

2 Seguimiento y caracterización físico-química de gases de efecto invernadero en ambientes subterráneos hipogénicos activos: caso de la Sima del Vapor (Alhama de Murcia)

Monitoring and characterisation of greenhouse gases in active-hypogenic subterranean environments: case of 'Sima del Vapor' (Alhama de Murcia)

Fernández-Cortés, A.^{1*}; Pérez-López, R.²; Cuezva, S.¹; Calaforra, J.M.¹; Cañaveras, J.C.⁴; Sánchez-Moral, S.³

¹ Departamento de Biología y Geología, Universidad de Almería, 04120 Almería. *acortes@ual.es

² Área de Peligrosidad y Riesgos Geológicos. IGME, Instituto Geológico y Minero de España, 28003 Madrid

³ Departamento de Geología, Museo Nacional de Ciencias Naturales (MNCN-CSIC), 28006 Madrid.

⁴ Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Universidad de Alicante, 03690 Alicante.

Resumen

Los mecanismos hidrogeoquímicos implicados en los procesos espeleogenéticos activos de carácter hipogénico son especialmente efectivos en las cavidades hidrotermales vinculadas a las fallas con actividad sísmica. Estas cavidades pueden albergar atmósferas subterráneas con una particular composición de gases endógenos. Por ejemplo, con dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄) relacionados con la actividad sismo-tectónica actual, o bien con signos residuales de la desgasificación de las aguas subterráneas enriquecidas con estos gases o con un origen de fuentes profundas geotermales. En este estudio abordamos algunos aspectos clave referentes a la generación, mezcla y procesos biogeoquímicos implicados en la dinámica de gases endógenos en un sistema kárstico hipogénico excepcionalmente activo (Sima del Vapor, Alhama de Murcia). Este estudio se basa en la monitorización de las condiciones micro-meteorológicas y de la composición gaseosa del aire subterráneo, combinado con un seguimiento de la geoquímica isotópica del dióxido de carbono y el metano (fracción molar y δ¹³C).

Abstract

The hydro-geochemical mechanisms involve on the active hypogene karstification are specially effective in caves associated with faulting and geothermal activity. These caves can potentially harbour subterranean atmospheres with distinctive composition of endogenous gases. For instance, carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) influenced by the current seismotectonic activity, or with residual gas coming from degassing of groundwater or deep-sourced geothermal gases. In this study, we provide key insight into the sourcing, mixing, and biogeochemical processes involved in the dynamic of deep endogenous gas formation in an exceptionally dynamic hypogenic karst system (Sima del Vapor, Alhama de Murcia). Monitoring of microclimate conditions and gas composition of underground air were used in combination with an isotopic tracking of carbon dioxide and methane (molar fractions and their δ¹³C values)

Palabras clave: dióxido de carbono, metano, gases endógenos, karstificación hipogénica, falla activa, isótopos estables.

Key words: carbon dioxide, methane, endogenous gases, hypogene karstification, active fault, stable isotopes.

INTRODUCCIÓN

El proceso de karstificación hipogénica se relaciona generalmente con el ascenso de fluidos de origen profundo enriquecidos en CO₂ o H₂S. La agresividad química del agua tiene un origen en el enfriamiento de estos fluidos en la zona de oxidación, no solo en los cuerpos de agua sino también en el aire debido a los procesos de condensación-corrosión. Las cavidades formadas bajo condiciones hipogénicas e influenciadas por procesos hidrogeoquímicos distintivos, como por ejemplo los vinculados a la actividad hidrotermal, la presencia de ácido sulfúrico, la mezcla de fluidos corrosivos o la disolución de evaporitas y la disolución en secuencias mixtas sulfato-carbonatadas (KLIMCHOUK *et al.*, 2014 y 2017; CHAVEZ & REEHLING, 2016), podrían potencialmente albergar atmósferas subterráneas con una particular composición gaseosa. Por ejemplo, la presencia de CO₂ y CH₄ de origen abiótico, es decir formados por reacciones químicas

que no implican directamente la presencia de materia orgánica. La composición gaseosa actual de la atmósfera de una cavidad hipogénica puede ser el resultado de un proceso de mezcla de gases con diferentes orígenes, bien derivados de la actividad espeleogenética actual, o bien ser el resultado residual de la desgasificación de las aguas subterráneas enriquecidas con estos gases o con un origen vinculado a fuentes geotermales profundas.

