

PROBLEMAS CAUSADOS POR EL KARST ALUVIAL EN EL CENTRO DE LA CUENCA DEL EBRO (ESPAÑA)

**SORIANO MARÍA ASUNCIÓN, SIMÓN JOSÉ LUIS,
ARLEGUI LUIS EDUARDO, LIESA CARLOS LUIS Y
POCOVÍ ANDRÉS**

Departamento de Geología. Facultad de Ciencias. Universidad de Zaragoza.
50009 Zaragoza. España.

RESUMEN

Durante el Terciario, el centro de la cuenca del Ebro (NE de España) se rellenó por materiales detríticos en sus márgenes y de precipitación química en el centro (evaporitas y carbonatos) en régimen endorreico. Las etapas de erosión-acumulación cuaternarias en régimen exorreico causaron el vaciado de la cuenca y el desarrollo de niveles de terrazas y glaciés de acumulación que recubren parcialmente al Terciario.

Como consecuencia de procesos de disolución de los yesos (y posterior hundimiento de la cubierta cuaternaria) se desarrollan en esta zona un gran número de formas kársticas, principalmente, dolinas.

Desde los años 70, terrenos dedicados tradicionalmente a agricultura en esta parte del valle del Ebro se han utilizado para edificar construcciones industriales y viviendas, produciéndose un aumento de los riesgos causados por la karstificación. Los problemas son muy abundantes y afectan a edificios, carreteras, autopistas, ferrocarril (convencional y de alta velocidad), redes de abastecimiento de agua, . . . Los hundimientos pueden ser repentinos (colapsos) o lentos, con tasas de hundimiento comprendidas entre 12 y 120 mm/año.

El Ayuntamiento de Zaragoza nos encargó elaborar un mapa de peligrosidad de karst en varios sectores del término municipal para considerarlo en el plan de ordenación urbana. La distribución espacial del fenómeno (determinada mediante fotografías aéreas y estudios de campo) constituye una aproximación al problema. No obstante, al ser un proceso activo, zonas que actualmente no presentan dolinas pueden tenerlas posteriormente. Por ello, será necesario completar los estudios con métodos directos (sondeos mecánicos) y también indirectos, tales como GPR (limitada profundidad y gran precisión), prospección sísmica de alta resolución, microgravimetría (que no ofrece tanta resolución pero abarca mayor profundidad). Por ello en un estudio regional lo más efectivo es combinar varias de esas técnicas en aquellas zonas que presenten mayores problemas.

INTRODUCCIÓN

El karst es un proceso que está cobrando gran transcendencia, no sólo por las características singulares que imprime al paisaje, sino también por constituir un factor de riesgo importante a la hora de afrontar la ordenación o planificación del territorio. 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 a 20° es de 2,5 g/l mientras que la de las calizas es 1,5 mg/l. (Klimchouk, 1996). Esto significa que puede desarrollarse karst sobre yesos con gran rapidez, a escala de decenas de años (Cooper, 1998 y Cooper y Waltham, 1999), incluso en zonas semiáridas en que la precipitación es escasa. Las formas kársticas que se desarrollan varían en escala desde nano a macroformas (Forti, 1996 y Macaluso y Sauro,

1996) y se encuentran bajo condiciones climáticas muy variadas y en todo el mundo. El riesgo causado por el karst en yesos es todavía mayor cuando éste aparece cubierto por materiales detríticos, independientemente de cuál sea el origen de los mismos. Dentro de todos los modelados kársticos, las formas más representativas (a escala media) son, sin ninguna duda, las dolinas. En el desarrollo de las dolinas generadas a partir de yesos con cobertera detrítica actúan dos procesos fundamentales: (a) disolución del yeso por agua subterránea y (b) arrastre de los materiales por los que está recubierto. Dependiendo de cómo sean los tipos de materiales de la cubierta, cohesivos o poco cohesivos, su respuesta es diferente; colapso rápido en el primer caso y hundimiento lento en el segundo (Yuan, 1988; Benito et al. 1995; Buttrick y van Schalkwyk, 1998). En ocasiones, también cobra importancia otro proceso, el piping. En este trabajo se muestran los problemas y los estudios que se han llevado a cabo en el sector central de la Cuenca del Ebro (noreste de España) sobre este tema. Se expone la metodología empleada para la detección y cartografía de áreas peligrosas, se discuten los procesos y factores que intervienen en la subsidencia, se cuantifican las tasas de hundimiento y se describen las pautas de evolución. Los problemas han aumentado en los últimos años como consecuencia de la construcción de nuevas redes de comunicación en este sector; alguna de ellas tan importante como la línea ferroviaria de alta velocidad (AVE) que unirá Madrid con Barcelona. En su trazado, en las proximidades de la ciudad de Zaragoza, atraviesa áreas en que existe paleokarst (visible en los taludes abiertos para el tren) y también campos de dolinas actuales y funcionales (Simón et al, 2003). En algunas de estas zonas valoraremos con más detalles la peligrosidad de hundimientos.

1. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS

La zona estudiada se encuentra en el centro de la Cuenca del Ebro, en el NE de la Península Ibérica. Tiene forma aproximadamente triangular, limitada por las cordilleras Pirenaica, Ibérica y Catalana. (Figura 1) La edad de los materiales aflorantes es Oligoceno-Mioceno. Incluyen rocas sedimentarias con facies detríticas, evaporíticas y carbonatadas cuyo origen es fluvial (proceden de la erosión de los Pirineos, principalmente) y lacustre. Se depositaron durante el periodo en que las condiciones de la cuenca eran endorreicas (Quirantes, 1987; Riba et al. 1983) La estructura de los materiales es muy simple: estratos subhorizontales o con buzamientos muy suaves, a excepción de las áreas próximas a los márgenes; donde abundan los cabalgamientos, o aquellas otras en que existen deformaciones de tipo diapírico (Solé, 1953; Simón y Soriano, 1986).

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. Este hecho conlleva que a lo largo del Cuaternario el encajamiento de la red de drenaje provoque el vaciado de los materiales previos formando relieves estructurales. Al mismo tiempo se desarrollaron niveles de terrazas aluviales y de glaciares recubriendo a los materiales neógenos. En esta zona hay ocho niveles de terrazas, de los que los cuatro más recientes son los que afloran con mayor extensión. Las alturas relativas sobre el cauce del río son de: $T_1=3-6$ m, $T_2=10-14$ m, $T_3=29-34$ m y $T_4=64-73$ m. El Cuaternario está constituido por niveles de gravas, arenas y limos en los que se observan estructuras sedimentarias variadas (estratificación horizontal, cruzada, imbricación de cantos, etc). Con frecuencia a techo de los depósitos de terraza se encuentran costras carbonatadas.



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

2. CARACTERÍSTICAS GENERALES.

2.1. Paleokarst.

En las numerosas canteras y trincheras abiertas en niveles cuaternarios antiguos correspondientes a la terraza T_4 y al glacis G_4 del río Ebro (Soriano, 1990) se ha detectado la presencia de rellenos de materiales cuaternarios que corresponden a un paleokarst de los yesos terciarios. La morfología de esos rellenos es variada, pudiendo diferenciarse cuatro tipos fundamentales:

- (1) Rellenos con gran profundidad en relación a su anchura y paredes limitantes verticales o subverticales (tubulares) (Figura 2a). El material cuaternario puede tener cierta ordenación o ser caótico. Son conductos de disolución dentro de los yesos. A veces la parte superior del depósito está sin deformar, lo que implica que son sin-sedimentarios.
- (2) Colapsos en embudo en que la anchura es mayor que en el caso anterior y las paredes limitantes tienen pendientes menores. Normalmente hay una unidad inferior más yesífera y una superior más limosa (Figura 2b). La superficie de separación es irregular, con embudos de escala variable, y el material superior penetra en el embudo mostrando ondulaciones que se atenúan a techo.
- (3) Se han reconocido estructuras en bóvedas, que afectan a yeso, margas y limos. Hay paredes con contrapendientes muy marcadas que limitan la masa que ha colapsado. Ésta suele tener bloques con una disposición caótica.
- (4) Deformaciones de los sedimentos con morfología sinclinal no atribuible a causas tectónicas. Suelen aparecer por encima de cualquiera de los tres tipos anteriores, allí donde la deformación va atenuándose.

