

Análisis del riesgo kárstico en medios urbanos asentados sobre depósitos aluviales cementados (*mallacán*) en la Cuenca del Ebro (España)

Karstic hazard analysis at urban areas over cemented alluvial deposits (mallacán) in the Ebro Basin (Spain)

Andrés Pocoví Juan¹, Óscar Pueyo Anchuela¹, Alberto Gracia², Antonio M. Casas Sainz¹, Jesús Rico² y Miguel Pérez²

¹ Grupo de Investigación Geotransfer. Universidad de Zaragoza. C/ Pedro Cerbuna 12 50009, Zaragoza, España. apocovi@unizar.es, opueyo@unizar.es, acasas@unizar.es

² Consultores Técnicos Asociados S.A. (CTA.S.A.). agracia@cta-consultores.com, jrico@cta-consultores.com, mperez@cta-consultores.com

ABSTRACT

Active karst processes in urban settings can represent a significant hazard for the population and to buildings and other facilities. In this work, an integrated analysis by means of geophysical survey, surficial analysis and geomechanical tests is presented. The obtained results permit to identify a collapsed geometry where the more sudden hazards are related to the non-collapsed marginal areas of the sinkhole. The geomechanical tests show a high alluvial resistance due to the partial carbonatic cementation with apparent higher stability. However, cementation allows the individualization and the propagation of underground cavities up to near-surface levels being the highest hazard to be analyzed in these contexts.

Key-words: Karst, hazard, geomechanical analysis, GPR.

RESUMEN

Los procesos kársticos en medios urbanos pueden representar un riesgo significativo para la seguridad vial y constructiva. En este trabajo se presenta un estudio integrado de prospección geofísica, análisis superficial y ensayos mecánicos. Se identifica y delimita un dispositivo geométrico de tipo colapso y se aprecia que el mayor riesgo repentino se asocia a sectores marginales del colapso que presenta una orla de cavidades en el subsuelo. Los ensayos geomecánicos muestran una alta compacidad de los materiales naturales parcialmente cementados, lo que podría tomarse como indicador de estabilidad. En realidad, esta compacidad permite el sostenimiento inestable de cavidades propagadas desde el substrato hasta cerca de la superficie, siendo éste el mayor riesgo que aquí se trata de valorar.

Palabras clave: Karst, riesgo, análisis geomecánico, GPR.

Geogaceta, 55 (2014), 67-70.
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 24 de junio de 2013
Fecha de revisión: 22 de octubre de 2013
Fecha de aceptación: 29 de noviembre de 2013

Introducción

Los procesos kársticos activos en medios urbanos representan un riesgo significativo cuando éstos afectan a viales, carreteras o edificios. En estos casos, la identificación de procesos de subsidencia progresiva o catastrófica en superficie suele venir acompañada de una valoración de exclusión de la circulación o acceso a dichos sectores.

Sin embargo, los desperfectos superficiales y sus reparaciones pueden impedir la identificación exacta del riesgo potencial que afecta a la zona o la ponderación del riesgo real en profundidad con independencia de las evidencias superficiales. En estos contextos, pueden desarrollarse procesos de subsidencia tanto progresiva como

catastrófica (propagación de cavidades hacia la superficie de forma repentina).

Las evidencias superficiales dependen de las características y reología de los materiales del subsuelo. Con independencia de los factores desencadenantes del riesgo kárstico, éstos pueden asociarse con la presencia de i) cavidades en el subsuelo, ii) procesos de subsidencia superficial asociados a dolinas de subsidencia por disolución o percolación de materiales no consolidados hacia cavidades más profundas, y iii) colapsos superficiales repentinos o procesos de asentamiento de los materiales de su relleno.

En esta situación, la caracterización detallada del contexto geológico, la tipología de los procesos kársticos, las características de la interacción y comportamiento de los

materiales del aluvial y del substrato de la zona pueden condicionar los resultados. En este trabajo se analiza un área en la localidad de Luceni, situada aguas arriba de la ciudad de Zaragoza y en una situación similar con respecto al cauce actual del Ebro. El substrato mioceno de la zona (Fm. Zaragoza; Quirantes, 1978) está compuesto principalmente por margas y evaporitas (Fig. 1). Las evaporitas más habituales son los yesos y la glauberita, si bien cerca de la localidad de estudio se encuentran yacimientos de halita (Fig. 1).