La Sima del Vapor (Alhama de Murcia) representa un sistema hipogénico de carácter excepcional con una notable presencia de gases de origen geogénico, hidrotermalismo y condiciones hipóxicas, que se relacionan con el ascenso y afloramiento en superficie de fluidos endógenos procedentes de una zona de falla activa. Este estudio ejemplariza el comportamiento de estos gases endógenos (CO₂ y CH₄) en la zona vadosa superior del karst en zonas con fallas activas, basándose en el seguimiento geoquímico e isotópico de ambos gases. La señal isotópica del carbono (δ¹³C) de ambos gases presentes en esta cueva hipogénica son utilizados para investigar los procesos de origen y bio-geoquímicos implicados en la liberación, almacenaje y consumo de estos gases geogénicos en la zona vadosa superior y su potencial interacción con la atmósfera inferior.

CONTEXTO GEOLÓGICO Y DESCRIPCIÓN DE LA SIMA DEL VAPOR

La Sima del Vapor se localiza en el municipio de Alhama de Murcia, en la Región de Murcia, en la vertiente sur del Cerro del Castillo. Este cerro forma parte de la Sierra de la Muela y está directamente relacionado con la falla de Alhama de Murcia (FAM), concretamente con el segmento de falla comprendido entre las localidades de Totana y de Alcantarilla (Fig. 1). La falla de Alhama de Murcia, constituye una de las fallas tectónicamente más activa de la Península Ibérica, siendo la responsable del terremoto

Figura 1. Localización y modelo digital del terreno del entorno de la Sima del Vapor en relación con la Falla de Alhama de Murcia (FAM) (extraído de MARTÍNEZ-DÍAZ *et al.*, 2012). Sección vertical de la Sima del Vapor con indicación de los puntos de extracción de muestras de aire (ver texto).

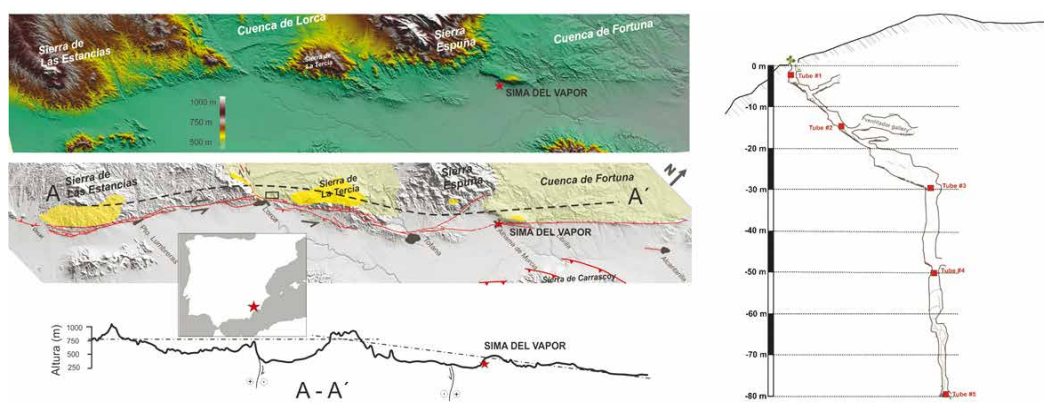


Figure 1. Location and digital terrain model of the study area in relation to the Alhama de Murcia Fault (FAM). Vertical profile of 'Sima del Vapor' with sampling points (see text).

de Lorca del año 2011 de magnitud 5,1, causando muchos efectos geológicos como la caída de rocas y aparición de grietas en el terreno y afectando a un área cercana a los 1000 km³ alrededor del epicentro (PÉREZ-LÓPEZ *et al.*, 2011). La Sima del Vapor se desarrolla en conglomerados del Mioceno (Tortonense) con clastos redondeados de rocas carbonatadas y metamórficas (PÉREZ-LÓPEZ *et al.*, 2016).

