

Influencia antrópica vs. natural en el origen del riesgo kárstico del entorno de la ciudad de Zaragoza

Anthropogenic influence vs. natural events in the origin of karstic processes in the Zaragoza city area

Óscar Pueyo Anchuela¹, Javier Ramajo Cordero¹, Antonio M. Casas Sainz¹, Pedro López Julián¹, Javier Gracia Abadías¹, Héctor Gil Garbí¹, Carlos Revuelto Gimeno², Juan Ignacio Bartolomé Lafuente² y Andrés Pocovi Juan¹

¹ Grupo de Investigación Geotransfer y Departamento de Ciencias de la Tierra. Universidad de Zaragoza. c/ Pedro Cerbuna, nº 12, CP.50.009 (Zaragoza). opueyo@gmail.com; javierramajo@gmail.com; acasas@unizar.es; pllopez@unizar.es; grabaja@hotmail.com; hecgilgarbi@gmail.com; apocovi@unizar.es

² Geoscan S.L.P. C/ Ajedrea nº 20 nave E-24. Parque Empresarial Magnus-Polígono Empresarium. C.P. 50720. crevuelto@geoscan.es; jibartolome@geoscan.es

ABSTRACT

The logic correlation between the increase of water availability and the increase of karst solution can be generalized at contexts where the soluble materials are located below the water level. Alluvial saturated thickness upwards of Zaragoza city, where wide areas are submitted to a mantled karstic evaporitic process, is evaluated in order to decipher if irrigation, pipe or channel leaks can increase karstic processes. Evaluated data permits to identify that not ordinary supplies, can favor surficial settlement processes at previous subsidence areas, but not to increase the karstic solution process. The general subsaturated Ebro water level is explained in this model by the presence of a hydrogeological barrier that confines the substratum aquifer excluding in many cases, and at a complex hydrogeological context, the water entry at the evaporitic substratum and precluding their influence to solution processes.

Key-words: Mantled karst, subsidence, hydrogeology, sinkhole, evaporite karst.

RESUMEN

La correlación lógica entre el incremento de la disponibilidad hídrica y el incremento de los procesos kársticos se generaliza al punto de aplicarse en contextos donde los materiales solubles se encuentran siempre localizados bajo el nivel freático. El análisis del espesor saturado en el entorno de aguas arriba de la ciudad de Zaragoza, donde existe un amplio desarrollo de estructuras de karst aluvial evaporítico, se evalúa para determinar si el regadío, las pérdidas de agua de conducciones o acequias pueden incrementar los procesos kársticos. Los datos evaluados permiten identificar que estos aportes extraordinarios pueden favorecer los procesos de consolidación superficial en contextos con actividad de subsidencia previa pero no incrementar el proceso de karstificación. La subsaturación general de las aguas del Ebro se explica en este modelo a través del aislamiento del substrato de la entrada de aguas del acuífero del Ebro, que con una dinámica compleja, puede presentar condiciones de confinamiento.

Palabras clave: Karst aluvial, subsidencia, hidrogeología, dolinas, karst evaporítico.

Geogaceta, 61 (2017), 15-18
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Recepción: 15 de julio de 2016
Revisión: 3 de noviembre de 2016
Aceptación: 25 de noviembre 2016

Introduction

El enunciado de dos premisas que definen una conclusión (silogismo) o la aplicación de un razonamiento inductivo están ampliamente desarrollados en el discurso y cultura general, pero en muchas ocasiones, puede presentar un juicio parcial que dista del razonamiento científico. La búsqueda de relaciones simples, directas y sencillas supone un reduccionismo que lleva a conclusiones que difícilmente son sostenibles en un debate técnico al efecto.

La valoración de que las evaporitas son solubles, que un incremento de la disponibilidad hídrica aumenta la capacidad de disolución, y que en este caso, la rotura de una tubería o el

regadío, genera un incremento del aporte hídrico y que por tanto aumenta la generación de los procesos kársticos y por ende de las dolinas, no deja de ser una generalización que difícilmente puede falsarse con los argumentos utilizados. Sin embargo, el problema no suele ser tan sencillo o las conclusiones tan fáciles de alcanzar. En este sentido, la identificación de procesos de asentamiento o consolidación superficial en sectores con actividad kárstica previa y la afección a estructuras antrópicas (conducciones) lleva a la conclusión de que la rotura de una tubería genera dolinas, siendo igualmente admisible, que la actividad de las dolinas rompe tuberías.

