

RIESGO DE SUBSIDENCIA KÁRSTICA EN ÁREAS URBANAS: EL CASO DE ZARAGOZA

Karstic subsidence risk in urban areas: the case of Zaragoza

José Luis Simón, M^a Asunción Soriano, Andrés Pocoví, Luis E. Arlegui, Antonio M. Casas, Carlos L. Liesa, Arancha Luzón, Antonio Pérez, Óscar Pueyo (*); Emilio Pueyo, Tania Mochales (**); Fco. Javier Gracia Abadías (***) y Diego Ansón (****).

RESUMEN

Este trabajo analiza, desde múltiples puntos de vista, la problemática del karst en yesos en el entorno de Zaragoza, el desarrollo de dolinas aluviales y los riesgos que éstas conllevan. La morfología de las dolinas depende del comportamiento mecánico de la cobertera situada sobre el sustrato yesífero: en coberteras sin cohesión aparecen morfologías en embudo y en cubeta, producidas por subsidencia continuada, mientras en coberteras con cohesión se producen dolinas en ventana provocadas por colapso brusco. El reconocimiento superficial de las dolinas se basa en la observación de fotografías aéreas, en el análisis visual del terreno (depressiones topográficas, escalones, áreas de vegetación o rellenos antrópicos anómalos) y en la observación y análisis de daños en áreas urbanizadas. También pueden estudiarse la geometría y la estructura interna de las dolinas en secciones del terreno donde éstas hayan quedado expuestas. Así, las características de sus rellenos naturales permiten conocer las pautas y tasas de evolución y las interacciones entre la subsidencia kárstica y los procesos sedimentarios. El estudio de la evolución temporal de las dolinas, a partir de la comparación de fotografías aéreas de distintos años o del seguimiento instrumental de las mismas, ha permitido reconocer que se trata de un proceso dinámico que llega a alcanzar velocidades de hundimiento de 12 cm/año. En dicha evolución es frecuente la ocurrencia cíclica de periodos de subsidencia lenta y eventos de hundimiento brusco. La afección causada por la subsidencia kárstica en Zaragoza es muy significativa. Ésta se incrementó a partir de los años 70 del siglo pasado, cuando buena parte del suelo agrícola que circundaba la ciudad fue destinado a uso urbano, industrial y grandes infraestructuras. La prevención y manejo del riesgo kárstico en áreas urbanas y peri-urbanas debe contemplar: (1) la detección precoz de los fenómenos tanto en superficie como en profundidad (a partir de estudios geofísicos), y (2) la adaptación del uso del suelo a su grado de afección por fenómenos kársticos y a su susceptibilidad potencial a los mismos. La geología, la geotecnia y la ingeniería desempeñan, cada una, un papel específico en la estrategia para reducir el riesgo, bien sea evitando la exposición al peligro o disminuyendo la vulnerabilidad de las construcciones.

ABSTRACT

This paper deals with the problems generated by karst in gypsum around Zaragoza, the development of alluvial sinkholes and the concomitant risks. Sinkhole geometry depends on the mechanical behaviour of the cover overlying the evaporitic bedrock: non-cohesive soils favour the development of basin and funnel shaped dolines, whereas cohesive covers lead to the development of well-shaped collapses. Surface survey in areas prone to develop dolines is based on aerial photographs, in situ features (such as topographic depressions, stepped ground, anomalous man-made fills, wet-ground vegetation), and location of building pathologies in urban areas. In some cases, the structure and geometry of dolines can be studied in section (road cuts, for instance), where the features of natural fills allow to characterize the evolutionary patterns and sedimentation-subsidence interactions. Through dating of such fills the rate of subsidence can be estimated, and linked to possible episodes of climate variations. Doline evolution through time, either by comparison of aerial photographs taken in different years or by instrumental survey, yields the scenario of a dynamic process with subsidence rates up to 12 cm/year, where cycles of steady subsidence periods and sudden collapse are identified. In the Zaragoza area, the consequences of karst subsidence are outstanding. They dramatically increased from the 70's, when large portions of the territory, formerly of agricultural use, turned into urban, industrial and service uses. Prevention and hazard management of karstic risks on urban and peri-urban areas must include: 1) early detection of the problem, in surface as well as underground (by means of geophysical surveys), and 2) adaptation of land use to the degree of affection by karst and the potential susceptibility. Geology, geotechnics and engineering have specific roles on risk management strategies by diminishing either the exposition to karst hazard or the vulnerability of man made structures.

Palabras clave: dolina, subsidencia kárstica, peligrosidad, riesgo, prospección geofísica.

Keywords: sinkhole, karstic subsidence, hazard, risk, geophysical survey.

(*) Dep. Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza. C/ Pedro Cerbuna, 12, 50009 Zaragoza. E-mail: jsimon@unizar.es

(**) Instituto Geológico y Minero, Oficina de Proyectos en Zaragoza. C/ Manuel Lasala, 44, 50006 Zaragoza.

(***) CONTROL 7, Polígono Malpica-Santa Isabel, C/ E, 59-61, nave 9, 50057 Zaragoza.

(****) ARCO-TECNOS, Polígono Molino del Pilar, C/ Carl Benz, 21, nave 68, 50015 Zaragoza.

INTRODUCCIÓN

El karst es uno de los fenómenos geológicos que debe ser considerado como fuente potencial de riesgo en el territorio y, en particular, en zonas urbanas. Su peligro radica en la subsidencia o colapso de la superficie del terreno que puede producirse como consecuencia de la formación de cavidades en el subsuelo, y que se manifiesta en la formación de depresiones cerradas conocidas como *dolinas*. Tradicionalmente se ha prestado mayor atención al karst desarrollado en calizas; sin embargo, el generado sobre yesos entraña un mayor peligro, ya que la velocidad de disolución del yeso en agua pura es del orden de 10^3 veces mayor, de modo que el karst puede desarrollarse en yesos en sólo unas decenas de años, incluso en zonas de clima semiárido (Cooper, 1998). El riesgo de subsidencia kárstica en yesos es todavía mayor cuando éste aparece cubierto por materiales detríticos, formándose entonces lo que se conoce como *dolinas aluviales*.

El sector central de la Cuenca del Ebro, y en particular la ciudad de Zaragoza y su entorno, es un área propicia para el desarrollo de estos procesos. En el registro geológico existen abundantes evidencias de que fueron ya activos a lo largo del Pleistoceno. Las estructuras de deformación que producen en glacis y terrazas de esa edad permiten analizar sus mecanismos de detalle. Históricamente, las dolinas han afectado a amplias áreas agrícolas, y quedan claramente reflejadas en fotografías aéreas y mapas topográficos. Con la expansión urbana de la ciudad, sobre todo a partir de la década de 1970, se acrecentó el riesgo, y desde entonces son numerosos los casos de ruina o daños graves a edificaciones e infraestructuras (Benito *et al.*, 1995; Soriano y Simón, 1995). En los últimos años, como consecuencia de la construcción de nuevas vías de comunicación, alguna de ellas tan importante como la línea ferroviaria de alta velocidad (AVE) entre Madrid y Barcelona, el interés y la preocupación por este riesgo natural se ha incrementado, obligando a numerosos estudios especializados que han abordado el tema desde sus múltiples perspectivas: geomorfológica, hidrológica, sedimentológica, geotécnica o geoambiental. En este artículo se hace una síntesis del conocimiento científico adquirido sobre las dolinas aluviales en el área de Zaragoza, y sobre su relevancia práctica en relación con los usos del territorio y con la seguridad de las construcciones.

La zona estudiada se encuentra en el centro de la Cuenca del Ebro (Fig. 1). Durante el Neógeno ésta se rellenó en condiciones endorreicas, depositándose materiales detríticos en sus márgenes y de precipitación química en el centro, incluidas abundantes evaporitas (yeso, halita, glauberita...). La estructura de los materiales es simple: estratos subhorizontales o con buzamientos muy suaves, en general de sentido centrípeto, y cortados por un denso diaclasado de direcciones preferentes ESE-WSW y N-S a NNE-SSW y, localmente, por fallas normales de salto decimétrico a métrico (Arlegui y Soriano, 1998, 2003; Arlegui y Simón, 2000).



Fig. 1. Esquema de situación geográfico-geológica de la zona estudiada.

Al final del Terciario cesa el régimen endorreico por la apertura de la Cuenca del Ebro hacia el mar Mediterráneo y se pasa a un régimen exorreico. Se instala y encaja progresivamente la red fluvial, provocando el vaciado parcial del relleno neógeno y generando sucesivos niveles escalonados de terrazas y glacis de acumulación que lo recubren en extensas áreas. Soriano (1990) reconoce en esta zona ocho niveles de terrazas, de los cuales afloran con mayor extensión los cuatro más recientes. Sus alturas relativas sobre el cauce del río son: T₁: 3-6 m; T₂: 10-14 m; T₃: 29-34 m; T₄: 64-73 m. Todos ellos están formados por gravas, arenas y limos, con frecuentes costras carbonatadas a techo.