La parte más profunda de la Sima del Vapor que se ha explorado hasta la fecha (-84 m, aproximadamente) está relacionada topográficamente con los Baños de Alhama, cuyas aguas han sido utilizadas durante varios períodos históricos (Romanos, Edad Media, y Edad Moderna). El agua subterránea que abastece a los Baños de Alhama tiene una temperatura de 41°C, un pH de 6,8, y una concentración de Cl⁻ y HCO₃⁻ propia de aguas carbonatadas. La señal isotópica del dióxido de carbono disuelto en el agua varía entre $-8 < \delta^{13}C_{CO_2} \text{‰} < -4$, indicando la influencia de la degradación térmica de carbonatos (CERÓN *et al.*, 1998).

La entrada de la cueva de Sima del Vapor tiene forma ovalada y sus ejes miden 0,6 x 0,75 m. Es una cueva hipogénica dividida en dos secciones bien definidas; una galería subvertical y un pozo vertical, con una profundidad total explorada de -84 m (Fig. 1). La primera galería es un conducto subhorizontal con sección ovalada, de 50 m de longitud y pequeños conductos de salida cegados en el techo de la galería. Esta

parte de la sima se corresponde con una galería maestra de carácter hipogénico que alcanza una profundidad de -30 m, a favor de una fractura próxima a la superficie y perpendicular a la dirección de la FAM (Fig. 1). La parte superior de esta galería muestra las características morfogénicas típicas de un conducto de salida (outlet), con algunas cúpulas y canales verticales que se elevan desde el techo, uno de estos conductos conectó con el exterior configurando la única y estrecha entrada a la sima localizada en una cota superior. La galería maestra subvertical está conectada a un canal de alimentación vertical (feeder) de 50 m de desarrollo, que alcanza -84 m de profundidad y está directamente asociado al plano de la FAM (dirección NE-SO).

MATERIAL Y MÉTODOS

En este estudio se ha llevado una monitorización ambiental específica de la Sima del Vapor, en conjunción con un programa de muestreo y análisis de la composición gaseosa del aire subterráneo, con el objetivo de obtener la información más relevante del sistema atmósfera-suelo-cavidad en referencia a parámetros como la temperatura, fracciones molares de los principales gases; CO₂ y CH₄ y sus respectivos valores isotópicos; $\delta^{13}C_{CO_2}$ y $\delta^{13}C_{CH_4}$.

Para facilitar los muestreos de aire desde el exterior de la Sima del Vapor, es decir sin necesidad de entrar a su interior, se



Figura 2. Proceso de instalación de un sistema de muestreo multicanal de aire en la Sima del Vapor tuberías flexibles de PCV, realizado por el Grupo Especial de Rescate en Altura (GERA) perteneciente al Cuerpo de Bomberos de la Comunidad de Madrid.

Figure 2. Installation of a multichannel system to collect air samples into 'Sima del Vapor' based on flexible PVC tubes, conducted by the Mountain Rescue Team (GERA) of the Firefighter's Service of Madrid Autonomous Region.

instaló un sistema de tuberías flexibles de PCV desde la boca de acceso. Este sistema multicanal permite la obtención de muestras de aire en una red de puntos predefinidos, espacialmente distribuidos a diferentes profundidades: -2, -15, -30, -50 y -80 m. Esta instalación estará en funcionamiento durante la duración del proyecto en el que se enmarca este estudio y será de carácter reversible gracias a su fácil montaje/desmontaje. La instalación de este sistema de muestreo multicanal fue realizada por el Grupo Especial de Rescate en Altura (GERA) perteneciente al Cuerpo de Bomberos de la Comunidad de Madrid (Fig. 2).

El muestreo de aire subterráneo se realizó desde el exterior de la sima (en la boca de entrada) utilizando instrumental específico consistente en bombas de vacío y/o microbombas de diafragma con un caudal a presión atmosférica de $3,1 \text{ l m}^{-1}$, que succionan el aire de cada uno de los tubos flexibles de PVC y lo hace pasar por un filtro desecante hasta un sistema de almacenaje hermético de aire (bolsas Tedlar), exclusivo para muestreo de gases de efecto invernadero

y otros gases traza (Fig. 3). En cada campaña se recolectaron muestras de aire de control en el exterior (atmósfera exterior) y en el suelo externo en el entorno de la entrada a la sima, utilizando microbombas de diafragma y bolsas Tedlar. Para el muestreo del aire edáfico se seleccionaron varios puntos en el área de recarga hídrica directa a la cavidad con una potencia de suelo representativa del entorno. En estos puntos se utilizó para cada muestreo un tubo de pequeño diámetro (1 cm), insertado a 40 o 50 cm de profundidad.