En ambos casos la evidencia es la misma, allí donde hay un problema superficial se pro-

duce la rotura de una infraestructura hídrica, y entonces podría parecer que dicho evento es el origen del problema. La evaluación del origen del agua, el estado de humedad y del nivel freático (o niveles) en el subsuelo, o la unidad responsable de la reducción de volumen origen de la subsidencia, son siempre aspectos a tener en consideración. En aquel sector en el que se produce la mayor tasa de subsidencia superficial y que coincide con la rotura del elemento rígido, puede permitir argumentar la rotura como origen, pero también como consecuencia. Ambas consideraciones pueden ser ciertas, dependiendo del contexto y pueden ser motivo de discusiones circulares sobre la causa y la consecuencia.



Fig. 1.- A) Cartografía de unidades evaporíticas de España con la localización de la zona de estudio (modificado de Ayala Carcedo *et al.*, 1986). B) Zanja realizada para la reparación de la tubería de suministro de agua al barrio de Casetas (Zaragoza). C) Fotografía de una zona con subsidencia continuada en el tiempo en el que se decidió trasladar la conducción a superficie. D) Detalle de la misma zona donde se identifica la tubería en posición superficial. Ver figura en color en la web.

Fig. 1.- A) Evaporitic rocks from Spain with the location of the studied area (modified from Ayala Carcedo *et al.*, 1986). B) Repair trench for water supply to Casetas neighborhood from Zaragoza where different pavements can be identified. C) Subsidence evidences where the water supply pipe has been modified to be at surficial conditions for surveillance. D) Detail from the same pipe where it begins to run over the surface. See color figure in the web.

En este trabajo abordamos esta evaluación dentro de un contexto conocido, en el que se pueden definir las características hidrogeológicas, geológicas y las evidencias superficiales de los procesos kársticos existentes. El objetivo final, más allá de obtener una generalización universal positiva que explique todas las evidencias superficiales de subsidencia, es mostrar la complejidad de establecer generalizaciones y determinar qué aspectos deben evaluarse en el momento de considerar los factores condicionantes para el proceso identificado.

Contexto geológico del sector central de la Cuenca del Ebro.

El sector central de la Cuenca del Ebro representa el depocentro de la cuenca cenozoica de antepaís del Pirineo, la Cordillera Ibérica y las Costero Catalanas. Los depósitos principales son el resultado de la sedimentación de un lago endorreico en el que se depositaron evaporitas. La ciudad de Zaragoza se encuentra en las proximidades de dicho centro y donde los depósitos aluviales del río Ebro y sus afluentes tapizan los

materiales solubles. Esta distribución es la responsable de que los materiales solubles se encuentren a profundidades variables desde escasos metros a decenas de metros bajo los niveles de llanura de inundación y las terrazas fluviales.

La evaluación del origen de la rotura recurrente de tuberías ya fue objeto de atención por parte del Ayuntamiento de Zaragoza, en el caso del suministro de agua al barrio de Casetas que atraviesa una zona con alta densidad de dolinas y que dejaba habitualmente al barrio sin servicio (Gracia *et al.*, 1991). En algunos casos, las roturas siguen produciéndose en el mismo punto de modo que cuando se realizan las reparaciones pueden identificarse registros acumulados de subsidencia como es la presencia de varios niveles de acera o de engrosamientos de los niveles asfálticos (Fig. 1B). En algunos contextos, la decisión última ha sido la localización de la tubería en superficie para que, ante la eventual rotura, esta pueda ser identificada rápidamente (Fig. 1 C y D).

La distribución de estructuras kársticas en el entorno de Zaragoza se desarrolla especialmente en las terrazas bajas (Fig. 2A y B), aun-

que existen también evidencias paleokársticas muy desarrolladas en terrazas más altas y asociadas tanto al Ebro como a sus afluentes (Jalón, Huerva y Gállego). Por otro lado, los procesos de subsidencia kárstica generalizada conllevan a la identificación de sectores en los que el depósito del Cuaternario muestra espesores anómalos y depresiones del techo de las unidades evaporíticas no explicables mediante procesos de erosión o incisión fluvial (Benito *et al.*, 1998; Pueyo *et al.*, 2013 y referencias en ellos incluidas).