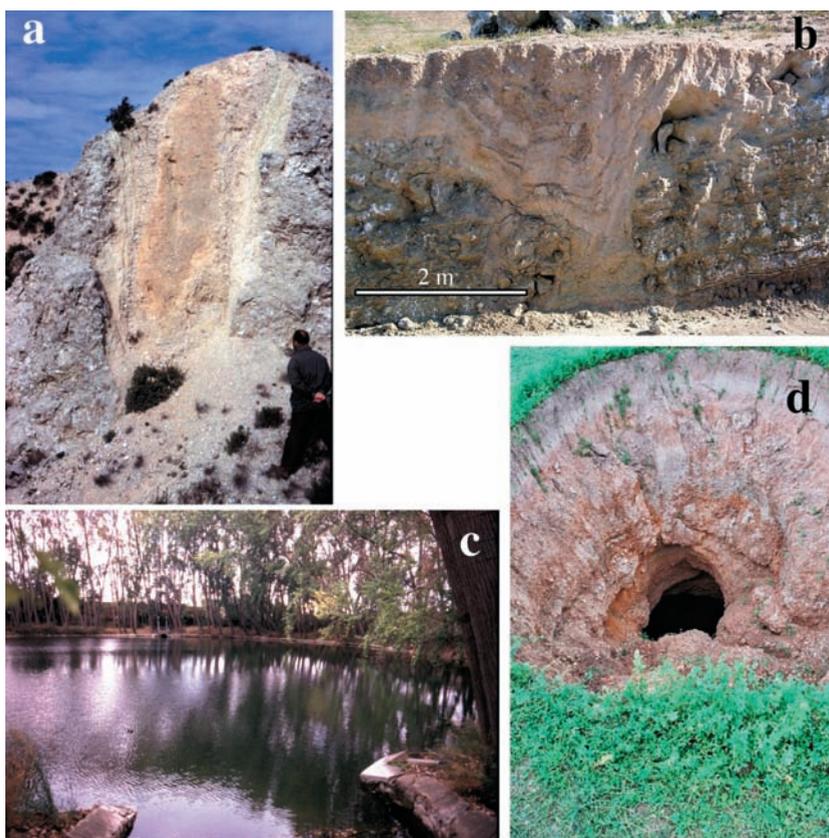


Fig. 2 – a. Colapso tubular. El relleno corresponde al nivel de glacis G4. b. Colapso con forma de embudo. El relleno corresponde al nivel G4 y presenta pequeñas fallas. c. Dolina parcialmente rellena de agua. d. Dolina de colapso producida en septiembre de 2003. Su profundidad alcanza 16 m.

2.2. Dolinas aluviales.

Las dolinas aluviales de este entorno se desarrollan sobre todo en los niveles de terrazas fluviales inferiores del río Ebro (Figura 3). También se observan en niveles de glacis que se dirigen hacia el cauce del río desde los relieves estructurales terciarios, pero son menos abundantes y no afectan a zonas urbanizadas.

Donde hay un mayor número de dolinas es en los niveles T_2 y T_3 . La morfología de las mismas es variada y corresponden, según la clasificación de Cvijic (1893), a dolinas en cubeta, embudo y ventana. Los tamaños oscilan entre 10 y 100 m de diámetro y de 1 a 20 m de profundidad. En planta tienen forma redondeada o elíptica (Figura 2c y 2d). Hay otras cuyo contorno es más irregular como consecuencia de la unión de varias depresiones y que llegan a superar los 1000 m de longitud máxima (Soriano, 1990; Soriano y Simón, 1995). En ocasiones se encuentran parcialmente rellenas de agua por estar su base por debajo del nivel freático (Figura 2c).

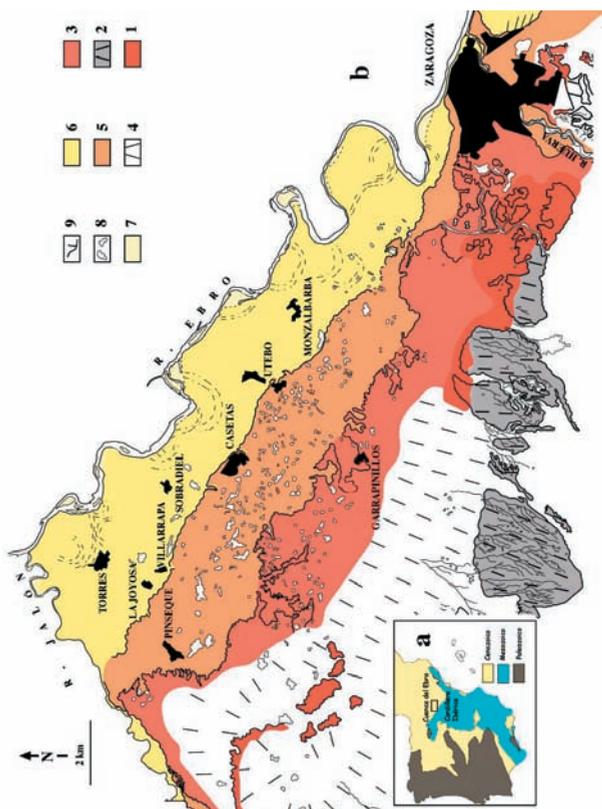


Fig. 3 - Mapa geomorfológico del noroeste de Zaragoza (a partir de las fotografías aéreas de 1957). 1: Terraza T4. 2: Glacis relacionado con T4. 3: Terraza T3. 4: Glacis relacionado con T3. 5: Terraza T2. 6: Terraza T1. 7: Barras actuales del río. 8: Dolinas. 9: Barrancos.

3. VARIACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LAS DOLINAS

Ya hemos señalado la actividad que tiene el proceso kárstico en el entorno de la ciudad de Zaragoza y que viene reflejado por la formación continua de nuevas dolinas en superficie. Se ha llevado a cabo un seguimiento de los cambios que han tenido lugar en la distribución y evolución de dolinas a lo largo de unos cincuenta años. Para ello se ha recurrido a diferentes metodologías (Soriano y Simón, 2002).