El análisis en laboratorio de la concentración de CO_2 y CH_4 y la determinación de la señal isotópica $\delta^{13}\text{C}$ de ambos gases en las muestras discretas de aire se llevó a cabo mediante un espectrómetro de alta resolución (Picarro G2201-i). Este analizador está basado en la tecnología Wavelength-Scanned Cavity Ring Down Spectroscopy (WS-CRDS) y está equipado con un láser en el infrarrojo cercano que analiza el espectro de absorción de las moléculas de CO_2 y CH_4 . Con este equipo se aseguran mediciones precisas, en tan solo 10 minutos por muestra, con los siguientes valores de precisión después de

Figura 3. Panorámica de la boca de acceso a la Sima del Vapor y detalle del instrumental de muestreo de aire desde el exterior (ver texto).

Figure 3. Panoramic view of the access to "Sima del Vapor" and detail with the instrumentation for air sampling from the cave entrance (see text)



5 minutos de medición: 200 ppb ($^{12}\text{CO}_2$) y 10 ppb ($^{13}\text{CO}_2$), con una precisión de hasta 0,2‰ en $\delta^{13}\text{C}$ y 5 ppb ($^{12}\text{CH}_4$) y 1ppb ($^{13}\text{CH}_4$), con una precisión de hasta 0,6‰ en $\delta^{13}\text{C}$.

RESULTADOS PRELIMINARES

La Sima del Vapor presenta en la actualidad una espeleogénesis hipogénica activa por el ascenso de fluidos hidrotermales, con aire a una temperatura media en torno a 35°C en las zonas más profundas y una humedad relativa del 100%. La atmósfera subterránea de la Sima del Vapor presenta valores extremos de otros gases como el CO_2 (mayor a 1%) y condiciones hipóxicas (18-19% de O_2). Se ha descrito un gradiente térmico vertical de 3,2°C / 100m asociado a los frecuentes microsismos combinados con la actividad hidrotermal (PÉREZ-LÓPEZ *et al.*, 2016). Este gradiente térmico actual es capaz de mantener un proceso convección libre y ascenso de gases endógenos, en particular vapor de agua (H_2O (V)) y CO_2 desgasificado a partir de las aguas termales de origen profundo enriquecidas en este gas.

Todas las muestras de aire subterráneo presentan unas concentraciones CO_2 mayores y valores de $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ más pesados respecto a las muestras del exterior y del aire del suelo. La concentración en CO_2 del aire subterráneo presenta una tendencia general a incrementar con la profundidad. Esta pauta general se rompe a una profundidad de -15 m debido a la existencia de una entrada

de aire exterior a través de la galería del Ventilador (Fig. 4), que causa un descenso en la concentración de CO_2 y un incremento en la concentración de CH_4 . El efecto de la entrada de aire llega a ser más intenso en las estaciones más frías y tiene un reflejo muy nítido y significativo en los perfiles en profundidad de la temperatura y en los niveles de oxígeno del aire subterráneo. La concentración media anual de CH_4 en el aire subterráneo es menor que en el aire del suelo y que en la atmósfera exterior, solo en el muestreo realizado en Marzo de 2016 se detectó que las concentraciones de CH_4 estaban por encima del fondo atmosférico (oscilando entre 2,3-3,4 ppm).

El perfil de la temperatura del aire subterráneo indica la existencia de tres partes diferentes dentro de la sima: una zona poco profunda (hasta -15 m) controlada por la entrada de aire exterior; una zona media heterotérmica entre -15 y -50 m, con un notable incremento de 5°C en la temperatura a -35 m y, por último, una zona termal profunda, con un incremento progresivo de la temperatura controlado por el gradiente geotérmico local.

DISCUSIÓN

Un análisis pormenorizado mediante diagramas Keeling de la señal isotópica del carbono en relación a la concentración de ambos gases, CO_2 y CH_4 (Figs. 5 y 6), ha permitido identificar y evaluar procesos como el consumo, acumulación y movilización (ej.