CÓMO SE FORMAN Y PROGRESAN LAS DOLINAS ALUVIALES

El agua que se filtra en la cubierta aluvial (en general, de permeabilidad elevada) suele quedar retenida al alcanzar el yeso infrayacente, en sí mismo bastante impermeable. No obstante, si éste contiene fisuras, el agua percola por ellas. Las trayectorias de flujo se concentran hacia esos puntos, el proceso de disolución se acelera y las fisuras comienzan a ensancharse. El material de la cobertera puede ser arrastrado y evacuado a través de las cavidades y conductos incipientes, formándose en aquélla cavidades secundarias (mecanismo de sufosión o *piping*). Sobre unas u otras cavidades el material de la cobertera tiende a inestabilizarse y, en función de sus características mecánicas, podrá sufrir o no subsidencia y hacerlo según dos pautas principales (Fig. 2):

(a) En el caso de una *cobertera sin cohesión* (Fig. 2.A) el modelo de respuesta es el de un material granular que descansa sobre un orificio (el análogo sería un reloj de arena). El material granular es arrastrado continuamente hacia el conducto, que de ese modo nunca llega a quedar vacío. La superficie del terreno va hundiéndose de forma suave y continua formando *dolinas en embudo* y *dolinas en cubeta*.

(b) En el caso de una *cobertera con cohesión*

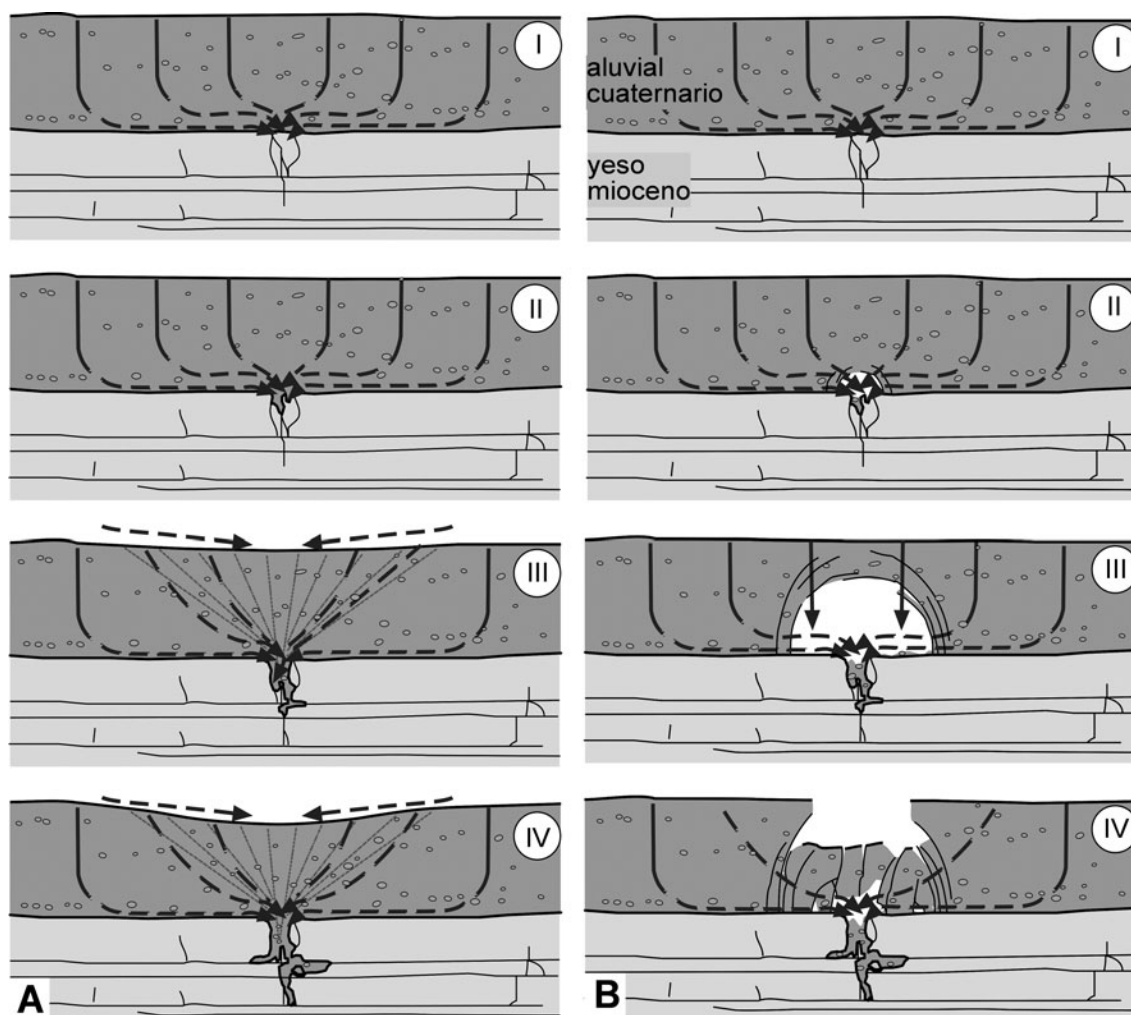


Fig. 2. Los dos modelos evolutivos básicos de dolinas. (A) Dolina en cubeta, formada por subsidencia lenta y continuada (cobertera sin cohesión). (B) Dolina en ventana, formada por colapso brusco (cobertera con cohesión).

(Fig. 2.B) el material situado inmediatamente por encima de la cavidad permite que ésta pueda mantenerse y agrandarse durante un tiempo. La cavidad produce una desviación de las trayectorias de tensiones, que se curvan y convergen en sus hastiales. Cuando éstos comienzan a soportar mayor tensión de la que pueden resistir, se producen fracturas de tracción con esa misma geometría en bóveda, que dan lugar al desprendimiento de lajas y al ensanchamiento de la cavidad. Finalmente el techo cede y se produce un colapso repentino del mismo que puede propagarse hasta la propia superficie dando lugar a una *dolina en ventana*, con paredes escarpadas que pueden presentar segmentos extraplomados, reflejo de la rotura en bóveda.

En una misma dolina pueden coexistir ambos tipos de procesos, actuando cada uno a una profundidad distinta, o bien sucederse en el tiempo (Soriano y Simón, 1995). Caben muchas combinaciones posibles, según cuál sea el mecanismo en profundidad y según si el proceso se transmite o no a la superficie. Los modelos analógicos de laboratorio permiten simular esos mecanismos, estudiar

qué variables litológicas o hidrológicas determinan que domine uno u otro y, en general, evaluar cuáles son los factores que favorecen el desarrollo de dolinas. La Figura 3 muestra, a modo de ejemplo, la sección de un modelo reproducido en una cobertera arenosa superpuesta a un sustrato de sal común (Soriano y Simón, 1993, 1997). En él se aprecia el desarrollo de un colapso en la zona con menor espesor de cobertera (dolina en ventana con paredes en bóveda, parte izquierda del modelo), junto a otra cavidad formada bajo cobertera más potente (parte derecha) que no ha llegado a propagarse hacia la superficie.

El mecanismo básico descrito supone que la disolución tiende a concentrarse (y, por tanto, las cavidades tienden a localizarse) junto al contacto entre el sustrato evaporítico y la cubierta aluvial. El experimento mostrado en la Fig. 3 ilustra perfectamente este hecho. No obstante, también puede producirse subsidencia lenta del terreno debido a la disolución intercapa selectiva en niveles de sales (especialmente halita y glauberita) situados a mayor profundidad (Gutiérrez *et al.*, 2008).

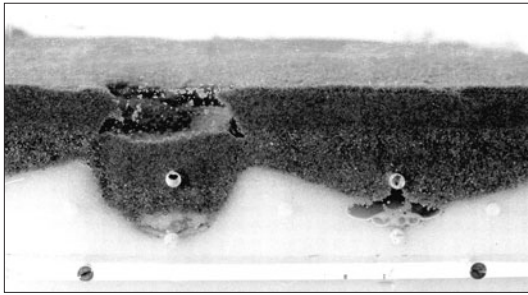


Fig. 3. Modelo analógico de laboratorio que muestra la formación de cavidades en un sustrato soluble (sal común) y el desarrollo de dolinas en una cubierta arenosa.

LO QUE NOS ENSEÑA EL PALEOKARST

En las canteras, trincheras y taludes de vías de comunicación abiertos en las terrazas y glacis pleistocenos del área de Zaragoza se observan expuestos numerosos ejemplos de estructuras de deformación producidas por paleokarst de los yesos terciarios. Las morfologías son muy variadas, aunque suelen tener en común la presencia de cuerpos de sedimentos fluviales o aluviales hundidos y encajados anómalamente en los yesos neógenos o en niveles cuaternarios más antiguos. Analizándolos con criterios estructurales y sedimentológicos pueden interpretarse los mecanismos de detalle por los que progresa la subsidencia kárstica. Los tipos más comunes son:

(a) Estructuras tubulares estrechas, profundas y de paredes subverticales (Fig. 4.A). En su interior aparece material cuaternario desestructurado, evacuado a través de conductos verticales de disolución dentro de los yesos.