En primer lugar, la utilización de fotografías aéreas. En esta área existen fotografías aéreas desde la primera mitad del siglo XX que permiten cartografiar con precisión la distribución de dolinas. Se han elaborado cartografías a partir de imágenes de 1947, 1957, 1970, 1982, 1986, 1987, 1988 y 1993 que presentan escalas diversas, desde 1:43.000 para las más antiguas a 1:3.500 para la más moderna) y se han unificado a una escala común. Las más antiguas, a pesar de tener menos detalle como consecuencia de su menor escala, tienen la ventaja de mostrar la morfología del terreno anterior a las modificaciones importantes producidas a partir de los años 70.

En segundo lugar, las campañas de campo que se han realizado en diferentes periodos de tiempo, y en las que se han abordado varias tareas: (a) comprobación de que la información conseguida a partir de las fotografías aéreas era correcta; (b) búsqueda de otras dolinas que no identificadas en el estudio fotogeomorfológico, bien por sus dimensiones o porque el tiempo en que se formaron no coincide con el de las fotogra-

fías; (c) entrevistas con los habitantes de las zonas afectadas; (d) observación de daños que se manifiestan en las edificaciones construidas sobre antiguas dolinas; (e) seguimiento detallado de tres de ellas para determinar su velocidad de hundimiento.

3.1. Cambios espaciales.

Mediante los estudios llevados a cabo se ha observado una variación en el tamaño y en el número de dolinas a lo largo del tiempo. Hay dolinas que no se detectan a partir de cierta fecha, pero también se generan otras nuevas. La explicación a la desaparición de las depresiones es la actividad humana. Cuando el terreno se dedica a la explotación agrícola, son rellenadas para seguir utilizándolo. Sin embargo, el mayor cambio se produjo a partir de 1970 cuando el área oeste de la ciudad de Zaragoza pasó a convertirse en terreno industrial. Se rellenaron las irregularidades topográficas existentes, lo que conllevó la desaparición “aparente” de buena parte de las dolinas de esa zona, y se edificó sobre ellas. Aproximadamente 10-15 años después de su construcción, en muchos de estos edificios comenzaron a aparecer daños de diversa consideración, lo que significa que el proceso sigue activo. Cuando se realiza su comparación con las antiguas cartografías de dolinas se aprecia que la mayoría de las zonas dañadas (un 90%) se sitúan dentro o muy próximas a las detectadas mediante las fotografías aéreas. Los daños identificados en estas campañas son de diverso tipo:

- Fracturas en paredes. Estudiando su geometría se puede identificar la dirección hacia donde se encuentra el centro de hundimiento.
- Fracturas en suelos y carreteras. Con frecuencia tienen morfología curvada, lo que también permite saber dónde están los centros de hundimiento.
- Depresiones cerradas (sin que lleguen a formarse fracturas) en suelos o carreteras.
- Deformación de los edificios. Cuando están afectados pilares maestros se inclina parte o todo el edificio.

La cartografía detallada de estos daños permite determinar su geometría y establecer en muchos casos dónde se sitúa su centro de hundimiento. Además, al haber hecho un seguimiento de varias de estas zonas, se ha comprobado que la extensión de las áreas afectadas se va modificando. En unos casos se amplía; en otras hay una disminución de la actividad de un antiguo centro de hundimiento mientras hay un incremento notable en una zona contigua.

3.2. Evolución temporal.

Para determinar esos cambios en el tiempo han sido de especial utilidad las tareas de campo descritas en los puntos (c), (d) y (e). Las campañas exhaustivas de campo se llevaron a cabo, sobre todo, en los años 91 y 98, y de zonas más concretas en el 1999, 2003 y 2004. Para estimar la velocidad de hundimiento se han tenido en cuenta los datos de las reparaciones llevadas a cabo en repetidas ocasiones en muchas de las construcciones afectadas, y aquéllos resultantes del seguimiento detallado de tres dolinas a lo largo de más de cuatro años.

Con la información obtenida se han calculado velocidades de hundimiento de 12-120 mm/año, a partir de los datos de reparaciones de construcciones, y de 24-92 mm/año, a partir de las mediciones efectuadas por nosotros. Como puede verse los datos son coherentes independientemente de la procedencia (Figura 4).