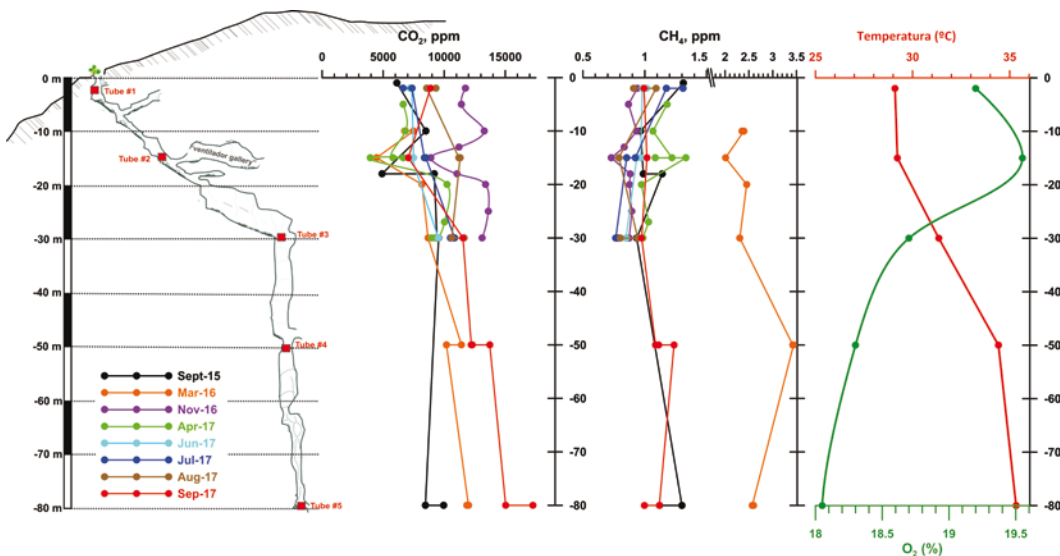


Figura 4. Evolución espacio-temporal de la temperatura y composición gaseosa del aire (CO_2 , CH_4 y O_2 contenidos) en el perfil vertical de la Sima del Vapor.

Figure 4. Spatiotemporal evolution of temperature and gaseous composition of cave air (CO_2 , CH_4 and O_2 contents) along a vertical profile of 'Sima del Vapor'.

oxidación bacteriana del CH_4 o la difusión de CO_2 , bien procedente del suelo o bien con un origen endógeno), así como la mezcla de gases (o residuos de gases) con distintos orígenes identificables.

La desgasificación del agua subterránea enriquecida en CO_2 y el propio CO_2 de origen profundo determinan la gran abundancia de este gas en el aire de la Sima del Vapor (>1%), con una composición isotópica del carbono ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$) que oscila entre -4,5 y -7,5‰. La Figura 5 representa el diagrama Keeling del CO_2 considerando dos fuentes principales de este gas; una de origen edáfico (CO_2 derivado del suelo) y otra de gas endógeno procedente de una fuente profunda. La función Keeling de color rojo representa el proceso de mezcla entre la atmósfera externa (fondo atmosférico local) y la fuente de CO_2 endógeno de origen profundo. El CO_2 del aire subterráneo procede en más de un 30% de la fuente endógena de este gas. La sima actúa como un emisor neto CO_2 a la atmósfera local, de modo que el aire exhalado al exterior representa entre el 1 y el 3% del CO_2 endógeno generado por la fuente origen profundo de este gas.