(b) Estructuras en embudo, de anchura mayor que en el caso anterior y paredes con pendiente moderada hacia el interior (Fig. 4.B).

(c) Estructuras en bóveda, que pueden afectar a yeso, margas o limos. La masa colapsada en su interior está limitada por paredes en contrapendiente, y suele estar constituida por bloques con una disposición caótica (Fig. 4.C).

(d) Estructuras en cubeta suave, visible en la estratificación o laminación de la cobertera detrítica y/o del sustrato evaporítico. Suelen aparecer por encima de cualquiera de los tres tipos anteriores, allí donde la deformación va atenuándose (Fig. 5), y también sobre zonas donde se ha producido disolución selectiva de sales interestratificadas en niveles profundos (Gutiérrez *et al.*, 2008).

Las secciones de paleodolinas en el registro geológico pleistoceno permiten conocer asimismo su velocidad y pautas de evolución, así como las interacciones entre la subsidencia kárstica y los procesos sedimentarios. El estudio sedimentológico de los rellenos de paleodolinas (Luzón *et al.*, 2008) pone de manifiesto que, dentro de la sucesión de depósitos típicos de terrazas fluviales, tales como canales y barras de gravas, existen otros que no son propios de estos medios de sedimentación. Se reconocen lóbulos de grava, así como

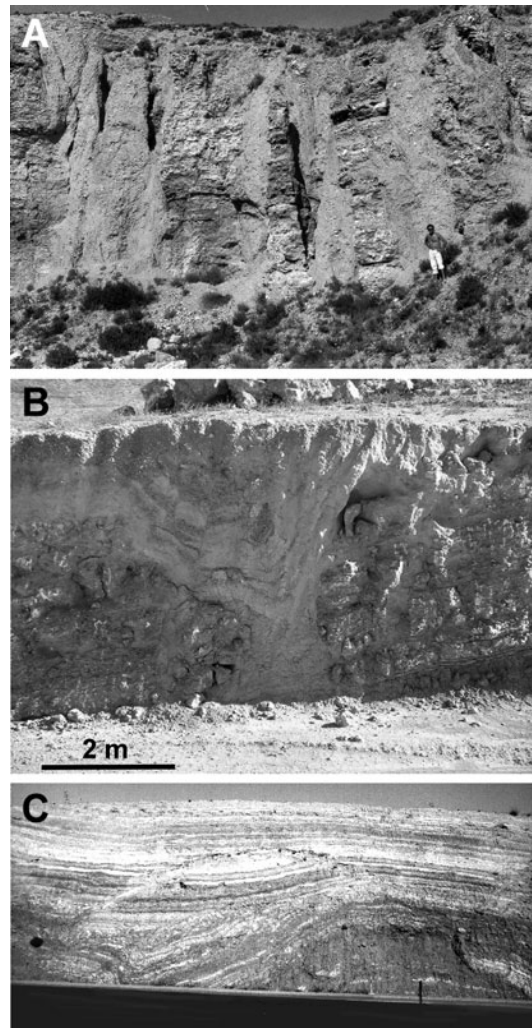


Fig. 4. Ejemplos de paleodolinas en el registro geológico. (A) Estructuras tubulares verticales en una antigua cantera de yeso al sur de Zaragoza. (B) Estructura en embudo en una excavación de la plataforma logística PLAZA (SW de Zaragoza). (C) Estructuras en bóveda en yesos miocenos de la Cuenca de Calatayud.

gravas y arenas desorganizadas generadas por procesos gravitacionales, que se relacionan lateralmente con depósitos lutíticos en forma de cubeta. Además, la presencia de discordancias progresivas demuestra la existencia de deformación sinsedimentaria (Fig. 5). Estos depósitos se interpretan como resultado del relleno de depresiones generadas dentro de la zona activa del sistema fluvial. Éstas pudieron actuar, una vez generadas, como pequeños paleolagos que recibirían aportes (gruesos y finos) en momentos de desbordamiento de los canales principales. La comparación de la edad de estas paleodolinas con la escala paleoclimática obtenida a partir del análisis isotópico de los sondeos de hielo en Groenlandia (Walker *et al.*, 1999) permite plantear la hipótesis de que el máximo desarrollo de dolinas pudo estar relacionado con periodos más cálidos dentro de la última glaciación (episodios interestadiales). Se pone así

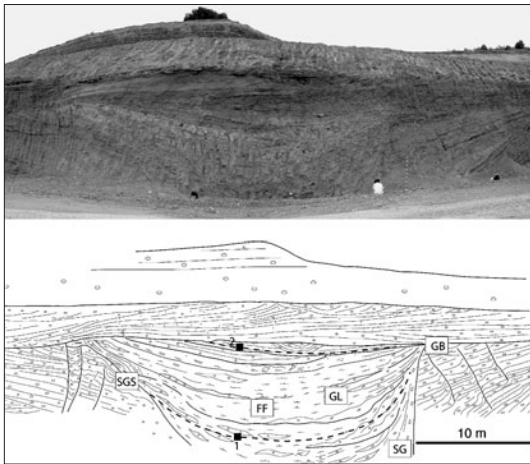


Fig. 5. Paleodolina expuesta en una gravera próxima a Garrapinillos (W de Zaragoza). Elementos arquitectónicos reconocidos (Luzón et al., 2008): SGS: arenas convolucionadas; FF: sedimentos de grano fino; GL: lóbulos de grava; SG: gravas desorganizadas y convolucionadas; GB: barras de grava. 1 y 2: Situación de muestras datadas mediante luminescencia óptica (OSL), que han proporcionado edades de $77,8 \pm 7,7$ ka y $73,0 \pm 5,2$ ka, respectivamente. Dichas dataciones y la geometría de los niveles de referencia (líneas gruesas discontinuas) sugieren una tasa media de subsidencia del orden de mm/año (Simón et al., 2008).

de manifiesto el importante papel del clima en la acentuación de los procesos de disolución, y por tanto en la evolución de las formas y estructuras de subsidencia kárstica.

LAS DOLINAS EN SUPERFICIE: MORFOLOGÍA Y CRITERIOS DE RECONOCIMIENTO

Las dolinas aluviales de este entorno se desarrollan sobre todo en los niveles de terrazas inferiores del río Ebro (T_2 y T_3 ; Fig. 6). También se observan en niveles de glacis que se dirigen hacia el cauce del río desde los relieves estructurales terciarios. Su morfología es variada, incluyendo tipos en cubeta, embudo y ventana. Los tamaños oscilan entre 10 y 100 m de diámetro, y entre 1 y 20 m de profundidad. Suelen tener forma redondeada o elíptica en planta, aunque hay también depresiones de contorno irregular producto de la coalescencia de varias dolinas, en cuyo caso pueden llegar a superar 1 km de longitud máxima (Soriano, 1990; Soriano y Simón, 1995).

La expresión superficial de las dolinas es clara y manifiesta en el caso de la morfología en ventana o en embudo, y más tenue y sutil en las morfologías en cubeta. En este segundo caso, si además ha habido actuaciones humanas destinadas a contrarrestar la subsidencia con el relleno periódico de la depresión, puede no ser detectada a primera vista. Hemos de aplicar entonces métodos de observación indirectos y criterios de interpretación muy diversos:

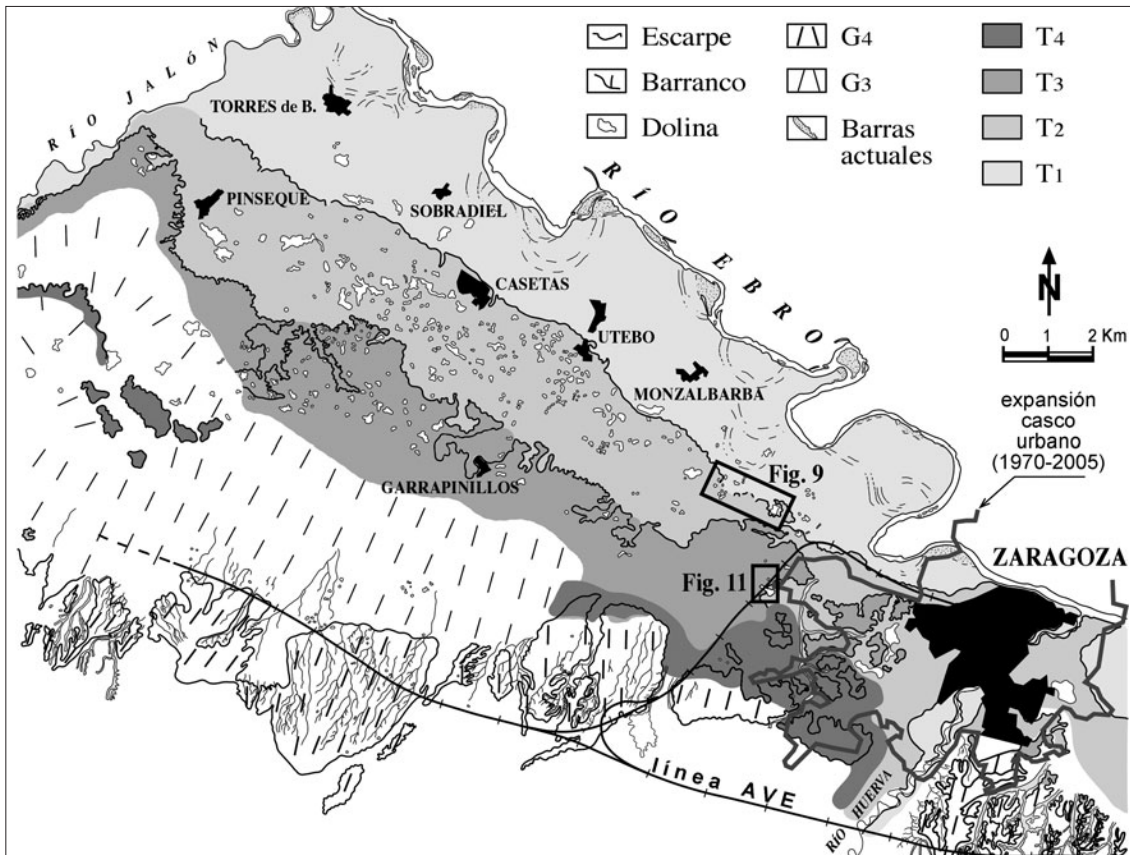


Fig. 6. Mapa geomorfológico del área al NW de Zaragoza (a partir de fotografías aéreas de 1957). T_1 , T_2 , T_3 y T_4 : niveles de terrazas. G_3 y G_4 : glacis relacionados con T_3 y T_4 , respectivamente.



Fig. 7. Ejemplos de dolinas de colapso actuales en terrenos no urbanizados. (A) La Puebla de Alfindén, E de Zaragoza. (B) El Burgo de Ebro, SE de Zaragoza. (C) Junto al Canal Imperial, W de Zaragoza.

(1) Cartografía geomorfológica detallada (Fig. 6) sobre fotografías aéreas con recubrimiento estereoscópico. Dado que se dispone de colecciones de fotografías tomadas con intervalos de varios decenas de años, entre 1947 y la actualidad, esa cartografía no es 'estática' sino que nos proporciona la imagen evolutiva del fenómeno. Las escalas de trabajo oscilan entre 1:3500 y 1:43000.

(2) Reconocimiento visual sobre el terreno (Fig. 7), a la búsqueda de indicios directos o indirectos de subsidencia en el terreno; por ejemplo:

- a) depresiones topográficamente cerradas;
- b) balsas permanentes o estacionales (en ocasiones el fondo de las dolinas se halla por debajo del nivel freático, Fig. 7C);
- c) áreas con suelo anómalamente húmedo o con vegetación diferenciada del entorno;
- d) rellenos antrópicos anómalos en un entorno de suelo agrícola;
- e) escalones anómalos del terreno o sistemas de grietas arqueadas con disposición concéntrica.

(3) Reconocimiento visual de daños producidos por subsidencia en áreas urbanizadas (Fig. 8):

- a) Depresiones cerradas y basculamientos en pavimentos inicialmente horizontales. Permiten un control topográfico fino de los centros de subsidencia y sus tasas.
- b) Fracturas y escalones en pavimentos. Con frecuencia tienen morfología curvada concéntrica, lo que permite también determinar la posición de los centros de hundimiento.
- c) Basculamiento o cizalla de edificios por hundimiento diferencial de la cimentación (Fig. 8C).
- d) Fracturas en muros. Estudiando su geometría se puede identificar la dirección hacia donde se produce el hundimiento diferencial (Fig. 8C,D).

(4) Consulta de documentación histórica y entrevistas con los habitantes y propietarios de las zonas afectadas. La existencia de dolinas activas en el pasado suele quedar en la memoria de las gentes y, en ocasiones señaladas, en documentos cartográficos, catastrales o notariales.

A partir de la cartografía de dolinas pueden establecerse mapas de peligrosidad, distinguiendo grados en función de la densidad o de las tasas de actividad. El fundamento conceptual de estos mapas es la evidencia de que las zonas de subsidencia activa actual coinciden en una proporción muy elevada, según se detalla más adelante, con las que han registrado hundimiento en las últimas décadas. Junto a esta zonificación de peligrosidad *constatada*, puede establecerse asimismo una zonificación de peligrosidad *potencial* en función de la existencia o no de factores de riesgo, esto es, de aquellas variables geológicas o hidrológicas que aumentan la susceptibilidad del terreno a sufrir procesos kársticos y a que éstos se manifiesten en superficie: bajo espesor de cobertera, bajo contenido en lutitas, existencia de una topografía en el contacto sustrato-cobertera que favorezca la concentración de flujo, variaciones estacionales de gran amplitud en el nivel freático, irrigación y usos del suelo... (Soriano *et al.*, 1994; Soriano y Simón, 1995; Galve *et al.*, 2008).

EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LAS DOLINAS

La actividad kárstica en yesos opera a una velocidad tal que sus efectos y su evolución puede rastrearse a una escala temporal de decenios o incluso de años. En el entorno de Zaragoza se manifiesta por la continua formación de nuevas dolinas y la ampliación de las ya existentes. El seguimiento de



Fig. 8. Afecciones por dolinas en zonas urbanizadas e infraestructuras. (A) Pequeña dolina de colapso junto a la autovía A-68, W de Zaragoza. (B) Carretera CV-615 de acceso a Luceni, NW de Zaragoza. (C) Fachada de vivienda en el barrio de Miralbueno (Zaragoza), con la ventana y la puerta 'cizalladas' por hundimiento diferencial y afectada por fracturas en su base. (D) Interior de edificación en Luceni, que muestra un combamiento de la solera y una gran fractura en bóveda.

los cambios que han tenido lugar en la distribución cartográfica de dolinas a lo largo de los sesenta años que abarcan las colecciones disponibles de fotografías aéreas permite conocer algunas pautas evolutivas (Fig. 9; Soriano y Simón, 1995; Simón *et al.*, 2008). Así, la extensión de las áreas afectadas se va modificando: en unos casos se amplía, mien-

tras en otros se atenúa o desaparece. Hay dolinas que fueron rellenadas en un momento dado y no han vuelto luego a manifestarse, mientras otras nuevas se generan en áreas anteriormente estables. El tamaño de las dolinas también varía a lo largo del tiempo. Hay una tendencia común al crecimiento de su superficie por migración de los bordes. En el ca-

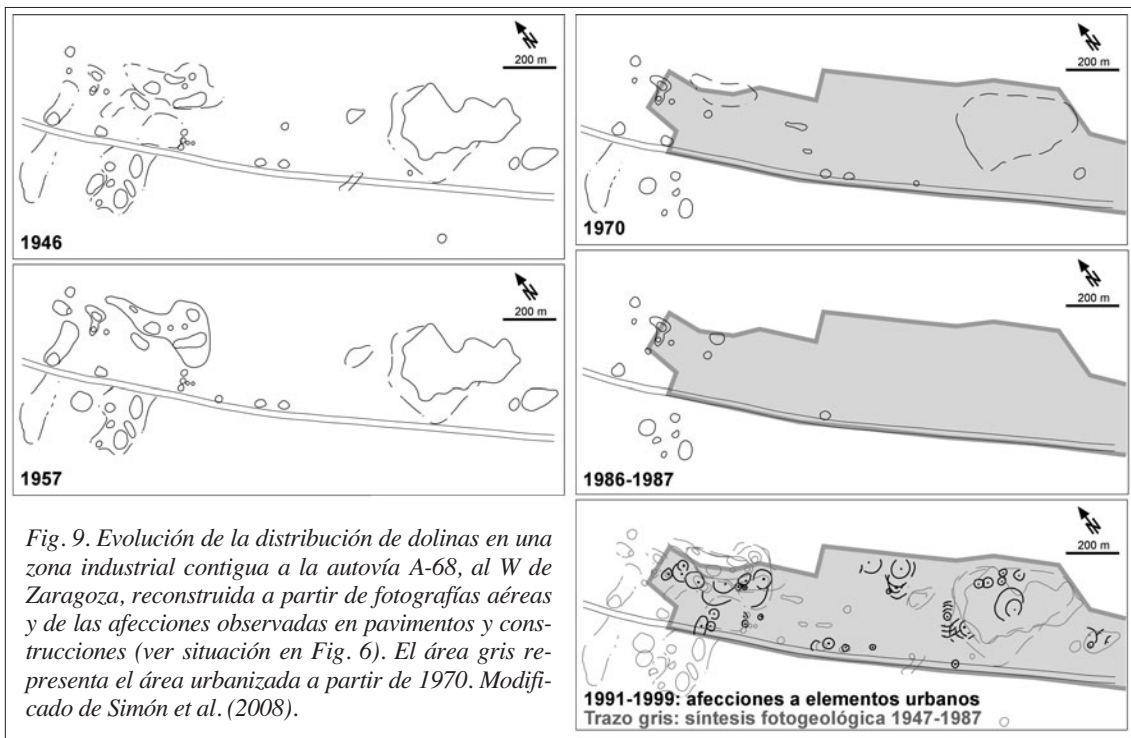


Fig. 9. Evolución de la distribución de dolinas en una zona industrial contigua a la autovía A-68, al W de Zaragoza, reconstruida a partir de fotografías aéreas y de las afecciones observadas en pavimentos y construcciones (ver situación en Fig. 6). El área gris representa el área urbanizada a partir de 1970. Modificado de Simón *et al.* (2008).

