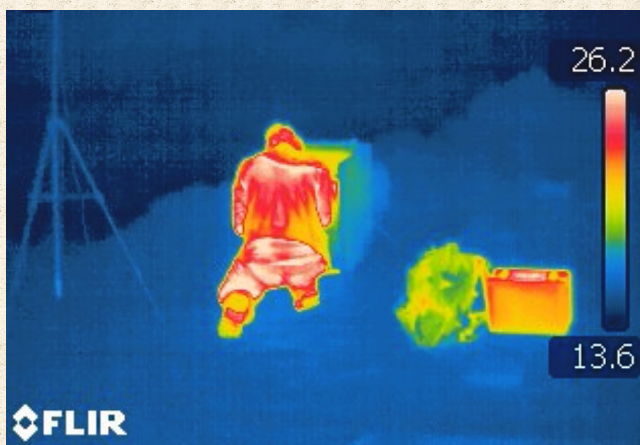
# LA GEOLOGÍA ES NOTICIA

**CONSERVACIÓN DE CAVIDADES  
NATURALES: INFLUENCIA DE LOS  
VISITANTES**

## El caso de la cueva de Altamira

*Sergio Sánchez-Moral, Soledad Cuezva,  
Ángel Fernández-Cortés y Juan Carlos Cañaveras*

(pag. 118)



**NAICA (CHIHUAHUA, MÉXICO)**

## Los cristales gigantes de la mina de Naica se inundan

*Giovanni Badino, José María Calaforra, Paolo Forti*

(pag. 121)



**SIMAS CALIENTES: EN EL  
CORAZÓN DE UNA FALLA ACTIVA**

## El ejemplo de la Sima del Vapor en la Falla de Alhama de Murcia

*Raúl Pérez López y  
José Jesús Martínez Díaz*

(pag. 124)





## SIMAS CALIENTES: EN EL CORAZÓN DE UNA FALLA ACTIVA

# El ejemplo de la Sima del Vapor en la Falla de Alhama de Murcia

RAÚL PÉREZ LÓPEZ<sup>1</sup> y  
JOSÉ JESÚS MARTÍNEZ DÍAZ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Geológico y Minero de España,  
Ríos Rosas, 23, Madrid. r.perez@igme.es

<sup>2</sup> Departamento de Geodinámica,  
Universidad Complutense de Madrid.

La monitorización de cuevas profundas desarrolladas en zonas de falla activas permite obtener parámetros hasta ahora poco conocidos. Con este espíritu, el proyecto SISMOSIMA se ha introducido en las cuevas tectónicamente más activas, así como en las cuevas más profundas de la Península Ibérica. El objetivo es entender cómo respira una falla y cómo exhalan CO<sub>2</sub> cuando generan terremotos o son afectadas por terremotos en el entorno cercano.

En el año 2013 solicitamos el proyecto INTERGEO en coordinación con el proyecto SISMOSIMA. Ambos proyectos, plantean el estudio y la monitorización de fallas activas en la Península Ibérica, con el aliciente de que las fallas son de velocidad lenta y producen terremotos importantes muy espaciados en el tiempo, con intervalos de miles e incluso decenas de miles de años. En este contexto, decidimos que la falla de Alhama de Murcia, FAM, era la mejor candidata para llevar a cabo este estudio multidisciplinar, configurando un equipo de investigación con un nutrido grupo de expertos que abarca desde geólogos de la UCM y del IGME, sísmólogos del IGN, ingenieros geodestas de la UPM, geofísicos de las universidades de Granada y Barcelona, además de espeleólogos profesionales y grupos de bomberos de diversas comunidades