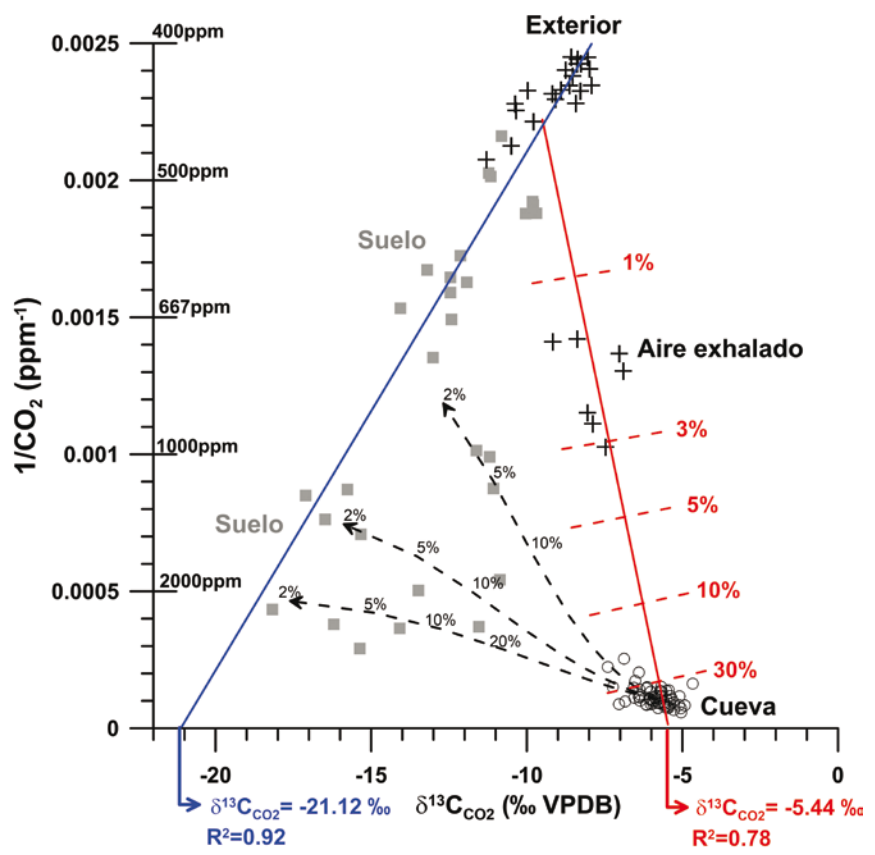
La función Keeling de color azul mostrada en la Figura 5 representa el proceso de mezcla de CO_2 que acontece en el aire del suelo externo entre la atmósfera local y la

fuente edáfica de este gas. La respiración microbiana en el suelo no es el único proceso responsable del CO_2 hallado en el suelo externo de la Sima del Vapor. De hecho, se aprecian numerosas muestras de aire edáfico que se sitúan de forma dispersa bajo esta línea óptima de mezcla y que, por lo tanto, representa mezclas de CO_2 entre el aire exterior y una combinación de otras fuentes. En concreto, se aprecia que el flujo ascendente de CO_2 endógeno también provoca una intensa difusión de CO_2 desde el aire de la sima hacia las capas de suelo externo, de forma preferencial a través de las grietas y pequeñas fisuras del epikarst y de los horizontes más profundos del suelo. Las flechas curvas y discontinuas de la Figura 5 muestran la trayectoria del fraccionamiento cinético del CO_2 endógeno debido a su difusión ascendente desde el aire subterráneo hacia el suelo, principalmente a través de las grietas y pequeñas fisuras presenten en el epikarst.

Las variaciones de $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ en función de las concentraciones de metano en el aire de la Sima del Vapor se ilustran en la Figura 6, en comparación con la composición estándar de la atmósfera local (CH_4 : 2,02 ppm y $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$: 50,17‰). La evolución predominante de este gas de origen endógeno en la sima se ajusta a un proceso de intensa oxidación por acción bacteriana (MOB) y, como

Figura 5. Diagrama Keeling del CO₂ en la Sima del Vapor considerando dos fuentes principales de este gas; una de origen edáfico (CO₂ derivado del suelo) y otra de gas endógeno procedente de una fuente profunda. (Ver texto para la explicación de los procesos de mezcla y difusión gaseosa modelizados)

Figure 5. Keeling plot of CO₂ for 'Sima del Vapor' representing a two-component mixture of average atmospheric air with an additional source of CO₂, either the pure component from the soil or from deep endogenous air (see text for further discussion about the mixing and diffusion processes modelled in this plot).



consecuencia, se registran concentraciones sub-atmosféricas de CH₄ en todo el perfil de la sima. Las curvas descendentes de la Figura 6 representan el consumo de CH₄ por actividad metanotrófica mediante funciones de destilación Rayleigh utilizando varios factores de fraccionamiento cinéticos (F). En cada una de estas curvas de destilación se muestran las isolíneas con el porcentaje de CH₄ endógeno profundo que resta en el aire de la sima después de su consumo por MOB. Según esta modelización, en el aire de la sima se detecta de forma general un 40% del CH₄ endógeno original, es decir más del 60% de este CH₄ endógeno ha experimentado una oxidación bacteriana. La presencia de pares de datos desviados que divergen de las curvas del modelo de destilación (consumo por MOB) en la Figura 6, es indicativa de la posible influencia simultánea de otros procesos postgenéticos, tales como el fraccionamiento isotópico por difusión, o la división molecular por advección, que acontecen mientras el flujo

de gases endógenos asciende a lo largo del perfil de la sima.