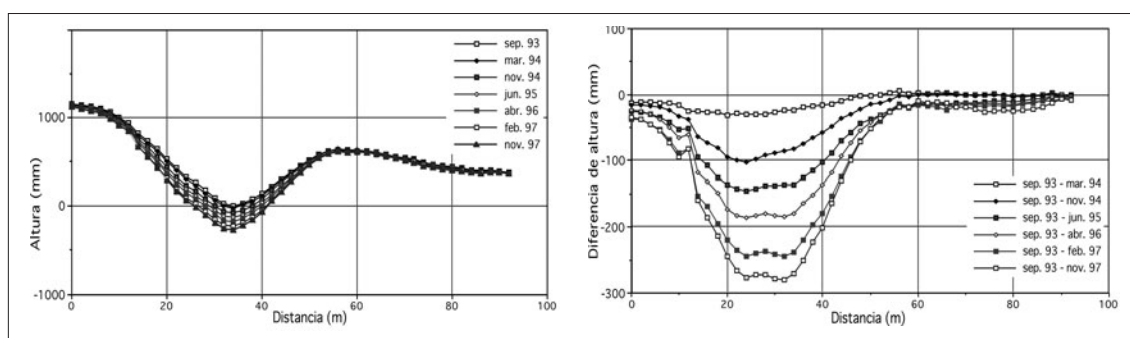


Fig. 10. Perfiles topográficos detallados de una dolina localizada en la zona industrial de la autovía A-68, al W de Zaragoza, realizados de forma sucesiva entre septiembre de 1993 y noviembre de 1997. (A) Perfiles absolutos. (B) Perfiles incrementales tomando como referencia la nivelación de septiembre de 1993. Modificado de Soriano y Simón (2002).

so de dolinas con relleno antrópico (abundantes en las zonas periurbanas de Zaragoza a partir de 1970), es muy frecuente que dicha migración se produzca por un mecanismo de nacimiento de nuevas dolinas, pequeñas y numerosas, con su centro situado sobre el límite de las antiguas. Esto convierte en áreas potencialmente peligrosas a todas aquéllas que existen en el entorno de las dolinas activas, hasta al menos unas decenas de metros de distancia.

La subsidencia en el interior de las dolinas aluviales de Zaragoza se produce a una velocidad apreciable en unos pocos años, incluso con procedimientos de observación y medida básicos. En zonas urbanizadas es fácil tomar como referencia pavimentos que se construyeron o repararon en fechas conocidas, y cuya superficie ha experimentado movimientos diferenciales de orden centimétrico o decimétrico. También pueden utilizarse elementos estructurales de edificaciones, que en su momento se sabe que eran horizontales o guardaban relaciones de altura conocidas. Utilizando niveles ópticos (usuales en trabajos de topografía convencional), o incluso niveles de agua “caseros” como los empleados en albañilería, puede reconstruirse con precisión la historia de subsidencia en dolinas que afectan a pavimentos (Fig. 10). En varios casos estudiados entre los años 1993 y 2005 se han calculado velocidades de hundimiento de entre 12 y 120 mm/año, a partir de referencias fijas en pavimentos y construcciones, y de entre 24 y 92 mm/año, a partir de las nivelaciones topográficas sucesivas (Soriano y Simón, 2002; Simón *et al.*, 2008). Estas tasas (del orden de cm/año) resultan ser un orden de magnitud superiores a las estimadas en paleodolinas (ver Fig. 5).

Además de las zonas en que se produce hundimiento lento, hay que recordar asimismo los episodios de colapso brusco de la cubierta cuaternaria. Hay numerosos casos conocidos en todo el entorno de la ciudad, algunos en puntos aislados y otros de manera recurrente en un mismo lugar. Algunos ejemplos con consecuencias dañinas para personas o bienes se citan en el apartado siguiente. Tanto en casos conocidos de paleodolinas como en el comportamiento que muestran las dolinas actuales, es frecuente la ocurrencia cíclica de periodos de subsi-

dencia lenta y eventos de hundimiento brusco. Menos frecuente, pero más peligroso, resulta el caso de los colapsos repentinos que acontecen en áreas de suelo firme (caso de las terrazas con un encostramiento superficial importante, conocido localmente como *mallacán*), donde el umbral de inestabilidad de la bóveda se supera sin haber sido precedido por un periodo de deformación dúctil.

LOS DAÑOS QUE CAUSA LA SUBSIDENCIA KÁRSTICA

Los agricultores de Zaragoza han convivido secularmente con las dolinas aluviales o *simas*, manteniendo con ellas un complejo equilibrio. Allí donde la velocidad de hundimiento es controlable, han conseguido conservar la superficie de cultivo procediendo a rellenar periódicamente las depresiones, bien redistribuyendo la tierra vegetal o mediante aportes del exterior. En los casos de evolución demasiado rápida han optado por abandonarlas y cultivar en derredor suyo, o bien por abancalarlas interiormente y seguir explotándolas en parte. Dejadas en su estado natural, esas depresiones han sido colonizadas por la vegetación y, en muchos casos, convertidas en balsas naturales al descender su fondo por debajo del nivel freático.

Esta situación de relativo ‘entendimiento’ entre los intereses humanos y los procesos naturales se rompe a partir de la década de 1970, al acelerarse la expansión urbana e industrial de Zaragoza y urbanizarse indiscriminadamente grandes extensiones de suelo agrícola. En muchos lugares se reproduce una sucesión de hechos similar. En primer lugar, una finca dedicada a la explotación agrícola es recalificada y pasa a ser suelo industrial o urbano. Las depresiones kársticas en su interior, que producen irregularidades topográficas, son rellenas y aplanadas, lo que conlleva su aparente ‘extinción’. Sobre ellas se edifican naves industriales o viviendas (con conocimiento o no, por parte de los promotores y constructores, del peligro latente). Aproximadamente 10 ó 15 años después de su construcción, en los edificios comienzan a aparecer daños de diversa consideración (Fig. 8), que requieren costosos mantenimientos o, incluso, aca-

ban por provocar su ruina. Cuando se compara la distribución de zonas dañadas con la de dolinas cartografiadas sobre antiguas fotografías aéreas se aprecia que la mayoría (hasta un 90%) se sitúan dentro o muy próximas al contorno de éstas. Se demuestra así que el proceso kárstico sigue activo, y que los intentos de ‘taparlo’ sólo han supuesto una mayor exposición al peligro.

Por su peso cuantitativo, el mayor riesgo de pérdidas económicas por deterioro o ruina de construcciones e infraestructuras se da en las numerosas zonas sujetas a hundimiento lento, en las que los daños estructurales a edificaciones, viales y conducciones es continuo. No obstante, el mayor riesgo humano lo constituyen los episodios de colapso repentino, aun cuando, afortunadamente por el momento, no se tiene noticia de ninguna víctima humana grave a consecuencia de los mismos. Estos sucesos son relativamente escasos, pero no excepcionales. A título de ejemplo, en el P.K. 292,500 de la autopista Vasco-Aragonesa, se produjeron cinco colapsos en un periodo de once años (1981, 1983, 1984, 1984 y 1991) alguno de los cuales superó los 3 m de profundidad. El hundimiento súbito del jardín de una vivienda particular en el barrio de Garra-pinillos produjo en 1995 un socavón de unos de 10 m de diámetro y 5 m de profundidad. En 1999 colapsó el suelo de parte de una nave industrial, arrastrando por succión la techumbre de la misma y ocasionando heridas leves a varios empleados. En 2002 ocurrieron dos hundimientos repentinos que originaron sendas dolinas en ventana (de 4 y 20 m de profundidad, respectivamente) en terrenos agrícolas junto a los cinturones de circunvalación de Zaragoza. En 2003 se generaron al menos cuatro colapsos conocidos en el entorno de la ciudad, uno de los cuales afectó al nuevo corredor ferroviario de entrada a la ciudad (ver apartado siguiente).

PREVENIR Y MANEJAR EL RIESGO. LA DETECCIÓN PRECOZ

Una vez conocido el peligro de la subsidencia kárstica, tomada conciencia de los daños que ésta produce, e identificadas sus manifestaciones en superficie, el sentido común dicta que la prevención más eficaz pasa por evitar la exposición a dicho peligro. Ello se traduce en una planificación de usos del territorio que excluya de las áreas peligrosas cualquier edificación o trazado de infraestructuras de importancia estratégica.