La serie estratigráfica general de los sondeos del área de estudio muestra un substrato mioceno con alta proporción de facies evaporíticas (solubles) compuesta por una alternancia de niveles de margas, yesos y otras fases más solubles como halita y glauberita (Salvany, 2009). Sobre esta unidad, la serie cuaternaria se compone de depósitos de suelos, niveles de terraza, depósitos de vertiente y llanura de inundación. Es decir, una unidad soluble profunda y un aluvial superior no soluble que preconfigura un dispositivo de karst aluvial o karst cubierto.

El sector en el que se realiza este análisis no contempla la presencia, que pueden darse en otros contextos, de materiales solubles o dispersables en los depósitos cuaternarios que son habituales en los depósitos de vertiente y en los abanicos aluviales.

La zona seleccionada para este estudio se localiza en el área comprendida entre la desembocadura de los ríos Huerva o Gállego y el río Jalón, e incluye la llanura de inundación y los niveles de terraza bajos del Ebro donde se identifica la mayor densidad de formas kársticas en superficie (fig. 2B). En los niveles más modernos, especialmente la terraza inferior, la identificación de dolinas es menor debido a su carácter más reciente y la mayor influencia de la dinámica fluvial. La topografía en la zona muestra un descenso escalonado hacia el NE, asociado a los distintos escarpes topográficos de terraza y muestra un ascenso neto en las proximidades del escarpe del Ebro (borde NE del aluvial del Ebro donde afloran los depósitos del cenozoico evaporítico). El nivel freático asociado al río Ebro muestra un descenso progresivo hacia el río en dirección N-S, pero también en sentido aguas abajo, hacia el E. El límite N del acuífero viene representado por el afloramiento de las unidades evaporíticas y la desaparición de los materiales fluviales.

Resultados

En el contexto descrito se pretende evaluar hasta qué punto la entrada de aguas al subsuelo

asociadas a la actividad antrópica puede producir un incremento de la disolución de materiales del substrato evaporítico. En la zona de estudio existe un amplio desarrollo de indicadores kársticos con frecuente aparición de problemas afectando a construcciones, viales e infraestructuras y localizado en un entorno histórico de irrigación (intervalo entre el Canal Imperial de Aragón y el cauce actual del río Ebro).

La evaluación de los modelos de variación de espesores del aluvial (ver Pueyo *et al.*, 2013) permitía identificar la presencia de incrementos del espesor del aluvial en contextos fuera del cauce actual del río Ebro. Estos incrementos de espesor se interpretan como evidencias de subsidencia contemporánea con la sedimentación de las terrazas. Por otro lado, la topografía del substrato permitía identificar zonas deprimidas localizadas por debajo del nivel de incisión fluvial actual del río Ebro, y depresiones topográficas cerradas aguas-arriba de la ciudad de Zaragoza.

Estos datos permiten realizar algunas consideraciones sobre la relación entre el espesor del aluvial, la posición del nivel freático y la unidad evaporítica cenozoica. Por un lado, el nivel freático se localiza por encima del contacto con el substrato evaporítico en la mayor parte de la zona de estudio, y por otro lado los mayores espesores saturados se encuentran a lo largo del corredor de orientación NW-SE donde se encuentra la mayor concentración de indicadores kársticos superficiales (Fig. 2C). Por otro lado, el aluvial no saturado es mínimo en el entorno septentrional del cauce y en la vertical del propio río Ebro actual.

A partir de estos modelos se ha realizado una serie de cortes perpendiculares al río que muestran la relación entre la topografía, el nivel freático, y el contacto con el substrato inferior (Fig. 3). En estos cortes puede identificarse la presencia de un aluvial amplio en el que el nivel freático se localiza siempre sobre el substrato evaporítico.

