

Evaluación de la aplicación de prospección geofísica por georradar en la caracterización previa y monitorización de la peligrosidad kárstica por subsidencia y colapso en carreteras (caso del tramo Luceni-Boquiñeni, Zaragoza)

Evaluation of the application of the geophysical survey by GPR in the preliminary characterization and monitoring of karst hazards by subsidence and collapse affecting to roads (case study of the Luceni-Boquiñeni road, Zaragoza)

Óscar Pueyo Anchuela, Andrés Pocoví Juan, Antonio M. Casas Sainz, Carlos L. Liesa, Pedro L. López Julián y Javier Ramajo Cordero

Dpto. de Ciencias de la Tierra. Instituto Universitario de Ciencias Ambientales. Universidad de Zaragoza. C/Pedro Cerbuna, 12, 50.009, Zaragoza, Spain.
 opueyo@unizar.es, apocovi@unizar.es, acasas@unizar.es, carluis@unizar.es, pllopez@unizar.es, javierramajo@gmail.com

ABSTRACT

The presence of active karstic subsidence processes affecting infrastructures requires detailed characterization, temporal evolution evaluations and the incorporation of compatible designs that do not increase the karstic risk. In this work a sector from the Luceni-Boquiñeni road is evaluated. In this area, the cemented alluvial levels were removed to avoid the appearance of sudden collapses affecting the road. With the aim to monitor the karst affection to the new structure, a GPR analysis comparing results between 2010 and 2015 profiles is carried out. This evaluation integrates surficial information, geophysics, geotechnical data and the geomorphology of the area.

Key-words: Karst risk, subsidence, Ebro basin, GPR, mitigation, monitoring.

RESUMEN

La presencia de procesos activos de subsidencia kárstica afectando a infraestructuras requiere de caracterizaciones detalladas, evaluación de la progresión temporal e incorporar diseños compatibles de convivencia con el fenómeno que no produzcan incrementos del riesgo asociado. En este trabajo se analiza el caso de la carretera Luceni-Boquiñeni en la que se decidió retirar el nivel cementado del aluvial para evitar la aparición de colapsos repentinos. Con el objetivo de monitorizar la afección kárstica a la nueva estructura, se ha realizado un seguimiento por medio de prospección geofísica por georradar cuyo análisis comparado 2010-2015 se realiza en este trabajo. La evaluación integra información superficial, geofísica, geotécnica y geomorfológica de la zona.

Palabras clave: Riesgo kárstico, subsidencia, Cuenca del Ebro, GPR, mitigación, auscultación.

Geogaceta, 63 (2018), 51-54
 ISSN (versión impresa): 0213-683X
 ISSN (Internet): 2173-6545

Recepción: 14 de julio de 2017
 Revisión: 13 de octubre 2017
 Aceptación: 23 de octubre 2017

Introducción

Las tasas de actividad y subsidencia en el entorno del sector central de la Cuenca del Ebro asociadas a la disolución de materiales evaporíticos son ampliamente conocidas (ver por ejemplo Simón *et al.*, 2009). Considerando que la prevención y ordenación del territorio es el mayor factor de éxito en minimizar las afecciones, la presencia de infraestructuras en contextos con subsidencia kárstica, requiere de adaptaciones y de monitorización continua para evitar los riesgos o minimizarlos. En estos casos, el mayor riesgo responde a la aparición de colapsos repentinos. En este trabajo se analiza un tramo de carretera entre las localidades de Luceni y Boquiñeni (provincia de Zaragoza; Fig. 1) en el que existen evidencias históricas