La administración municipal de Zaragoza tomó clara conciencia del problema de la subsidencia kárstica a principios de los años 90. El detonante fue la rotura repetida de la tubería de abastecimiento de agua al barrio de Casetas. A partir de ahí, nuestro grupo de la Universidad de Zaragoza realizó diversos estudios enfocados a delimitar las zonas de peligro, cuyos resultados fueron incorporados y tenidos en cuenta en la revisión del Plan General de Ordenación Urbana de 1999. Se restringieron algunas zonas consideradas inicialmente como urbanizables al estar afectadas por peligro de subsidencia,

y se modificó la distribución de detalle de los bloques de viviendas, viales o zonas verdes para minimizar el riesgo. Comenzaba así a actuarse en la primera y fundamental línea de prevención: el conocimiento espacial del peligro kárstico y la planificación de usos del territorio enfocada a evitar o minimizar la exposición al mismo.

No obstante, en 2003 aconteció un episodio, sin duda el más divulgado y controvertido de los relacionados con este tema, que demostró las limitaciones de dicha planificación. El 1 de marzo se produjo un hundimiento en el nuevo corredor ferroviario de entrada a Zaragoza, construido para dar acceso a la nueva línea AVE Madrid-Barcelona. Este corredor atraviesa zonas de karst activo en un tramo de unos 3 km de longitud (un 10% de su longitud total). Son zonas en que se han identificado con claridad dolinas, tanto en fotografías aéreas como en campo, una de las cuales registra una tasa de hundimiento de 6,5 cm/año (Simón *et al.*, 2008). El colapso afectó a la vía del ferrocarril convencional que discurre contigua a la del AVE, y fue atribuido oficialmente a las obras de hincas de un colector bajo las vías. Sin embargo, un estudio posterior permitió diagnosticar que había sido causada por una cavidad subterránea de origen natural, y que su contexto geológico no ofrecía dudas sobre el nivel de peligrosidad de la zona (Fig. 11A,C; Simón *et al.*, 2004). Durante el verano y comienzos del otoño se produjeron otras dolinas en el entorno de la línea AVE, una de ellas producida por colapso repentino y con una profundidad superior a los 15 m. Todo ello desató una intensa polémica entre el Colegio de Geólogos de Aragón, la administración (Ministerio de Fomento, GIF), empresas proyectistas y consultoras del proyecto, o expertos en riesgos geológicos del IGME, de la que se hicieron amplio eco los medios de comunicación (Fig. 11B). El suceso puso de manifiesto la diversidad de enfoques científicos y técnicos con que se aborda este tipo de problemas, el interés real que suscita en la sociedad y sus importantes implicaciones políticas.

La delimitación de zonas de peligro con vistas a planificar el territorio o diseñar el trazado de infraestructuras se hace teniendo en cuenta, en primer lugar, las manifestaciones de la subsidencia activa en superficie, según los criterios expuestos anteriormente. Pero deben considerarse también, a continuación, los posibles fenómenos kársticos que estén ocurriendo en el subsuelo sin que todavía se expresen en el suelo, junto a aquellas dolinas activas en el pasado que fueron cubiertas y de las que no se tiene evidencia actualmente. Para ello es necesario desarrollar estrategias de aplicación de métodos geofísicos adecuadas para la prospección y “auscultación” del terreno, que permitan la identificación de cavidades o de rellenos anómalos y sirvan, en definitiva, para una ‘detección precoz’ de la subsidencia.

Los diversos métodos geofísicos más o menos convencionales (geo-radar, prospección electromagnética multifrecuencia, sísmica de reflexión de alta resolución, microgravimetría, tomografía eléctrica, magnetometría) tienen, no obstante, serias limitaciones para enfrentarse a la valoración de estos

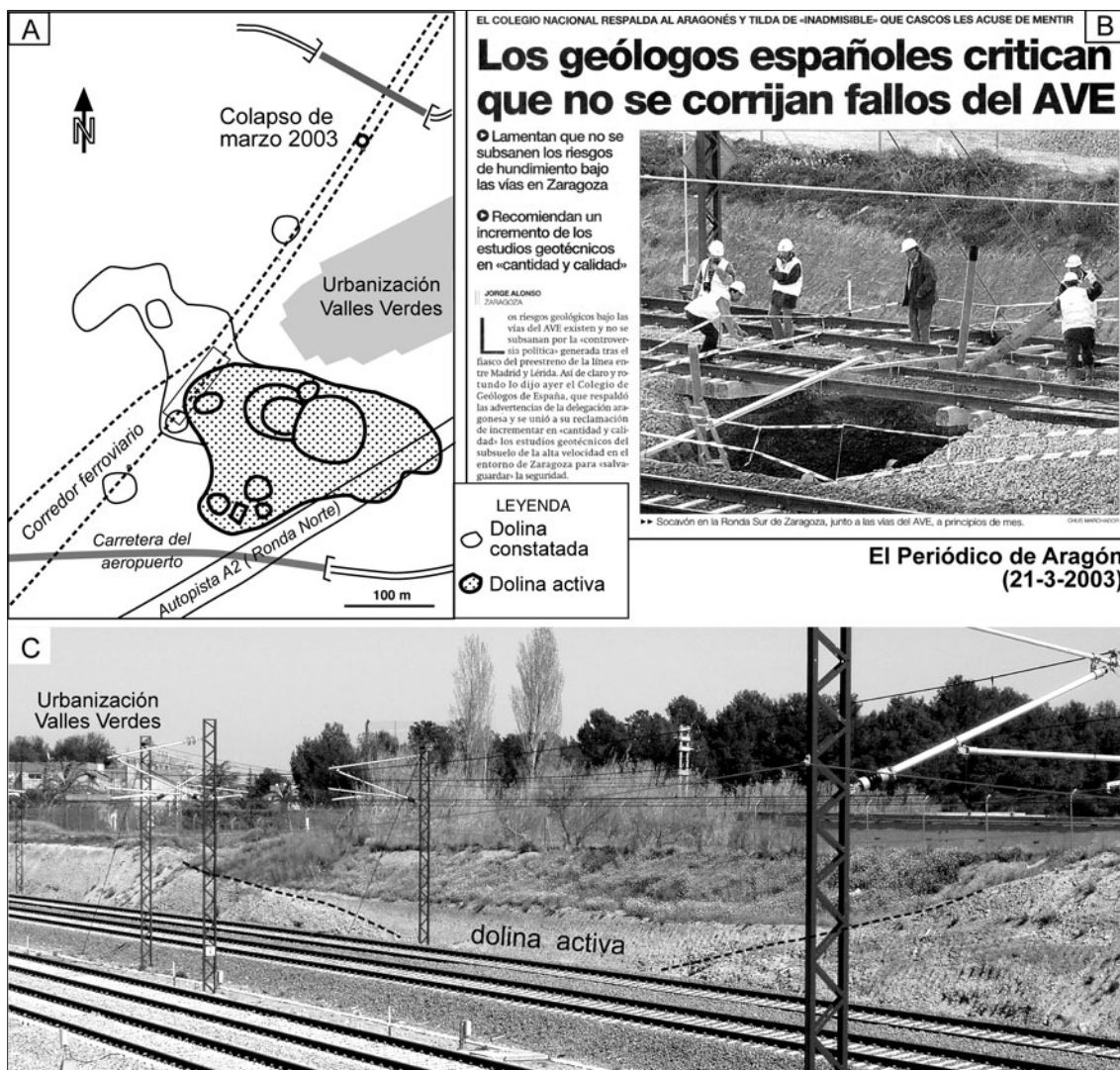


Fig. 11. El colapso de marzo de 2003 en el corredor ferroviario del AVE. (A) Mapa de dolinas activas en el segmento central del corredor (ver situación en Fig. 6). El pequeño rectángulo longitudinal indica la localización de la fotografía C. (B) El evento dio lugar a un debate técnico y social ampliamente recogido por la prensa. (C) Margen este del corredor ferroviario, cuyo talud corta una dolina activa en la que se ha medido una tasa de hundimiento de 6,5 cm/año (Simón et al., 2008).

fenómenos. Estas limitaciones dependen de varios factores: (i) de la resolución y alcance propios de cada método; (ii) del cambio de propiedades físicas (contraste) que los fenómenos kársticos hayan ocasionado sobre el terreno “normal” o inalterado; (iii) del ruido inducido por las infraestructuras en las zonas urbanizadas. No debemos olvidar tampoco que la interpretación de la “señal” que representa la variación de un parámetro geofísico nunca es unívoca: diferentes objetos o fenómenos en el subsuelo pueden dar una respuesta similar.

La efectividad de los diversos métodos de detección de dolinas o cavidades kársticas depende de cuáles sean, en cada caso, las propiedades físicas que sufren mayores cambios con relación a su entorno (Mochales et al., 2008). Por ejemplo, cavidades poco profundas que sólo contienen aire o agua presentan un fuerte contraste de densidad respecto al entorno, y el consiguiente defecto de masa da lugar

a una fuerte anomalía gravimétrica, detectable aunque se encuentre a decenas de metros de profundidad. En cambio, dolinas que se han ido rellenando con materiales superficiales ricos en arcillas, o con escombros de construcción que contiene restos de ladrillos o de hormigón armado, muestran valores de susceptibilidad magnética y conductividad eléctrica considerablemente más altos que las gravas o los yesos; son entonces los métodos geomagnético, electromagnético y de tomografía eléctrica los que mejor las detectan. Los colapsos en niveles de gravas que, a su vez, están rellenos de gravas suelen presentar cambios poco significativos en cuanto a densidad y propiedades electromagnéticas. Sin embargo, el cambio entre el terreno normal bien estratificado y el relleno deformado o desestructurado puede ser distinguible en los perfiles de georadar, capaces de detectar cambios a veces muy sutiles en la estructura del subsuelo.