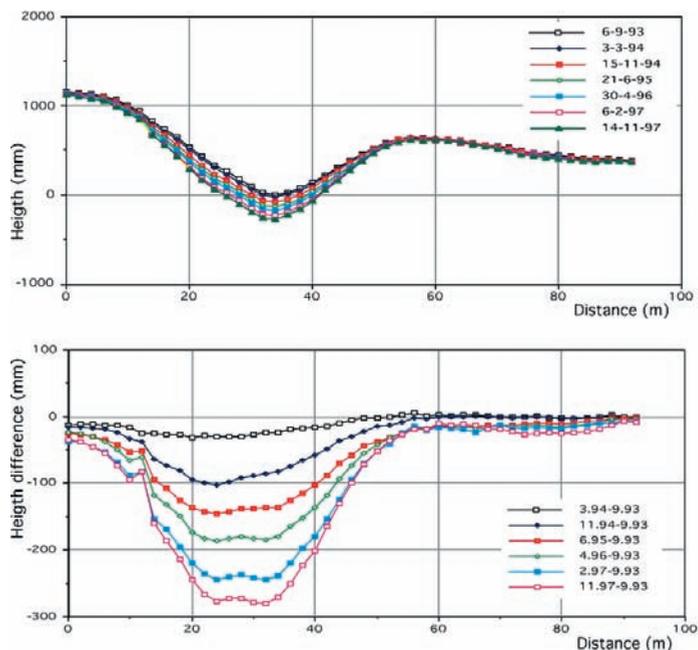


Fig. 4 - Perfiles topográficos detallados de una dolina desde septiembre de 1993 a noviembre de 1997. El superior es el perfil real y el inferior los graduales tomando como referencia el perfil más antiguo (septiembre de 1993).

Además de las zonas en que se produce hundimiento lento por la disolución, hay que recordar aquéllas en que tras la disolución se produce una caída brusca de la cubierta cuaternaria. Hay datos de este fenómeno en puntos dispersos. En unas ocasiones se produce un hecho aislado y en otras se repite el colapso en el mismo lugar. En el año 2002 se produjeron dos hundimientos repentinos (de 20 y 3 m de profundidad) en las afueras de la ciudad, muy próximos a los cinturones de circunvalación urbano y de autopista. En el 2003 se generaron de nuevo cuatro, el primero en la vía del ferrocarril convencional (ver figura 6), el segundo en una carretera secundaria, el tercero a unos 500 m de la vía del AVE que es el de mayores dimensiones con 16 m de profundidad (Figura 2D) y el cuarto en una calle de un área industrial. De aquéllos que se producen de forma recurrente en la misma zona, los mejor documentados se han producido en el km 292,500 de la autopista Vasco-Aragonesa, con cinco eventos en un lapso de once años (1981, 1983, 1984, 1984 de nuevo y 1991) alguno de los cuales superó los 3 m de profundidad

4. RIESGO EN EL ENTORNO DE LA CIUDAD DE ZARAGOZA

Ya hemos señalado que la presencia de dolinas es conocida desde hace tiempo en esta zona de la Cuenca del Ebro. Mientras la región era eminentemente agrícola, los problemas que causaban no eran excesivamente importantes. Muchas de ellas, si estaban inundadas, se mantenían en su estado natural, lo que suponía la pérdida de terrenos aptos para el cultivo. En otros casos, si eran depresiones suaves, se seguía cultivando en ellas y se rellenaban con relativa frecuencia para contrarrestar el efecto de la subsidencia. En algunas áreas al este de Zaragoza era tan frecuente la apertura repentina

de colapsos (con participación importante de piping) que los agricultores iban con una gran vara atada sobre los hombros para que en el caso de que se hundiera el terreno ésta quedara apoyada en el borde de la depresión. Cuando las extensiones afectadas eran muy grandes se llegó a construir canales de drenaje para eliminar ese exceso de humedad y sanear el terreno.



Figura 5. a. Deformación que afecta a una nave industrial (1 en figura 6). b. Colapso en el interior de una nave industrial al NW de Zaragoza. c. Estructura interna de una dolina contigua a la vía del AVE (2 en figura 6). d. Talud de las líneas ferroviarias que atraviesan una dolina (3 en figura 6). Se observa la terraza cuaternaria deformada y el relleno antrópico.

Fig. 5

Sin embargo, los problemas más espectaculares han surgido a raíz de la urbanización de estas áreas. A partir de entonces las interacciones proceso natural-actividad humana se incrementaron y con ello aumentó el riesgo. En muchos casos simplemente se rellenaron las depresiones existentes y después de compactar el terreno se edificó sin atenderse a ninguna norma constructiva especial. En los años 70, fuera del ámbito de la Geología, no se conocía que la presencia de depresiones en la superficie es simplemente la manifestación de un fenómeno activo que ocurre en el subsuelo y que no se detiene aunque se rellenen esas depresiones. Con todo ello, bastantes de las construcciones que se realizaron (edificios e infraestructuras) se vieron afectadas por la presencia de grietas, fracturas, hundimientos progresivos (Figura 5a) o repentinos del suelo (Figura 5b), rotura de conducciones de agua, etc. Todo ello ha causado graves pérdidas económicas por los costes en reparaciones (que en general no han erradicado el problema) y las demoliciones de edificios que han sido necesarias en casos extremos. Afortunadamente hasta el momento todos estos daños no han causado víctimas humanas.