El sector de estudio se localiza en la orilla derecha del río Ebro, en el sector de escalonamiento entre las terrazas T1, T2 y T3 (Esnaola y Leyva, 1995). Estas terrazas, especialmente a partir de la T2, presentan cementaciones de origen freático que afectan

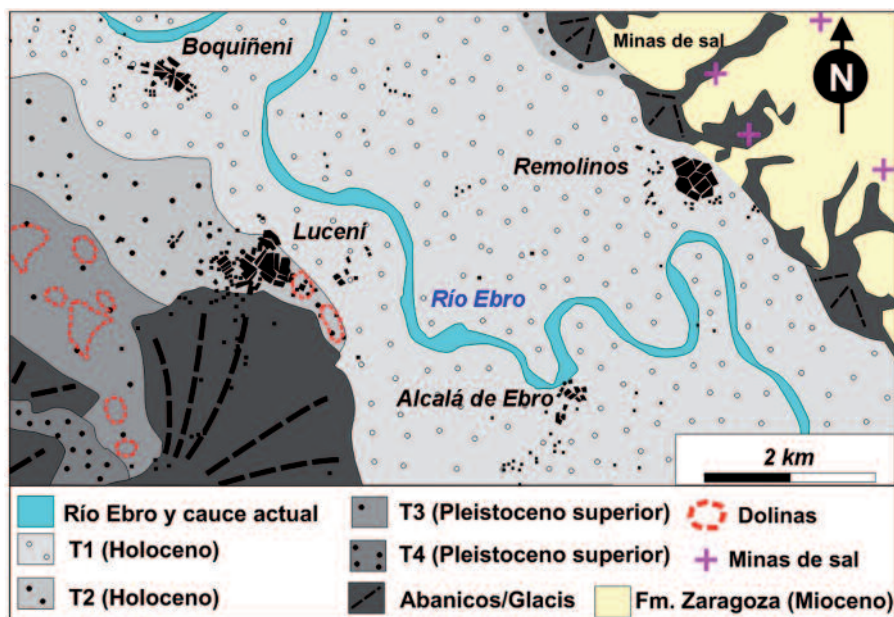


Fig. 1.- Mapa geológico de contexto de la zona de estudio (Esnaola y Leyva, 1995).

Fig. 1.- Context geological map of the studied zone. (Esnaola and Leyva, 1995).

de forma inhomogénea a la cubierta aluvial y producen cambios significativos de su reología. Las evidencias kársticas de la zona muestran la interacción de la sedimentación con la actividad kárstica, con incrementos del espesor de las unidades de gravas en sectores con procesos de subsidencia. Esto implica, en general, comportamientos más rígidos en los sectores con dolinas que en los medios laterales de llanura de inundación o con menor desarrollo de las terrazas

(Ansón *et al.*, 2008). La presencia de cementaciones preferentes en el aluvial ocasiona el desacoplamiento entre la superficie y las unidades karstificadas inferiores.

En este trabajo se presenta un estudio de alta resolución en una calle de Luceni (Fig. 2A,B,C) que está actualmente vedada al paso por procesos de subsidencia (Fig. 2D). Existen fallos estructurales en algunos edificios (Fig. 2E), y colapsos repentinos en el entorno de dicha calle (Fig. 2F). La orla

agrícola de la localidad muestra colapsos repentinos con dolinas en ventana (Fig. 2E; Pueyo Anchuela *et al.*, 2011). Este estudio representa la integración del análisis de perfiles de prospección geofísica por georradar, patologías superficiales, sondeos y ensayos de penetración dinámica.

Metodología

El análisis superficial permite identificar grietas que afectan al pavimento y que definen una zona de subsidencia. Estas patologías delimitaron la zona de estudio para prospección geofísica por georradar. La prospección se realizó a través del muestreo consecutivo por medio de 3 antenas diferentes (100, 250 y 500 MHz, con cambios de la resolución y de la profundidad potencial de análisis). Los perfiles realizados fueron tratados digitalmente para la amplificación de la señal con la profundidad, identificación de la superficie de prospección, filtrado de frecuencia fuera de rango y eliminación de la disposición sinusoidal de la onda (background removal). El cálculo de la velocidad de propagación de las ondas fue realizado a partir del ajuste de hipérbolas de difracción, de forma preliminar, y ajustado con posterioridad con los datos de los ensayos realizados en la zona para los sectores en los que no se disponía de información proveniente de hipérbolas de difracción en el subsuelo.



Fig. 2.- (A) Zona de estudio. Fotografías de la zona de estudio. (A) y (B) Aspecto de la zona de estudio vedada a la circulación. (C) Indicativo vial sobre la peligrosidad de la calle. (D) Aspecto de las edificaciones próximas. (E) Colapso en el entorno urbano. (F) Colapso en suelo agrícola en las proximidades de la zona de estudio.