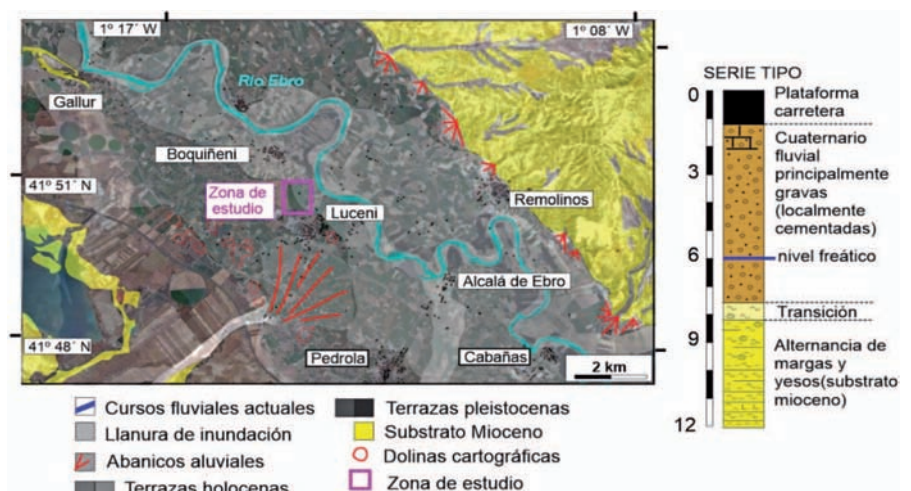


Fig. 1.- Cartografía geológica y serie tipo geotécnica de la zona de estudio (cartografía modificada de Castiella *et al.*, 1977; Hernández *et al.*, 1995; Esnaola *et al.*, 1995 y Gil Marín *et al.*, 1995). Ver figura en color en la web.

Fig. 1. -Geological map and geotechnical general vertical serie of the studied zone (modified from Castiella *et al.*, 1977; Hernández *et al.*, 1995; Esnaola *et al.*, 1995 and Gil Marín *et al.*, 1995). See color figure in the web.

de aparición de colapsos repentinos y que motivaron la incorporación de restricciones de velocidad (Fig. 2). La serie vertical general está compuesta por un substrato cenozoico evaporítico a profundidades medias entre los 7 y 8 metros, donde se producen los procesos de disolución, y una serie cuaternaria compuesta por gravas y limos asociada a la actividad fluvial del río Ebro (Fig. 1). Las unidades de gravas

aparecen puntualmente, cementadas por procesos edáficos/freáticos. Esta cementación influye en la individualización de comportamientos entre los procesos de disolución en el substrato y la superficie. En 2010 se decide acometer una reconstrucción completa de la carretera, retirando los materiales cementados de la terraza fluvial. En este trabajo se evalúan las evidencias previas, la caracterización geotécnica de la es-

tructura de la carretera tras la retirada del nivel cementado y la prospección geofísica por georradar realizada en el mismo tramo viario en 2010 y 2015.

Resultados

La evaluación geomorfológica de la zona no permite identificar afecciones directas a la carretera en las fotografías aéreas, pero sí se pueden identificar una serie de concentraciones de colapsos y zonas de subsidencia en sus márgenes (Fig. 2b). Desde el análisis realizado en 2010 no se habían producido colapsos en la vertical de la carretera aunque sí en su entorno (ver Fig. 2c). Sin embargo, siguen existiendo procesos de subsidencia que han tenido que ser reparados superficialmente. Tras la remisión de este artículo un colapso apareció en la carretera el 18/07/2017. Las restricciones de velocidad en dicho entorno existían previamente a la reparación pero se mantienen, especialmente, por la presencia de procesos progresivos de subsidencia que producen firmes no homogéneos (Fig. 2d). La retirada del nivel cementado obligó a un cambio topográfico de la cota de la carretera que puede identificarse en las fotografías de la figura 2d (cota actual casi 2 metros por debajo de su cota previa).

En 2010 se realizó una primera campaña de prospección geofísica por georradar integrando distintas antenas de frecuencias centrales que se ha repetido posteriormente con el objetivo de comparar los resultados y determinar la viabilidad de esta técnica en la identificación de cavidades en el substrato. Los perfiles obtenidos (Fig. 3a) muestran penetraciones similares con distintas antenas y con un límite de atenuación que aparece a la esperable cota del substrato evaporítico de la zona. En los sectores con geometrías de colapso, la penetración se incrementa dentro del substrato debido a la presencia de materiales granulares arrastrados (ver Fig. 3a). La parte superior de los perfiles presenta una estructura homogénea asociada al nivel de aporte de materiales realizada durante el saneo previo de la carretera que, en algunos puntos, supera el metro de espesor. En este sentido, se constata una unidad superficial homogénea y de estructura horizontal en el momento de la prospección realizada en 2010.