Discusión y conclusiones

La incorporación de observaciones puntuales en sondeos de la zona permitir evaluar el comportamiento hidrogeológico y establecer consideraciones sobre el riesgo kárstico en la zona. La serie geológica detallada muestra un substrato evaporítico, una unidad de transición y un aluvial donde pueden identificarse niveles de gravas, arenas y arcillas. Estos datos muestran la potencial presencia de más de un nivel freático en la serie vertical que puede incluir niveles colgados dentro del aluvial que varían sensiblemente ante las precipitaciones y los

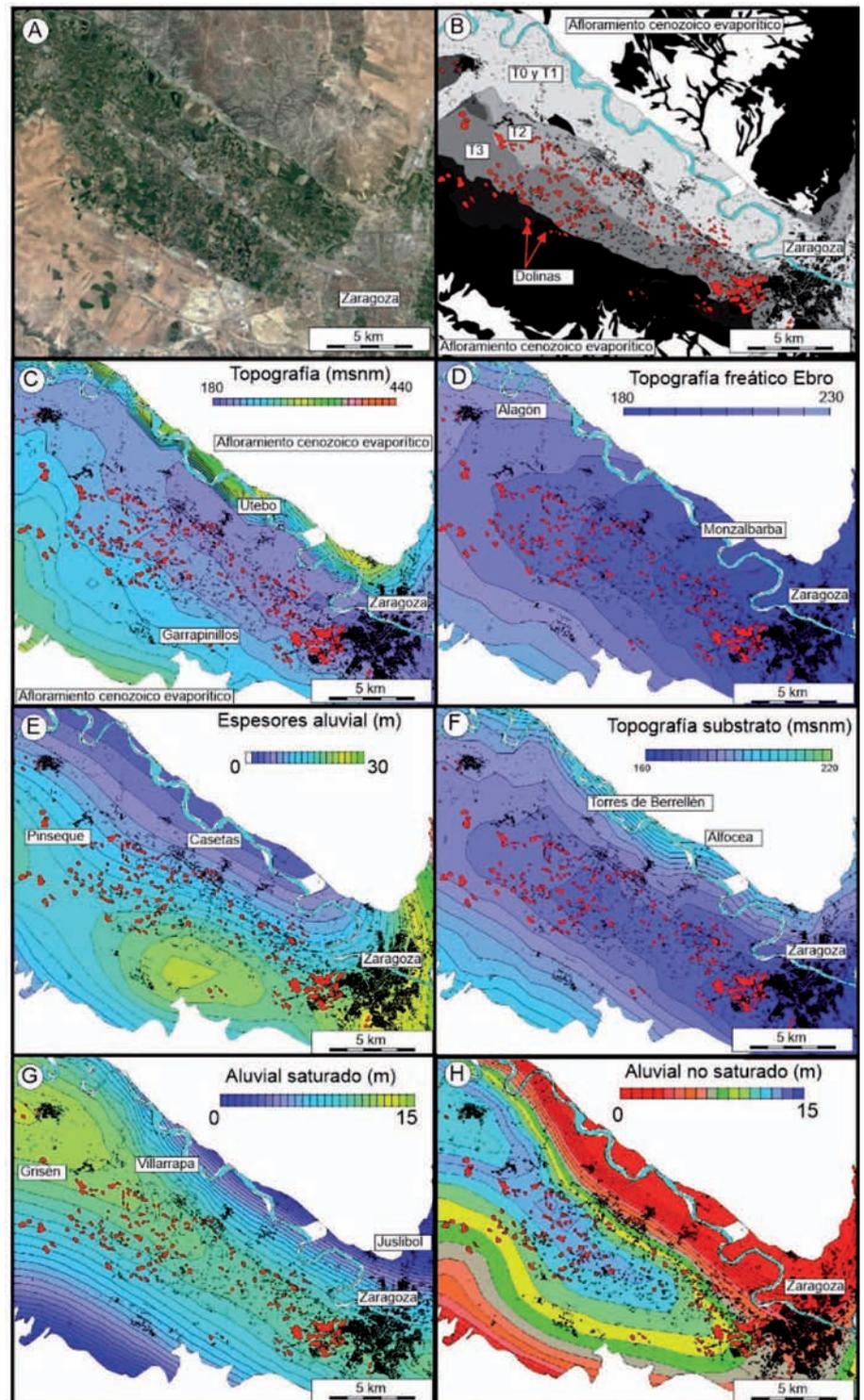


Fig. 2.- A) Fotografía aérea de la zona de estudio, B) Cartografía geológica de la zona analizada en la que se incluyen los niveles geomorfológicos de terraza y la localización de dolinas (modificado de Esnaola y Gil, 1998 y Gil Marín *et al.*, 1995), C) Topografía de la zona de estudio con la localización de dolinas, D) modelo general de posición de la superficie freática del acuífero aluvial a lo largo de la zona analizada, E) mapa de correlación de espesores y F) topografía del techo del substrato cenozoico de la zona de estudio (modificados de Pueyo *et al.*, 2013), G) y H) Cálculos realizados sobre el espesor de aluvial saturado y no saturado en la zona de estudio. Ver figura en color en la web.