Los técnicos del Ayuntamiento de Zaragoza tomaron conciencia de este problema a principios de los años 90, debido sobre todo a la rotura repetida de una tubería de abastecimiento de agua. A partir de entonces se realizaron diversos estudios (Gracia et al., 1991; Simón et al., 1998a; 1998b; Simón et al., 2003) enfocados a delimitar las zonas de mayor peligro para tenerlas en cuenta en la revisión del Plan General de Ordenación Urbana. De hecho, se han restringido algunas zonas consideradas inicialmente como urbanizables al estar afectadas por peligro de subsidencia.

Ante problemas de este tipo hay soluciones constructivas que pueden evitar o paliar el riesgo de colapso repentino, que es sin duda el más imprevisible. Pero esas medidas implican el encarecimiento de la obra, con la repercusión posterior sobre el consumidor. En este ámbito, la mayor polémica suscitada recientemente se relaciona con la construcción del tren de alta velocidad (AVE) que unirá Madrid y Barcelona. A su paso por las cercanías de Zaragoza (a lo largo de unos 30 km), el tren cruza áreas en que se detecta paleokarst. En el corredor ferroviario construido para hacer su entrada a Zaragoza, y en un tramo de unos 3 km de longitud, el AVE atraviesa zonas de karst activo (un 10% de esta longitud) en las que hay un peligro real de hundimiento alto (Figura 5c y 5d). Son zonas en que se han identificado sin ninguna duda dolinas en diversas fotografías aéreas y en campañas de campo, algunas de las cuales registran actualmente tasas de hundimiento de cerca de 10 cm/año. El entorno de las zonas con dolinas debe ser considerado también como peligroso por la evolución que estas presentan, lo que hace que se incremente la fracción del trazado con problemas potenciales en otro 20% más (Figura 6).

El 1 de marzo de 2003 se produjo un hundimiento en la vía del ferrocarril convencional que en este tramo discurre contigua a la del AVE. Oficialmente se atribuyó a las obras de hinca de un colector que se estaban realizando bajo las vías. Sin embargo, las primeras fotografías que se tomaron y que fueron publicadas muestran la existencia de una cavidad de paredes netas e irregulares que se adentra por debajo del nivel de base del colector, lo que parece incompatible con la morfología que tendría un embudo formado por la evacuación de gravas sueltas desde la galería excavada. Parece, por tanto que la cavidad existía con anterioridad y que su origen es natural.

5. METODOLOGÍA DE ESTUDIO.

No hay una sola forma de estudiar las dolinas. La forma idónea de hacerlo es mediante la combinación de diversas técnicas y metodologías relacionadas con Geología, Geomorfología, Geotecnia, Hidrogeología, Geofísica, etc.

- (1) Como estadio básico, es preciso delimitar la zona en que se manifiesta el fenómeno. Para ello hay que realizar una cartografía geomorfológica lo más detallada posible para identificar las dolinas que se reconocen en superficie. Para ello se utilizan fotografías aéreas y se llevan a cabo campañas de campo. Ahora bien, en ambos casos se obtiene una información "estática", es decir, del momento en que se ha realizado la observación.. Lo ideal es tener, no un fotograma de la película, sino un buen número de ellos, lo que se consigue en parte con fotografías aéreas tomadas con intervalos de varias decenas de años. Puesto que el karst en yesos es un proceso rápido, esto permite ver cuál ha sido su evolución en ese tiempo. Las primeras cartografías no son suficientes; debido a la actividad continuada, es preciso realizar un seguimiento periódico y constante que permita actualizar y modificar (caso de ser necesario) la información disponible.
- (2) La tendencia evolutiva de las dolinas aluviales es el crecimiento de su superficie, la migración de los centros de hundimiento y la generación de otros nuevos. Hay diversos factores que en unos casos favorecen y en otros inhiben el desarrollo de dolinas (espesor de la cubierta aluvial, variaciones del nivel freático, forma del contacto entre el material karstificable y la cobertera, características geotécnicas de ésta, etc). Es necesario conocer la variación espacial de estos factores, ya que aportan indicaciones sobre las zonas hacia las que puede evolucionar en el futuro el karst. En definitiva, delimitan las áreas de peligrosidad potencial de este fenómeno. Al igual que en las cartografías anteriores, será preciso completar la información conforme se dispongan de nuevos datos lo que puede modificar la predicción que se pretende realizar.