Fig. 2.- (A) Study area. Photographs of the studied area. (A) and (B) Aspect of the studied zone where access is forbidden. (C) Sign of sinkhole danger. (D) Karst processes affecting a neighboring building. (E) Collapse at the proximity of the studied zone. (F) Collapse in the surroundings of the studied zone.

Los resultados obtenidos permitieron planificar una red de ensayos mecánicos para la caracterización de la estructura y de los materiales. Estos consistieron en sondeos con testificación continua y ensayos de penetración dinámica pesada (DPSH).

Prospección geofísica

La prospección ha consistido en la realización de perfiles de georradar a lo largo de las zonas accesibles de la calle de estudio y repetidos con las distintas antenas. Los resultados obtenidos muestran un límite inferior de penetración similar para los distintos equipos, delimitado por atenuación a los 60 ns y localmente en los 90 ns (Fig. 3).

Los perfiles muestran medios reflectivos subsuperficiales y un límite inferior atenuante. Atendiendo a la geometría de los materiales, se identifica una geometría plano-cóncava a lo largo del perfil de 50 metros en sección, que profundiza hasta los 90 ns. Esta disposición plano-cóncava presenta reflectores netos y anomalías hiperbólicas en sus sectores laterales e inferiores. El límite inferior muestra en el sector septentrional de los perfiles (Fig. 3), una correlación con anomalías con geometría hiperbólica, mientras que en el sector meridional el límite inferior de la geometría no está bien definido y no existen anomalías hiperbólicas. El dispositivo geométrico de los reflectores, para las distintas antenas utilizadas, muestra altos buzamientos para el límite de la sección plano-cóncava. En su interior, los reflectores muestran dispositivos geométricos de acomodación y menores pendientes.

Caracterización geomecánica

Los resultados de la prospección geofísica permitieron planificar la realización de ensayos en la zona. Los objetivos fueron caracterizar tanto los dominios interiores de la geometría plano-cóncava como las hipótesis identificadas en los perfiles.

Los ensayos de penetración dinámica muestran un cambio neto de la reología del aluvial al comparar los datos dentro y fuera de la sección plano-cóncava: se registra rechazo a la penetración a cotas superficiales (<2,5 metros), penetración de entre 8 y 9 metros dentro de la sección con hipérbolas en el límite inferior, y penetración de hasta 13,5 metros en el caso de la sección plano-cóncava sin límite inferior definido (Fig. 4A).