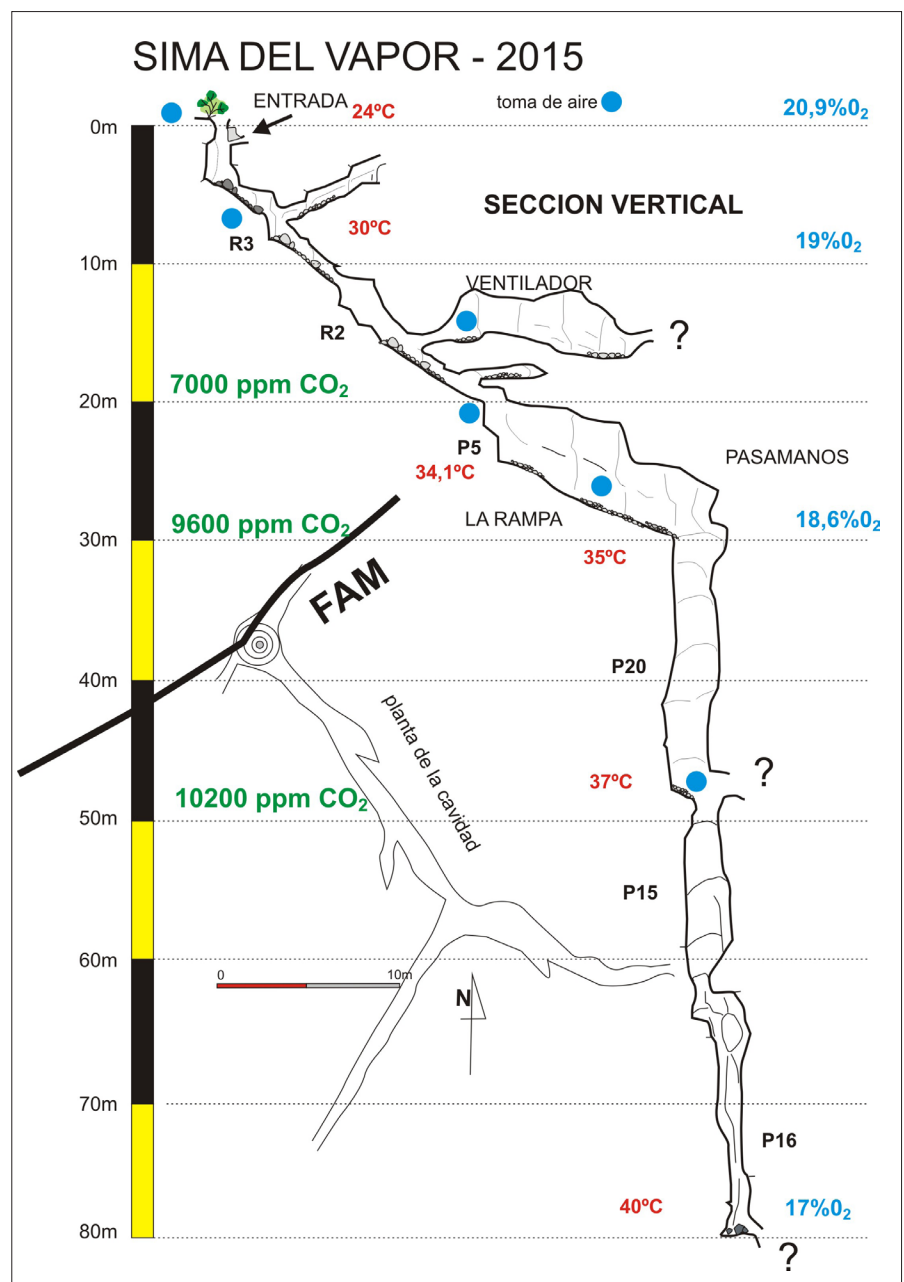


Fig.1. Topografía vertical de la Sima del Vapor y principales valores ambientales medidos en la campaña de trabajo de septiembre del 2015. Se observa también la relación en planta entre la topografía y un segmento de la falla de Alhama de Murcia.



Fig. 2. Para el trabajo en las zonas cuyo valor de oxígeno es inferior al 19% y los valores de CO<sub>2</sub> superiores a 10.000 ppm, es necesario el uso de equipos de respiración autónoma, lo que dificulta el trabajo y acorta los tiempos de permanencia en su interior.

autónomas, expertos en trabajo en espacios confinados.

El proyecto INTERGEO se plantea desde la perspectiva sismológica mediante el uso de sismógrafos portátiles, de la geodésica mediante el estudio de la red REGENTE del IGN y de puntos de medida propios densificados alrededor de la falla, así como desde la perspectiva geológica y geomecánica a partir de sondeos que atraviesan la roca de falla con el fin de estudiarla y determinar, *cómo se ha movido, cómo se está moviendo* y *estimar cómo podría moverse*. Como complemento, el proyecto SISMOSIMA pretende la monitorización térmica y gaseosa de las fallas utilizando simas naturales lo más profundas posible.

Monitorizar una falla consiste en registrar su actividad, es decir, en analizar aquellos parámetros y variables que intervienen durante el ciclo completo de un terremoto. Recordemos que el ciclo completo de un terremoto (ciclo sísmico) comprende el periodo temporal desde que la falla empieza a cargarse con energía elástica, hasta que rompe generando un terremoto con sus réplicas y precursores, pasando incluso por posibles etapas de deslizamiento asísmico.

Para conocer mejor este ciclo, debemos registrar los terremotos que dispara la falla, la deformación del terreno que produce, así como otros parámetros asociados a dicha actividad tectónica. En este caso, las variaciones de temperatura en el entorno de la falla, así como la emisión de diversos gases (CO<sub>2</sub> y Radón, principalmente), son buenos candidatos para ser monitorizados.