Esta disposición homogénea subhorizontal identificada en 2010 se pierde en los perfiles realizados en 2015 tanto en la estructura como en el comportamiento de los materiales. Las zonas superficiales con deformaciones o basculamientos en 2015 se localizan en sectores



Fig. 2.- Contexto histórico-geomorfológico de los colapsos de la carretera Luceni-Boquiñeni. a) Fotografías del colapso de 2002. b) Fotografías históricas y recientes de la zona (la cartografía geomorfológica se basa en el análisis de 18 vuelos aéreos: 1927-2015). c) Aspecto de la carretera en el vuelo de dron de 2015. d) Modificación de las señales viarias previamente y posteriormente a las actuaciones en la carretera (nótese el cambio topográfico de los arcenes tras la excavación del vial). Ver figura en color en la web.

Fig. 2.- Historical-geomorphological context of collapses affecting the Luceni-Boquiñeni road. a) 2002 collapse photographs affecting the road. b) Historical and recent photographs from the area (geomorphological mapping from 18 photographs from 1927 to 2015). c) 2015 state of the road (drone flight). d) Change in the road signs previous and after the road reconstruction (note the topographical change of the road shoulders). See color figure in the web.

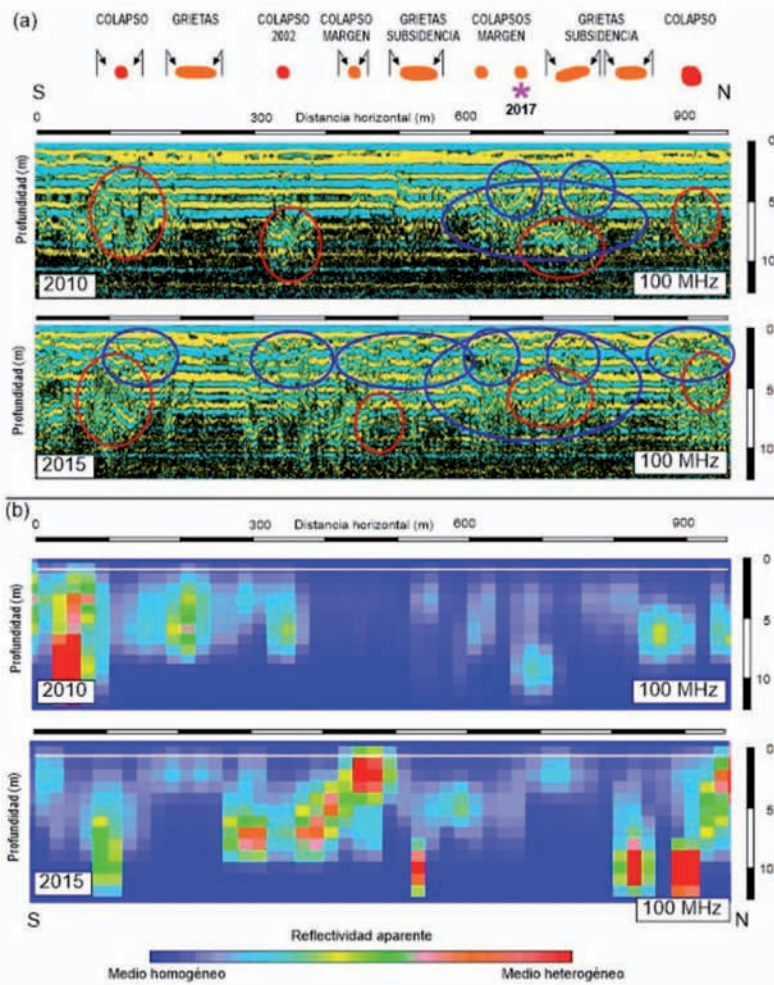


Fig. 3.- a) Perfiles de georradar (100 MHz) del mismo trayecto en 2010 y 2015 sobre la carretera de estudio. b) Tomografía de reflectividades aparentes realizadas para ambos perfiles de a). Ver figura en color en la web.
 Fig. 3.- a) GPR section carried out with 100 MHz antennas in the same road transect in 2010 and 2015. b) Apparent reflectivity tomography for both profiles from a). See color figure in the web.