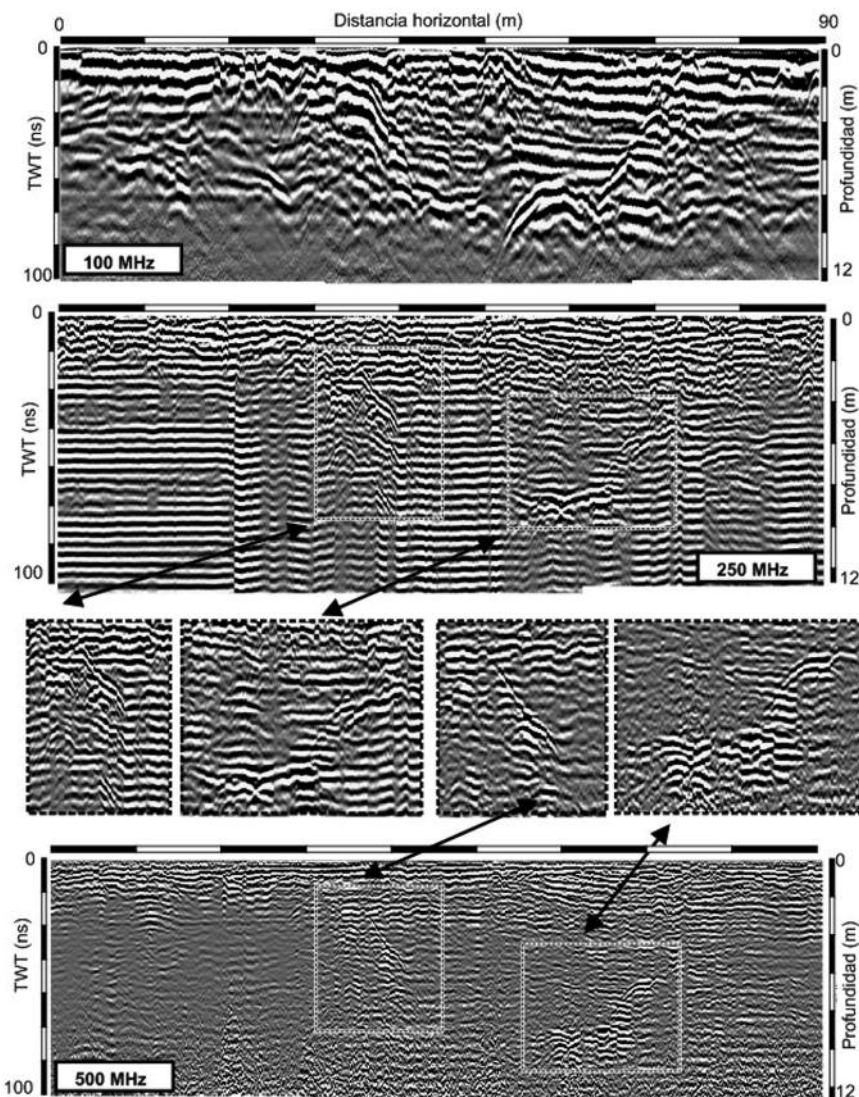


Fig. 3.- Perfil de georradar realizado con antenas de 100, 250 y 500 MHz. Velocidad de propagación establecida (por comparación con ensayos) en 45 m/ms.

Fig. 3.- GPR profile performed using 100, 250 and 500 MHz antennas. EM propagation velocity established (by comparison with boreholes) in 45 m/ms.

Los sondeos permiten definir una unidad superficial de gravas cementadas, responsable del rechazo de los ensayos mecánicos, y una serie aluvial compuesta principalmente por gravas y que se sigue hasta los 8-9 metros (Fig. 4A). Por debajo, se identifica un medio margoso-arcilloso con contenido variable de yeso, que se interpreta como transición hacia el substrato evaporítico mioceno. Las hipérbolas de difracción se correlacionaron con pequeñas caídas de la batería de perforación (0,15 a 0,25 m). El nivel freático se identifica por encima del nivel de margas y profundiza de forma paralela al hundimiento de dicho contacto.

Modelo integrado

Los perfiles de georradar muestran una geometría plano-cóncava delimitada lateralmente por reflectores de alto buzamiento y acomodaciones internas a dichos contactos. Este dispositivo permite interpretar esta geometría como un colapso y relleno posterior. La ausencia de un límite definido inferior en la parte central de la sección permite atribuir su origen a percolación del material granular en profundidad, mientras las anomalías con geometría hiperbólica representarían sectores no colapsados, heterogéneos o asociados a pequeñas cavidades. Esta geometría puede interpretarse como

un proceso de colapso y sedimentación post-colapso. La identificación de un límite inferior neto asociado al rechazo de los ensayos (nivel R1; Fig. 4A), y la progresión en profundidad cuando no existe dicho contacto, muestra un dispositivo compatible con un colapso y migración del material aluvial hacia el dominio sin hipérbolas (Fig. 4A). Por otro lado, cuando se ha podido atravesar el terreno por medio de los ensayos mecánicos, las hipérbolas identificadas se correlacionan con pequeñas cavidades en el subsuelo.

La depresión topográfica observada en el pavimento se sitúa directamente en la vertical de la sección plano-cóncava sin límite inferior. Por su parte, la proyección de la orla externa de menor subsidencia superficial abarca la sección plano-cóncava de forma completa (Fig. 4B).

El límite externo de esta sección viene representado por la presencia de los niveles de gravas cementadas, a la que se asocia una falta de evidencias superficiales de subsidencia. El análisis de los datos de forma integrada muestra que el dispositivo geométrico de colapso presenta el mayor registro de subsidencia acumulada, mientras que el contorno de esta zona, sin evidencias superficiales o incrementos de espesor significativos de las unidades de aluvial, presenta pequeños despegues entre el material aluvial inferior y el cementado superior (Fig. 4B). En este sentido, la zonación de riesgo, atendiendo al desarrollo de cavidades de propagación cercanas a la superficie, se extendería hacia los sectores marginales de la zona plano-cóncava y dominios con hipérbolas (Fig. 4B). Este sector marginal del colapso mostraría el riesgo más acuciente, frente a los que muestran mayor afección superficial con subsidencia progresiva. El conjunto de resultados permite interpretar que la ausencia de mallacán en la zona de colapso sería consecuencia del mismo, y no de una ausencia de cementación.