Fig. 2.- A) Aerial photograph from the studied area; B) Geological map from the studied area including geomorphological terrace levels and sinkholes (modified from Esnaola and Gil, 1998 and Gil Marín *et al.*, 1995), C) Topographical maps from the studied area, D) water level position along the studied zone. White zone in all of the figures represents the outcropping of Cenozoic deposits; E) Alluvial thickness models and F) topography of the substratum top from the studied area (modified from Pueyo *et al.*, 2013), G) and H) calculations of the saturated and unsaturated alluvial. See color figure in the web.

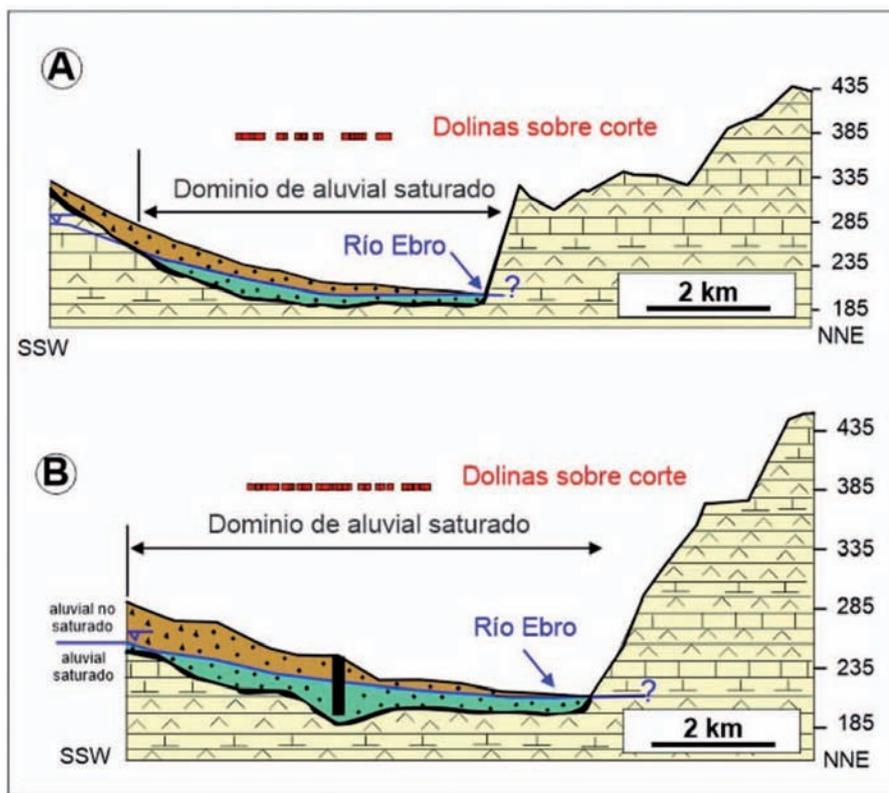


Fig. 4.- A) y B) Cortes geológicos generales de dos secciones transversales de orientación SSW-NNE de la zona de estudio en las que se identifican la posición del contacto con el substrato evaporítico, el nivel freático y la posición de dolinas en superficie a lo largo de la proyección del corte. Ver figura en color en la web.

Fig. 4.- A) and B) General cross-section from two SSW-NNE transversals from the studied area where the water level position, topography and substratum location can be identified, the location of are sinkholes included projected to the section. See color figure in the web.

aportes de regadío, un nivel principal en el que el Ebro es su representación superficial, o niveles confinados en el substrato por la presencia de un nivel de transición de baja permeabilidad. El comportamiento hidrogeológico dentro del substrato es complejo y posiblemente influye tanto la presencia de vías preferentes de circulación (fracturas, niveles de mayor permeabilidad o solubilidad) como también la presencia de niveles impermeables dentro del mismo. Puntualmente se identifica la presencia de áreas con niveles piezométricos por encima de la unidad confinante, aunque esta unidad no es continua y tiene variaciones importantes de espesor y características que limitan su análisis regional en la zona de estudio.