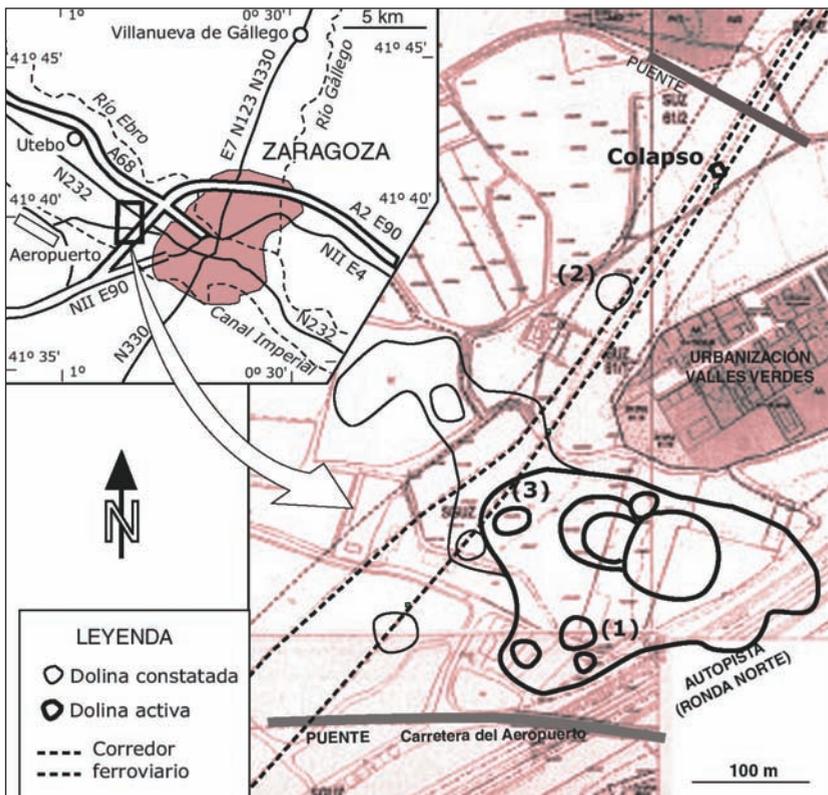


Fig. 6 - Mapa de detalle de las dolinas existentes en el corredor ferroviario próximas al colapso producido el 1 de marzo de 2003.

(3) Otro aspecto importante es la respuesta geomecánica de la cobertera ante la existencia de una cavidad bajo ella. La información que hay es muy puntual, incompleta, no es homogénea ni se ha efectuado una recopilación de la misma. Además tampoco existen modelos de referencia elaborados con las condiciones que imperan en la cuenca del Ebro. En consecuencia, aunque los procesos en líneas generales se conocen, la posibilidad de hacer predicciones evolutivas es actualmente muy limitada.

(4) Un área puede estar karstificada pero sin que todavía se aprecie esa disolución en el exterior. Por ello la detección precoz de cavidades mediante métodos de prospección geofísica antes de que se transmita ese vacío hacia la superficie, adquiere gran importancia. Los diversos métodos existentes (Ground Penetrating Radar, prospección sísmica de reflexión de alta resolución, microgravimetría, tomografía eléctrica) presentan ventajas e inconvenientes relacionados con las propiedades utilizadas, con el nivel de resolución y alcance de cada técnica y con las interpretaciones de los resultados (puede haber varias). En el caso de las dolinas de los alrededores de Zaragoza, las profundidades a las que se sitúan, así como el volumen de las mismas, hace que la microgravimetría sea en principio el método más indicado. Podría ser una técnica muy efectiva en un estudio preliminar orientado a definir los sectores de mayor peligrosidad, ya que las profundidades moderadas (unas decenas de metros) a que se encuentran las cavidades y el contraste de densidades alto muestran (según modelizaciones) anomalías que serían perfectamente registradas por los instrumentos de medida. Posteriormente deberían aplicarse otros métodos de registro continuo del subsuelo a lo largo de perfiles (georadar, sísmica de reflexión, tomografía eléctrica), y realizar la interpretación final una vez comparados los resultados de todos ellos.

6. PREVENCIÓN DE RIESGOS.

Mediante estas etapas básicas se delimitarán aquellas zonas de mayor peligro de generación de dolinas. Serán, por tanto, donde deberá evitarse la edificación y el trazado de infraestructuras y conducciones.

Si se desea construir edificaciones o infraestructuras en las zonas con elevada peligrosidad potencial (es decir zonas próximas a áreas identificadas como kársticas o en las que confluyen diversos factores que pueden causar el desarrollo de dolinas), será preciso realizar estudios de detalle que permitan zonificar y valorar la presencia y distribución de posibles focos de hundimiento no manifestados claramente en superficie. Dichos estudios no deben ir orientados a la simple caracterización geotécnica del terreno superficial, sino que deben incluir campañas de sondeos mecánicos y reconocimientos geológicos, geomorfológicos y estudios geofísicos adecuados que permitan abordar el problema en profundidad.

Si no puede evitarse construir en este tipo de zonas, y siempre tras realizar los preceptivos estudios geológicos y geotécnicos, diseñar cimentaciones profundas (pilotajes) adecuadas a la peligrosidad de cada caso. El riesgo habrá de ser minimizado (para un plazo de tiempo razonable de acuerdo con la durabilidad de la estructura) buscando apoyar siempre tales cimentaciones en niveles firmes bajo los que esté descartada la existencia de oquedades. Cualquier construcción 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, sería conveniente en tal caso la instalación de dispositivos para detectar y controlar las deformaciones de las estructuras o la subsidencia del suelo de forma continuada.