En el caso de los alrededores de Zaragoza, las profundidades a las que se sitúan las cavidades y el volumen de las mismas, así como los condicionantes propios del entorno urbano, hacen que la microgravimetría sea en principio el método que puede dar una respuesta satisfactoria en prácticamente toda la gama de situaciones encontradas. Sin embargo una prospección gravimétrica de alta resolución (con precisión del al menos $10\mu\text{Gal}$) requiere establecer una red densa de puntos de medida y un trabajo muy costoso. Por ello, la estrategia más indicada consiste en llevar a cabo un estudio preliminar

orientado a detectar anomalías mediante los métodos geomagnético y electromagnético, que permiten operar con rapidez en el campo y en el procesado de los datos. Los resultados de esta primera fase permiten distinguir zonas “normales” y zonas “anómalas”. Sobre estas últimas deberán aplicarse otros métodos de mayor resolución, como la microgravimetría y los perfiles continuos de geo-radar, sísmica de reflexión o tomografía eléctrica, para realizar la interpretación final una vez comparados los resultados de todos ellos (Mochales *et al.*, 2008) (Fig. 12). Cuando la prospección tiene como finalidad el estu-

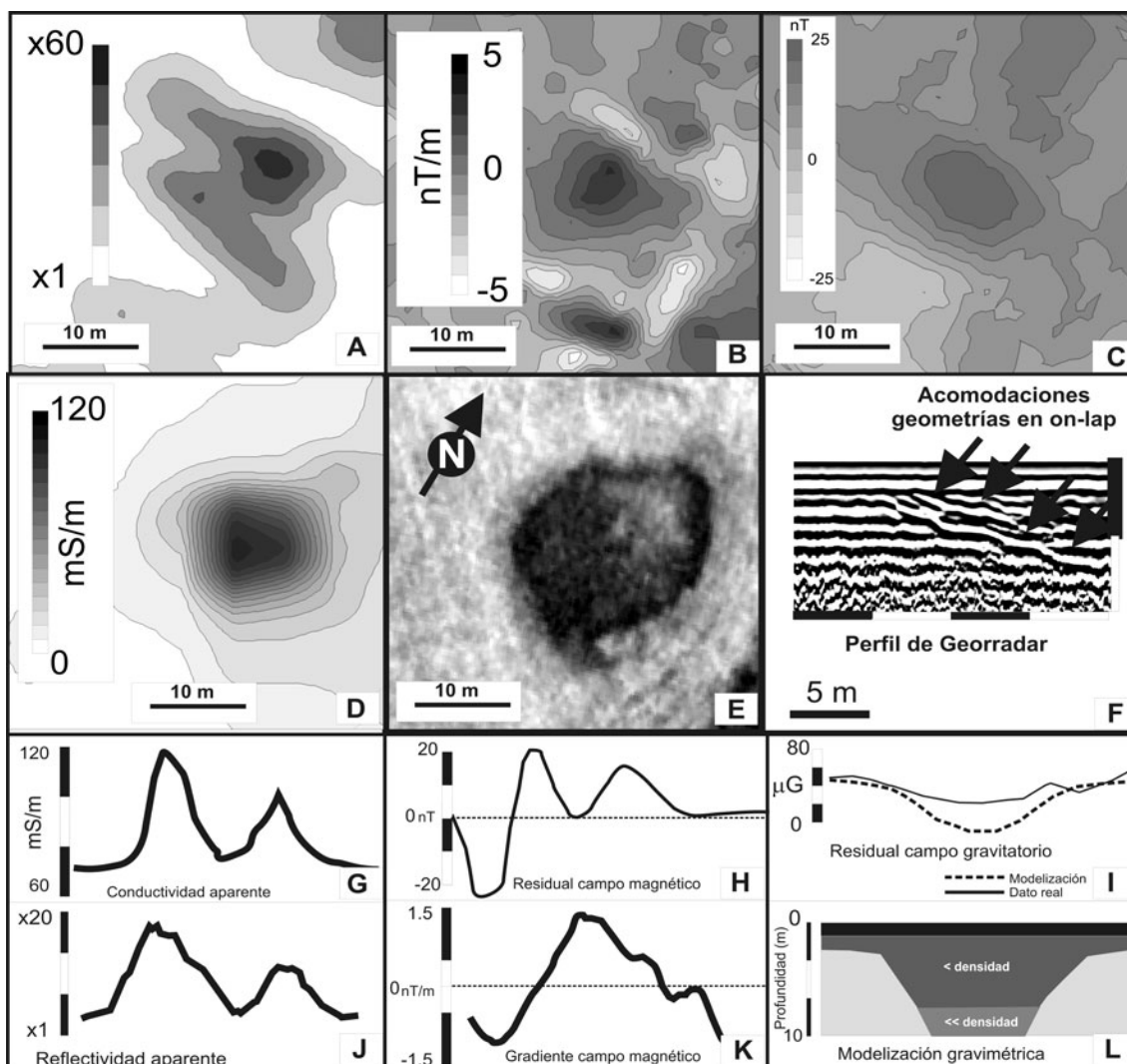


Fig. 12. Resultados obtenidos de la prospección y modelización geofísica con distintos métodos sobre una dolina de subsidencia. (a) Tasa de variación de reflectividad de los materiales superficiales a partir de la prospección por geo-radar, con antena apantallada y frecuencia central de 100 MHz (RAMAC). (b) Mapa de intensidad de gradiente de campo magnético obtenido con un magnetómetro de efecto Overhauser (separación de sensores 0.5 m, GSM-19). (c) Intensidad residual de anomalía de campo magnético terrestre (valores de la intensidad relativa tras la corrección a un datum local). (d) Mapa de conductividad magnética aparente obtenida de la modelización de resultados de radiación electromagnética multifrecuencia (frecuencia modelizada: 18625 Hz; equipo: GEM-2-193). (e) Fotografía área de la dolina sobre la que se ha realizado la prospección. (f) Sección de geo-radar que muestra las variaciones geométricas de reflectores atribuibles a subsidencia continuada y relleno posterior. (g) Perfil de conductividad aparente según una dirección S-N en la zona central de la dolina. (h) Perfil residual de anomalía de campo magnético terrestre. (i) Perfil residual de anomalía de campo gravitatorio terrestre (gravímetro Burris ZLS), y resultados de la modelización matemática (realizada a través de Gravmag 2.5). (j) Perfil de reflectividad aparente. (k) Perfil de gradiente de campo magnético terrestre. (l) Modelo obtenido de la modelización gravimétrica.

dió geotécnico de terrenos destinados a la construcción, el reconocimiento geofísico no cambia la obligatoriedad de ejecución de sondeos mecánicos que prescribe el Código Técnico de la Edificación, pero permite decidir su emplazamiento con la máxima representatividad y eficacia.

Otra línea de prevención, necesaria en aquellas zonas con exposición al peligro, es la actuación sobre los factores que contribuyen a desatar o acelerar los procesos kársticos, muy en particular sobre la entrada de agua al sistema. Dentro de las áreas urbanas habría que evitar el riego excesivo de zonas verdes, diseñando jardines de tipo árido o mediterráneo y evitando el césped común. Como alternativa, las zonas con peligro evidente de subsidencia pueden ser usadas para canchas deportivas exentas de elementos estructurales vulnerables. El simple pavimento de aglomerado asfáltico o sintético podrá llegar a ceder, pero lo hará de forma continua y lenta, sin riesgo para los usuarios, y con costes de mantenimiento asumibles. En cuanto a la red de abastecimiento y saneamiento, hay que tomar las medidas necesarias para que las fugas que se produzcan en ella sean mínimas. De lo contrario, puede desencadenarse un círculo vicioso: una tubería atraviesa una dolina; se deforma hasta que una de sus juntas se abre y se inicia una fuga; ésta alimenta puntualmente la disolución o el arrastre de material por los conductos subterráneos, lo que provoca una aceleración del proceso kárstico y de los daños consiguientes.

DISMINUIR LA VULNERABILIDAD: EL PAPEL DE LA GEOTECNIA Y LA INGENIERÍA

En áreas con subsidencia kárstica activa en las que, por algún motivo, es obligado construir (es decir, donde no puede evitarse la exposición al peligro) entran en juego las medidas encaminadas a disminuir la vulnerabilidad de las construcciones. Cualquier actuación puede ser posible, aun en los casos más desfavorables, mediante la utilización de las técnicas de ingeniería adecuadas, pero hay que evaluar cuál es el coste tanto en la ejecución de las mismas como en el mantenimiento que deberá realizarse, con toda seguridad, durante su vida útil. Como medida adicional, es conveniente en tal caso la instalación de dispositivos para monitorizar de forma continua la subsidencia del suelo o las deformaciones de las estructuras.