Propuesta de resolución técnica. Conclusiones

La zonación de riesgos que puede estimarse a partir de la integración de datos superficiales, geofísicos y geomecánicos sigue una distribución que podría no ser evidente en una primera valoración. Ello se debe a la deslocalización de los sectores de mayor riesgo respecto a aquéllos donde no hay evidencias superficiales y donde el aluvial

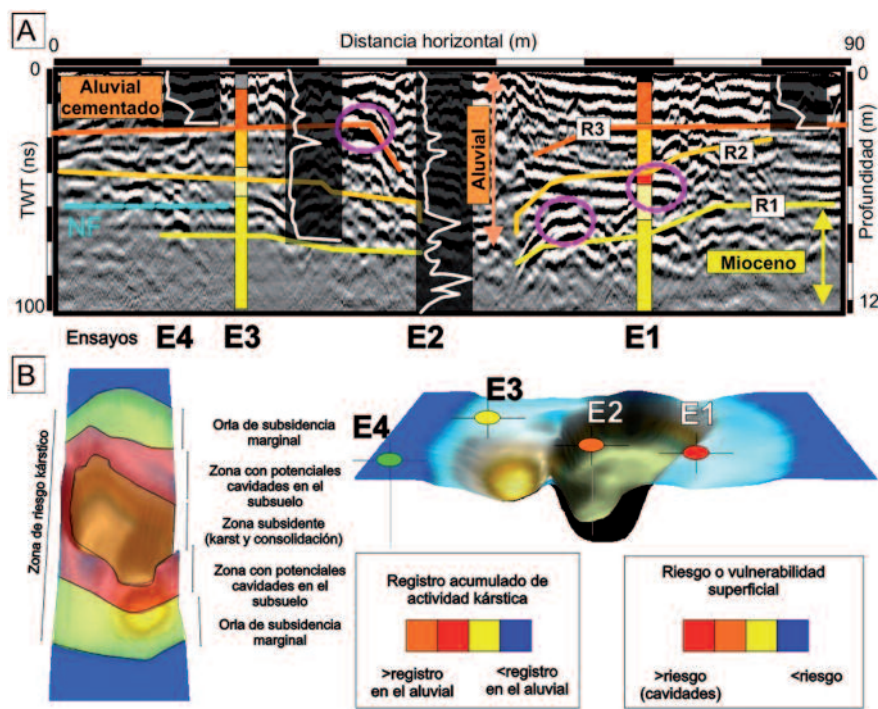


Fig. 4.- (A) Perfil de georradar con la proyección de los distintos ensayos realizados (E1 a E4; sondeos y penetrómetros dinámicos). (B) Modelo de riesgo establecido para el caso analizado, donde se valoran las distintas tipologías de riesgo y sus evidencias (subsistencia o colapso).

Fig. 4.- (A) GPR section where the geomechanical essays (E1 a E4; boreholes and dynamic penetration tests) have been located. (B) Hazard map for the analyzed case where the different hazards types and their surficial evidences are included (subsidence and collapse).

se comporta de forma más rígida ante los ensayos de penetración; Fig. 4).

La localización de este tipo de zonas de riesgo en medios urbanos supone un problema no sólo para las edificaciones próximas sino también para la seguridad viaria. La presencia de un depósito aluvial de pequeño espesor, aunque parcialmente cementado, y la identificación de pequeñas cavidades por despegue del material inferior hace necesario su estabilización. Una solución aplicable en estos contextos puede ser la estabilización de las unidades superficiales mediante resinas autoexpansivas. Este tipo de actuaciones podrían estabilizar temporalmente el material granular, rellenar las cavidades identificadas e incrementar la resistencia de los materiales subsuperficiales sin someter a la zona a un incremento de la carga vertical que podría producirse con otro tipo de inyecciones. La identificación de los espesores afectados y su dispositivo geométrico sugieren que el proceso de subsidencia fue contemporáneo de la sedimentación y que sigue siendo activo.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias a la colaboración del Ing. Gonzalo López Par-

dos, del Servicio de Infraestructuras Urbanas, Vías y Obras de la Diputación Provincial de Zaragoza. Este trabajo se ha realizado dentro del grupo de investigación Geotransfer de la Universidad de Zaragoza y ha sido desarrollado dentro del convenio marco OTRI-Unizar y CTA Consultores Técnicos Asociados. Los autores quieren agradecer los comentarios y sugerencias de Carlos Liesa, José Luis Simón y un revisor anónimo que han contribuido a la mejora del manuscrito original.

Referencias

Ansóñ, D., Pueyo Anchuela, Ó., Casas-Sainz, A.M. y Pocoví A. (2008). *Geogaceta* 45, 87-90.
 Escanola, J.M. y Leyva, F. (1995). *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 353 (Pedrola) y memoria*. IGME. Madrid. 72 p.
 Pueyo Anchuela, Ó., Casas Sainz, A.M., Soriano, M.A. y Pocoví Juan, A. (2011). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 36 (16), 1211-1227.
 Quirantes, J. (1978). *Estudio sedimentológico y estratigráfico del Terciario Continental de Los Monegros*. Publicación Instituto Fernando el Católico. 208 p.