En zonas agrícolas y ajardinadas hay que evitar su riego excesivo dentro de todas aquellas áreas de elevada peligrosidad. En estas condiciones una opción es hacer jardines de tipo árido o mediterráneo cuya necesidad de agua es muy pequeña. Otra posibilidad es utilizar este tipo de zonas como espacios deportivos pavimentados. En cuanto a la red de abastecimiento y saneamiento hay que tomar las medidas necesarias para que las fugas que se produzcan en ellas sean mínimas.

No obstante, la solución más razonable pasaría por mantener en estado natural o con las mínimas modificaciones posibles las escasas dolinas que en la actualidad se conservan como tales. Todas ellas pueden tener un papel como espacios verdes singulares dentro de la planificación urbanística y paisajística.

BIBLIOGRAFÍA

- 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.
- BUTTRICK D. y SCHALKWYK VAN, A. (1998) Hazard and risk assessment for sinkhole formation on dolomite land in South Africa. *Environmental Geology*, **36**, 170-178
- COOPER A.H (1998) Subsidence hazards caused by the dissolution of Permian gypsum in England: geology, investigation and remediation. En MAUND y EDDLESTON (eds) *Geohazards in Engineering Geology* **15**, 265-275.
- COOPER A.H. y WALTHAM A.C. (1999) Subsidence caused by gypsum dissolution at Ripon, North Yorkshire. *Quarterly Journal of Engineering Geology* **32**, 305-310.
- CVJIC J. (1893) The dolines: Translation of Geog. *Abhandlungen* **5**, pp. 225-276. En SWEETING M.M. (ed.) 1981 *Karst Geomorphology*. Hutchinson
- FORTI P. (1996) Erosion rate, crystal size and exokarst microforms. En: J. FORNÓS y A. GINÉS (eds) *Karren landforms*. 261-276. Palma de Mallorca.
- 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. Ayuntamiento de Zaragoza.
- KLIMCHOUK A. (1996) The dissolution and conversion of gypsum and anhydrite. *Int. J. Speleol.* **25**, 21-36
- MACALUSO T. y SAURO U. (1996) the karren in evaporitic rocks: a proposal of classification. En: J. FORNÓS y A. GINÉS (eds) *Karren landforms*. 277-293. Palma de Mallorca.
- QUIRANTES J. (1987) Estudio sedimentológico y estratigráfico del Terciario continental de los Monegros. Tesis doctoral. Publicación nº 681 de la Institución Fernando el Católico (CSIC). Zaragoza.
- RIBA O. REGUANT, S y VILLENA J. (1983) Ensayo de síntesis estratigráfica y evolutiva de la cuenca terciaria del Ebro. En: *Geología de España* (Madrid IGME), pp. 131-157.
- SIMÓN J.L. y SORIANO M.A. (1986) Diapiric deformations in the Quaternary deposits of the central Ebro basin, Spain. *Geological Magazine* **123**, 45-57.
- SIMÓN J.L., MARTÍNEZ J. SORIANO M.A., ARLEGUI L. y CABALLERO J. (1998a) Estudio de riesgos naturales en los terrenos de la orla sudoeste de suelo urbanizable. Informe inédito. Ayuntamiento de Zaragoza.
- SIMÓN J.L., SORIANO M.A., ARLEGUI L., CABALLERO J., GRACIA J., SALVADOR T., y SICILIA E. (1998b) Estudio de riesgo de hundimientos kársticos en el corredor de la carretera de Logroño. Informe inédito. Ayuntamiento de Zaragoza.
- SIMÓN J.L., SORIANO M.A., ARLEGUI L., CASAS A., LIESA C., POCOVÍ A., GRACIA J. y SALVADOR T. (2003) Evaluación del riesgo de hundimientos por dolinas en el trazado de las nuevas estructuras ferroviarias en el entorno de Zaragoza (informe complementario). Informe inédito. Ayuntamiento de Zaragoza.

- SOLÉ L. (1953) Terrazas cuaternarias deformadas en la Cuenca del Ebro. Memorias de la Real Academia de Ciencias y Artes, Barcelona, **31**, 239-259.
- SORIANO M.A. (1990) Geomorfología del sector centro-meridional de la Depresión del Ebro. Diputación Provincial de Zaragoza. 269 p.
- 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. (2002) Subsidence rates and urban damages in alluvial dolines of the Central Ebro basin (NE Spain) *Environmental Geology*, **42**, 476-484.
- YUAN D. (1988) Environmental and engineering problems of karst geology in China. *Environ. Geol. Water Sci.* **12**, 79-87.