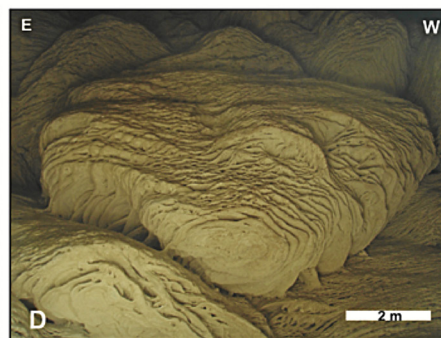


Fig. 3. Detalle de estrias en un plano de falla de la Sima de Benis (Murcia), a 200 m de profundidad. Esta cavidad aprovecha la zona de falla para su desarrollo en profundidad. Se observan evidencias de actividad sísmica en su interior, así como restos paleontológicos de lince de las cavernas (*Lynx spelaeus*) afectados por paleoterremotos.

La hipótesis de partida del proyecto SISMOSIMA es que existen precursores sísmicos. Varias teorías se han desarrollado para explicar dichos precursores. Una de ellas, la "Teoría de la difusión y dilatancia", desarrollada durante los años setenta del pasado siglo en California, plantea que las rocas de la región que rodea el tramo de una falla activa que está próxima a moverse y generar un terremoto, sufre previamente cambios de tensiones y volumen. Dichos cambios, serían los responsables de una movilización previa de los fluidos incluidos en los poros de la roca, que dependerían finalmente del estado de esfuerzos a que está sometido ese volumen de roca. Una vez que una teoría está planteada y desarrollada, el siguiente paso es la observación del fenómeno. Durante grandes terremotos se han detectado "anomalías" en los valores de CO<sub>2</sub> y radón en algunas fallas activas. Dichas anomalías o variaciones corresponden a incrementos en la concentración de dichos gases durante el terremoto o durante periodos previos al mismo, aunque no se ha propuesto ningún modelo en concreto capaz de reproducir dicho fenómeno.

Habitualmente, las monitorizaciones sobre variaciones de fluidos y de

temperatura asociadas a terremotos se llevaban a cabo en la superficie o en el entorno de la falla y, en algunos casos muy concretos, se habían utilizado sondeos. El proyecto SISMOSIMA innova al utilizar las cavidades para registrar y analizar estos parámetros. Las cuevas se habían utilizado en paleosismología, pero de forma muy diferente a la que propone este nuevo proyecto de investigación. En estos ambientes de estabilidad ambiental y delicado equilibrio, un terremoto provoca tal daño en su interior que queda reflejado de forma permanente como un auténtico paleosismógrafo, aportando información de grandes sismos.

El estudio de cavidades desarrolladas a favor de fallas activas, aporta una información muy valiosa sobre su geodinámica. La Falla de Alhama de Murcia (FAM) es una de las fallas más activas de la Península Ibérica, con una velocidad reciente estimada a partir de datos GPS en 1.5 +/- 0.3 mm/a y un potencial sísmico para disparar terremotos de magnitud cercana a M=7,0. La FAM es una falla con una longitud cercana a los 90 km, de orientación aproximada NE-SW y un desplazamiento oblicuo (componente inverso y de salto en dirección), que eleva las sierras miocenas





Fig. 4. Colocación de un sensor de temperatura en el Cerro del Cuevón (Picos de Europa), a 200 m de profundidad. Contrastar los gradientes geotérmicos verticales entre cavidades con diferente grado de actividad sísmica asociada, permite la construcción de modelos sobre los efectos de los terremotos en las condiciones térmicas ambientales del interior de las cuevas y de la composición gaseosa de la atmósfera en su interior.

situadas al NW del valle del Guadalentín. Es la falla responsable del terremoto de la ciudad de Lorca del 2011, con una magnitud  $M=5,2$  y una profundidad entre 3 y 4 km.

En esta falla aparece una de las cavidades más singulares que hay en el mundo, la Sima del Vapor, en concreto en el segmento Alhama de Murcia-Alcantarilla, el más oriental de la FAM con una longitud entre 16 y 20 km. La Sima del Vapor es una cavidad localizada en el cerro del Castillo en el municipio de Alhama de Murcia. Desde el punto de vista topográfico presenta como punto más destacable su desarrollo vertical a favor de un segmento de la FAM. Hasta ahora sólo se han explorado 82 m de desarrollo vertical debido a las condiciones ambientales adversas en el interior de dicha cavidad. El interior de la sima ha registrado una temperatura máxima de  $43^{\circ}\text{C}$ , con unas condiciones de humedad cercanas al 100%, con una concentración máxima de  $\text{CO}_2$  superior a 11.000 ppm (1,1%) y un valor mínimo de oxígeno de 17% en volumen. Todas estas condiciones ambientales la hacen una de las cavidades más peligrosas del mundo, que obligan a trabajar en su interior con equipos de respiración autónomos, lo que limita el tiempo de tra-

bajo en su interior, por el golpe de calor y las posibles consecuencias de deshidratación máxima.