En sectores donde este nivel está presente, el acceso de agua al substrato se puede articular a través del contacto entre el aluvial y el substrato cenozoico en sectores donde aflora y que justificaría su confinamiento, en ocasiones, a sobrepresión. Estas aguas suelen presentar altas salinidades, lo cual es compatible con flujos lentos y con una baja capacidad de disolución en general frente al carácter subsaturado del acuífero aluvial del Ebro.

La existencia o no de este nivel confinante configura los modos de interacción del acuífero del Ebro con el material soluble inferior y permite evaluar la capacidad de acceso de las aguas subsaturadas al substrato para generar procesos de karstificación. Como se indicaba en la introducción, la identificación en superficie de procesos coincidentes entre eventuales pérdidas de conducciones o acequias y la aparición de procesos de subsidencia topográfica pueden tener relación con el desarrollo de procesos de consolidación de suelos, asentamientos superficiales o estabilización de áreas asociadas a procesos de subsidencia previa, pero no tienen por qué tener una relación con el proceso de karstificación de los materiales del substrato.

La presencia de una barrera de baja permeabilidad entre las aguas subsaturadas del Ebro y las unidades evaporíticas más profundas define unas condiciones de contorno que favorecen la estabilidad sin entrar en valorar cómo circulan las aguas dentro de la unidad cenozoica que seguramente condiciona los lugares en los que se producen concentraciones de dolinas en superficie.

En aquellos casos en los que se produce una situación de confinamiento, no existirá una entrada de aguas subsaturadas en la unidad evaporítica inferior. Sin embargo, en aquellos lugares en los que el nivel inferior no está confinado, la comunicación entre ambos niveles crearía una vía preferente de acceso de aguas al substrato evaporítico que debería valorarse de forma preventiva. Actividades como la ejecución de sondeos geotécnicos y geotérmicos sin sellado posterior podría conectar ambos niveles y colaborar en la generación de un incremento de la actividad kárstica asociada, esta vez sí, debida a la actividad antrópica pero no por las pérdidas de acequias, conducciones o regadío en manta en un contexto de materiales evaporíticos localizados por debajo del nivel freático asociado al aluvial del Ebro.

Agradecimientos

Los datos utilizados en los modelos provienen de datos públicos de Confederación Hidrográfica del Ebro y Ayuntamiento de Zaragoza que los ha puesto a nuestra disposición. Este trabajo forma parte de los objetivos del Grupo Consolidado de Investigación del Gobierno de Aragón (E27, Geotransfer). Los autores quieren agradecer los comentarios y sugerencias realizadas por J.J. Durán y un revisor anónimo al manuscrito original.

Referencias

- Ayala Carcedo, F.J., Rodríguez Ortiz, J.M., del Val Melus, J., Durán Valsero, J.J., Prieto Alcolea, C. y Rubio Amo, J. (1986). *Mapa del karst en España. Escala 1:000.000*. IGME. 67p.
- Benito, G., Pérez-González, A., Gutiérrez, F. y Machado, M.J. (1998). *Geomorphology* 22, 243-263.
- Esnaola, J.M. y Gil, C. (1998). *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 383 (Zaragoza) y memoria*. IGME. 47p.
- Gil Marín, C., Santos, J.A., Marqués, A. y Esnaola, J.M. (1995). *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 354 (Alagón) y memoria*. IGME, 45p.
- Gracia, J., Salvador, T., Simón, J.L. y Soriano, M.A. (1991). *Evaluación del riesgo de hundimientos a lo largo del trazado de tubería alternativa para el abastecimiento de agua al barrio de Casetas y polígonos intermedios*. Informe inédito. Excmo. Ayuntamiento de Zaragoza.
- Pueyo Anchuela, Ó., Gil, H., Ramajo, J., Ipas, J.F., Simón, J.L., Ansón, D. y Gracia, J. (2013). *Geogaceta* 53, 113-116.
- Salvany, J.M. (2009). *Geología del yacimiento glauberítico de Montes de Torrero (Zaragoza)*. Prensas Universitarias de Zaragoza 9, 80p.