Hay que constatar como hecho destacable que puntualmente se han alcanzado concentraciones de CH₄ de origen endógeno más elevadas que el fondo atmosférico (entre 2,3 y 3,4 ppm), con valores de δ¹³C_{CH₄} ligeramente inferiores a los registrados en aire externo. Estas concentraciones anómalas de CH₄ endógeno profundo demuestran una migración más intensa de fluidos endógenos a través de la zona vadosa superior, lo cual puede estar vinculado al incremento de la actividad sísmica en la zona.

CONCLUSIONES

La composición gaseosa de la atmosfera subterránea de la Sima del Vapor está controlada principalmente por el flujo ascendente de gases de origen endógeno, procedentes de la zona geodinámica relacionada con la falla activa de Alhama de

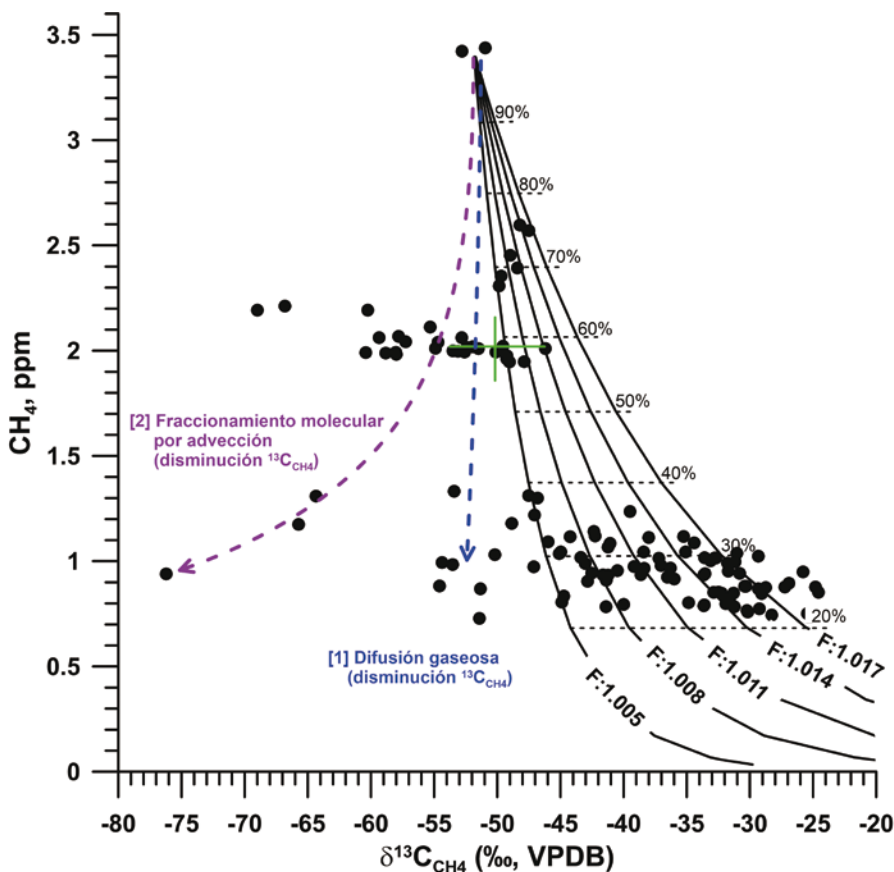


Figura 6. Diagrama de variación de $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ en función de las concentraciones de metano en el aire de la Sima del Vapor en comparación con la composición estándar de la atmósfera local (cruz verde), incluyendo la modelización del proceso predominante de oxidación por acción bacteriana y otros posibles procesos postgenéticos (ver texto).

Figure 6. Diagram with relationship between CH_4 and $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ in underground air of 'Sima del Vapor'. The standard composition of the local background atmosphere is indicated by the green crosshairs. Curves show the prevailing methanotrophic oxidation by bacteria and other likely post-genetic processes (see text for further discussion).

Murcia con frecuentes micro-seísmos.