Hemos estudiado la signatura isotópica del carbono ( $\text{d}^{13}\text{CO}_2$ ) en su interior, obteniendo valores que indican que el  $\text{CO}_2$  procede del manto terrestre. Lo más lógico es que sea la FAM la que facilite dicho transporte desde la parte profunda hacia la cavidad. Además, el metano de su interior se encuentra en permanente desequilibrio con el metano que aparece en el exterior de la cueva, a falta de estudios más sistemáticos. En cuanto a la temperatura, la cavidad no es lo suficientemente grande y con un desarrollo kilométrico como para que sea debida a la advección de un fluido caliente frente a una conducción térmica en la roca karstificada desde una anomalía térmica. Actualmente, estamos estudiando cual es el foco concreto de calor. Lo que es innegable es la existencia de una anomalía térmica que provoca que haya una temperatura que oscila entre  $37$  y  $43^{\circ}\text{C}$  a -82 m, sin un foco volcánico asociado.

En cuanto a la presencia de otros gases de interés, se han colocado medidores de radón que parecen indicar que los valores son superiores a  $10.000 \text{ Bq/m}^3$ , a falta de un registro más dilatado en el tiempo y a expensas de contar solo con una medida de 24h. El mayor problema al que nos enfrentamos es el de disponer de registradores que aguanten las condiciones ambientales de la Sima del Vapor y que no influyan en la medida final. Por otro lado, no se han constatado medidas significativas de  $\text{H}_2$  ni de  $\text{O}_3$ , dos gases que se han utilizado en las investigaciones sobre precursores sísmicos. Respecto a las variaciones en la concentración de dióxido de carbono en el interior de la sima, tampoco se ha podido disponer de una serie temporal completa debido a la saturación de los registradores, estando a la espera de instrumentos con mayor rango de detección (3%). Sin embargo, sí se dispone de una serie temporal completa del año 2015 en otra sima cercana, la Sima de Benis, de 350 m de profundidad y asociada al mismo contexto geodinámico.

La Sima de Benis se localiza en el Prebético externo, en la localidad de Cieza, y tiene dos partes bien diferenciadas. Una primera parte corresponde a una cueva hipogénica desarrollada

en los primeros 150 m de profundidad, donde intersecta a una falla normal de orientación N-S y buzamiento de  $75^{\circ}\text{E}$ . A partir de este punto la sima se desarrolla a favor de la zona de falla hasta alcanzar 350 metros de profundidad, que han sido explorados hasta la fecha por espeleólogos murcianos. Esta sima fue la precursora del estudio de SISMOSIMA mediante un proyecto previo de la convocatoria EXPLORA, el proyecto TERMOSIMA, el cual monitorizó la sima de Benis durante dos años. Los datos registrados son muy esperanzadores, mostrando incrementos de  $\text{CO}_2$  asociados a terremotos, en relación a la magnitud y a la distancia epicentral. Esta primera observación permite realizar modelos empíricos, aunque para terremotos que no son mayores de  $M=3,9$ . Esto es esencial porque necesitamos saber el comportamiento para terremotos grandes. Para ello, necesitamos estudiar fallas más rápidas, con el mismo potencial sísmico y con cuevas desarrolladas en diferentes segmentos. Además, deberíamos poder monitorizar con una frecuencia de muestreo similar a la resolución de localización espacio temporal de los terremotos cercanos, para poder establecer modelos reproducibles sobre la emisión de fluidos como precursor sísmico. Todas estas complicaciones por ahora limitan nuestras conclusiones. Además, con el fin de comprobar que las variaciones termo-gaseosas que estamos detectando son producidas por terremotos, también trabajamos en cuevas localizadas en zonas de baja actividad sísmica, con el suficiente desarrollo vertical para poder detectar el gradiente geotérmico vertical. Para ello, hemos monitorizado cuevas de más de 1000 m de profundidad, la sima CS-9 en Cantabria (-1200m) y el Cerro del Cuevón en Picos de Europa (-1580m).

Las cuevas pueden ayudarnos a encontrar respuesta a algunas preguntas ¿Es posible encontrar precursores sísmicos fiables? ¿Qué modelo siguen? La auscultación del corazón de una falla nos muestra el pulso de su actividad durante su periodo vital. Su estudio es un buen comienzo para intentar entender sus latidos, y la FAM es el mejor paciente que podemos encontrar en España en estos momentos. ●