Las técnicas constructivas buscarán, en general, apoyar las estructuras sobre porciones de terreno firme, bien fuera de los márgenes de la dolina (haciendo un efecto puente sobre ella) o bien en niveles del subsuelo por debajo de aquéllos que se ven afectados por la karstificación. En el primer caso, la solución extrema es una cimentación de losa continua, con un tamaño superior al diámetro de la dolina, que permita así apoyarla enteramente sobre sus márgenes estables. Si el tamaño de la losa es menor y ésta queda apoyada sobre terreno subsidente, se conseguirá al menos que la edificación se comporte como un bloque rígido y los daños internos queden minimizados. La segunda opción son las cimentaciones

profundas (pilotajes), que transmiten la carga de la estructura a niveles de alta capacidad portante bajo las cavidades y conductos kársticos. En el entorno de Zaragoza hay ejemplos en los que ha llegado a descender hasta más de 50 m de profundidad.

Las soluciones técnicas deberán basarse siempre en estudios geológicos y geotécnicos cuidadosos, orientados no a la simple caracterización geomecánica del terreno superficial, sino a la detección de las cavidades subterráneas y sus posibles rellenos. Tal y como indica la Norma Tecnológica de la Edificación, los preceptos comunes de la misma no son de aplicación “en los terrenos con precedentes de oquedades subterráneas naturales o artificiales”, en los que se hace obligatoria una investigación específica. Ésta debe incluir reconocimientos geológicos y geomorfológicos, prospección geofísica y sondeos mecánicos que permitan conocer con suficiente detalle las anomalías del subsuelo. Un estudio geotécnico convencional puede caracterizar, por ejemplo, terrenos de gravas cementadas que constituirían aparentemente un apoyo seguro para una cimentación superficial. Sin embargo, su elevada resistencia es engañosa si se ubica en un contexto de karst aluvial, ya que bajo ellas pueden existir cavidades que irán probablemente agrandándose hasta producirse el colapso súbito de la bóveda.

ALGUNAS REFLEXIONES FINALES

Nuestra *sociedad del conocimiento* tiene derecho a estar informada, entre otras cosas, de los riesgos que asume ante fenómenos naturales como el karst. A partir de estudios técnicos de zonificación de la peligrosidad (distribución espacial de fenómenos kársticos constatados, y valoración de la susceptibilidad en áreas donde éstos no se hayan manifestado), la planificación urbanística debería excluir de la calificación de suelo urbanizable las zonas donde existe subsidencia activa, y establecer requisitos especiales a los proyectos de construcción en aquellas otras donde exista un grado de peligro apreciable. No se trata de adoptar una actitud alarmista, pero sí de proceder de una forma responsable para incrementar la seguridad de las personas y de los bienes públicos y privados, evitando pérdidas económicas innecesarias.

Por otra parte, nuestra sociedad se ha acostumbrado a que la técnica acepte todos los retos que la naturaleza le plantea y, en muchos casos, salga victoriosa. Pero no siempre es así. Todo es relativamente sencillo mientras la plataforma de una obra lineal o el terreno sobre el que se sustenta una cimentación pueden describirse en términos de propiedades físicas cuantificables. El especialista en geotecnia, tanto sea geólogo como ingeniero, conoce perfectamente los procedimientos para muestrear y ensayar ese terreno y expresar los resultados en términos numéricos. Pero ese enfoque puede no ser útil cuando en el terreno se desarrollan procesos dinámicos de difícil cuantificación y previsión. Ahí los criterios puramente geotécnicos no sirven, y se hace necesaria la consideración y la comprensión

de los procesos geológicos como tales. Ya no es un problema exclusivamente 'técnico'; es un problema 'científico'.

En definitiva, se requiere un enfoque científico para conocer a fondo un fenómeno natural que implica procesos interconectados controlados por la litología, estructura, morfología, hidrología, hidroquímica y reología del terreno. Un fenómeno complejo, por tanto, que debe ser abordado desde una óptica pluridisciplinar. Se requiere también un enfoque técnico; en primer lugar, al servicio del objetivo científico, por cuanto debe proporcionar a estas herramientas de exploración y caracterización (geofísica, sondeos, ensayos...); en segundo lugar, para traducir a recomendaciones y parámetros de diseño los resultados científicos. Y se requiere, finalmente, un enfoque pragmático guiado por el sentido común y la prudencia, para manejar el problema sin exponer a las personas ni a los bienes a riesgos innecesarios, y sin menospreciar los costes que, tarde o temprano, acarrearán tales desafíos.

BIBLIOGRAFÍA

- Arlegui, L.E. y Simón, J.L. (2000). Fracturación y campos de esfuerzos en el Cuaternario del sector central de la Cuenca del Ebro (NE España). *Cuaternario y Geomorfología*, 11-20.
- Arlegui, L.E. y Soriano, M.A. (1998). Characterizing lineaments from satellite images and field studies in the central Ebro basin (Spain). *Int. J. Remote Sensing*, 19, 3169-3185.
- Arlegui, L.E. y Soriano, M.A. (2003). An example of a comparison between Thematic Mapper and radar images in the central Ebro basin. *Int. J. Remote Sensing*, 24, 457-474.
- Benito, G., Pérez, P., Gutiérrez, M. y Sancho, C. (1995). Natural and human-induced sinkholes in gypsum terrain and associated environmental problems in NE Spain. *Environmental Geology*, 25, 156-164.
- Cooper, A.H. (1998). Subsidence hazards caused by the dissolution of Permian gypsum in England: geology, investigation and remediation. En: *Geohazards in Engineering Geology* (Eds. J.G. Maund y M. Eddleston), Engineering Geology Special Publication 15, Geological Society, London, 265-275.
- Galve, J.P., Bonachea, J., Remondo, J., Gutiérrez, F., Guerrero, J., Lucha, P., Cendrero, A., Gutiérrez, M. y Sánchez, J.A. (2008). Development and validation of sinkhole susceptibility models in mantled karst settings. A case study from the Ebro valley evaporite karst (NE Spain). *Engineering Geology*, 99:185-197.
- Gutiérrez, F., Guerrero, J. y Lucha, P. (2008). A genetic classification of sinkholes illustrated from evaporite paleokarst exposures in Spain. *Environ. Geol.* 53, 993-1006.
- Luzón, A., Pérez, A., Soriano, M.A. y Pocoví, A. (2008). Sedimentary record of Pleistocene paleodoline evolution in the Ebro basin (NE Spain). *Sedimentary Geol.*, 205,1-13.
- Mochales, T., Casas, A.M., Pueyo, E.L., Pueyo, O., Román, M.T. Pocoví, A., Soriano, M.A. y Ansón, D. (2008). Detection of underground cavities by combining gravity, magnetic and ground penetrating radar surveys: a case study from the Zaragoza area (NE Spain). *Environmental Geology*, 53, 1067-1077.
- Simón, J.L., Soriano, M.A., Arlegui, L., Casas, A., Liesa, C., Pocoví, A., Gracia, J. y Salvador, T. (2004). Subsistencia por dolinas aluviales en el nuevo corredor ferroviario al oeste de Zaragoza: propuesta de una escala de peligrosidad. *Geotemas*, 6, 371-374.
- Simón J.L., Soriano M.A., Arlegui L., Gracia J., Liesa C. y Pocoví A. (2008). Space-time distribution of ancient and active alluvial karst subsidence. Examples from the central Ebro Basin, Spain. *Environmental Geology*, 53,1057-1065.
- Soriano, M.A. (1990). *Geomorfología del sector centro-meridional de la Depresión del Ebro*. Diputación Provincial de Zaragoza, 269 pp.
- Soriano, M.A. y Simón, J.L. (1993). Modelo a escala reducida del desarrollo de dolinas aluviales. *Enseñanza de la Ciencia de la Tierra*, 1.3, 201-203.
- Soriano, M.A. y Simón, J.L. (1995). Alluvial dolines in the central Ebro basin, Spain: a spatial and developmental hazard analysis. *Geomorphology*, 11, 295-309.
- Soriano, M.A. y Simón, J.L. (1997). Analogue models of alluvial doline development. *Géologie Méditerranéenne*, 24, 3-13.
- Soriano M.A. y Simón J.L. (2002). Subsidence rates and urban damages in alluvial dolines of the Central Ebro basin (NE Spain). *Environmental Geology*, 42, 476-484.
- Soriano M.A., Simón J.L., Gracia, J. y Salvador, T. (1994). Alluvial sinkholes over gypsum in the Ebro basin (Spain): genesis and environmental impact. *Hydrological Sciences Journal*, 39, 257-268.
- Walker, M.J.C., Björck, S. y Lowe, J.J. (1999). Isotopic 'events' in the GRIP ice core: a stratotype for the Late Pleistocene. *Quaternary Science Reviews*, 18, 1143-1150. ■

Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 16 de enero de 2009 y aceptado definitivamente para su publicación el 5 de junio de 2009.