La desgasificación del agua subterránea enriquecida en CO_2 y el propio CO_2 geotermal de origen profundo determinan la gran abundancia de este gas en el aire de la Sima del Vapor (>1%), que representa más de un 30% de la fuente endógena de este gas. El flujo ascendente de CO_2 endógeno también provoca una intensa difusión de CO_2 desde el aire de la sima hacia las capas de suelo externo, lo cual ejemplifica el proceso de liberación potencial de CO_2 en terrenos kársticos situados en zonas con actividad sísmica.

El CH_4 de origen endógeno experimenta una intensa oxidación por acción bacteriana (MOB) durante su flujo ascendente a través de la zona vadosa donde se localiza la Sima del Vapor y, como consecuencia, se registran concentraciones sub-atmosféricas de CH_4 en todo el perfil de la sima. No obstante, se han alcanzado puntualmente concentraciones de CH_4 de origen endógeno más elevadas

que el fondo atmosférico, lo cual indica que la Sima del Vapor puede actuar de forma ocasional como un punto de emisión de CH_4 endógeno hacia la atmósfera exterior.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio forma parte de los proyectos del Ministerio de Economía y Competitividad: GEIs-SUB (CGL2016-78318-C2-1R y CGL2016-78318-C2-2R AEI/FEDER/UE) y 3GEO (CGL2017-83931-C3-2-P). Agradecemos la facilidades y apoyo por parte del Ayuntamiento de Alhama de Murcia para el desarrollo de estos proyectos y al Grupo Especial de Rescate en Altura (GERA) del Servicio de Bombero de la Comunidad Autónoma de Madrid por su labor esencial en la instalación del sistema de tubos para tomas las muestras de aire y su asistencia técnica durante el estudio de campo.

BIBLIOGRAFÍA

CERÓN, J. C., PULIDO-BOSCH, A., & SANZ DE GALDEANO. C. (1998) Isotopic identification of CO₂ from a deep origin in thermomineral waters of southeastern Spain. *Chemical Geology* 149: 251-258.

CHAVEZ, T., & REEHLING, P. (Eds.) (2016). *Proceedings of DeepKarst 2016: Origins, Resources, and Management of Hypogene Karst*, NCKRI Symposium 6. Carlsbad, New Mexico: National Cave and Karst Research Institute, April 11-14.

KLIMCHOUK, A., PALMER, A. N., DE WAELE, J., AULER, A. S. & AUDRA P. (Eds) (2017). *Hypogene karst regions and caves on the world. Series: Cave and Karst Systems of the World*. Springer. Switzerland, 911 p.

KLIMCHOUK, A., SASOWSKY, I., MYLROIE, J., ENGEL, S.A. & ENGEL A. S.A (Eds.) (2014). *Hypogene Cave Morphologies. Karst Waters Institute Special Publication 18*, Karst Waters Institute, Leesburg, Virginia. 111 p.

MARTÍNEZ-DÍAZ, J.J., MASANA, E., & ORTUÑO, M. (2012). Active tectonics of the Alhama de Murcia fault, Betic Cordillera, Spain. *Journal of Iberia Geology*, 38, (1): 253-270.

PÉREZ-LÓPEZ, R., GINER-ROBLES, J. L., RODRÍGUEZ-PASCUA, M. A., MARTÍN-GONZALEZ, F., GARCÍA-MAYORDOMO, J., ÁLVAREZ-GÓMEZ, J. A., MARTÍNEZ-PECES, M., INSUA-ÁLVAREZ, J. M., MARTÍNEZ-DÍAZ J. J., & SILVA, P.G. (2011). Seismic wave anisotropy caused by the m 5.1 Lorca earthquake (11-5-2011, SE of Spain): testing archaeoseismological techniques with instrumental seismic data. In: Grützner, Fernández Steeger, Papanikolaou, Reicherter, Silva, Pérez-López, and Vött (eds). *International Workshop on Active Tectonics, Earthquake Geology, Archaeology and Engineering*:190-193.

PÉREZ-LÓPEZ, R., SÁNCHEZ-MORAL, S., CUEZVA, S., MARTÍNEZ-DÍAZ, J.J., QUILES, L., BAÑÓN E. & MARCOS-NUEZ, A. (2016). Relationship between the Vapor Cave and the Alhama de Murcia Fault: environmental conditions into de cave versus recent tectonic activity. *Geo-Temas*, 16, (1): 363-366.