con cambios estructurales previos más profundos (Fig. 3a). Para evaluar las anomalías puntuales de alto contraste que pudieran existir, se realizó un análisis de reflectividad aparente de los registros para tratar de identificar cambios que pudieran denotar la presencia de cavidades (ver metodología en Pueyo Anchuela *et al.*, 2011). El análisis comparado de los perfiles de georradar muestra en el perfil de 2010 (Fig. 3b) medios heterogéneos y anomalías a profundidades superiores a los 5 metros. Estos elementos anómalos desaparecen en los perfiles más modernos o se identifican anomalías en la misma posición horizontal pero en condiciones más superficiales y con mayores dimensiones.

El sector con mayores problemas actuales de subsidencia continuada en los perfiles corresponde al intervalo comprendido entre los 500 y 600 metros en la dimensión horizontal de tramo estudiado. En esta zona no existían evidencias claras de actividad previa a 2010. En el perfil de georradar de 2010, este sector está en una posición marginal de una zona con

cambios estructurales significativos. El análisis comparado de los cambios entre ambos perfiles muestra un incremento del radio y de la extensión de los materiales no horizontales a cotas someras (incremento de la extensión del medio no horizontal entre 2010 y 2015). Los reflectores superficiales se encuentran interrumpidos y con deformaciones pero sin existir, a esa altura, cambios profundos o anomalías puntuales que pudieran definir la presencia de cavidades en 2010 en la vertical de la subsidencia actual. En los perfiles de 2015 en la vertical de la zona con subsidencia reciente existe una anomalía de alto contraste (reflectividad) a una profundidad de entre 3 y 5 metros y una anomalía de mayor contraste al S de dicho punto y a una cota compatible con el substrato evaporítico.

Para intentar evaluar si pueden definirse sectores o dominios en los perfiles con claras evidencias de cambios estructurales, como se identifica en los perfiles de georradar, se han realizado modelos de reflectividad aparente con mayor rango de interpolación lateral (Fig. 4b y

d). Estos modelos pretenden identificar no tanto la presencia de una anomalía puntual de alto contraste, sino si existen variaciones progresivas del comportamiento de los materiales si se analizan de forma lateral. Estos modelos muestran la presencia de una unidad homogénea superficial y anomalías puntuales de alto contraste tanto a cotas compatibles con el aluvial como en el substrato (anomalía m30 y m670; Fig. 4a; esta anomalía ha coincidido con el colapso ocurrido en julio de 2017). En la evaluación más reciente (Fig. 4d) se siguen identificando anomalías profundas pero pueden identificarse geometrías de reflectores combados de amplio radio, como el caso del sector mencionado como más problemático (475 a 625) y también en las zonas con colapsos previos (metros 250 a 450). Estos cambios se identifican en los perfiles de georradar (Fig. 3a) como cambios estructurales, geometrías en sección plano-cóncavas y donde existe una desestructuración de los niveles. La ausencia de reparaciones profundas o inyecciones durante el intervalo analizado supone que dichos cambios en los mapas de reflectividad responden a cambios estructurales y del comportamiento de los materiales aluviales.

Previamente a la implantación de la nueva capa de rodadura de la carretera se hizo también una campaña de penetrómetros dinámicos para evaluar la resistencia de la nueva plataforma. Este análisis se realizó para determinar la resistencia del terreno sobre el que se apoyaría la nueva carretera. Los ensayos consisten en la evaluación de la resistencia del terreno a la penetración de una puntaza normalizada, los ensayos calculan el número de golpes necesarios para penetrar 20 cm (considerándose rechazo cuando no se logra penetrar tras 100 golpes). La localización y cota de rechazo aparece representada en la figura 4a. El rechazo se identifica en unos casos dentro del aluvial, en otros casos en el esperable contacto con el substrato, y en otros penetrando en éste. El modelo de correlación de estos datos presenta varias zonas en las que se producen incrementos de la resistencia dinámica de los materiales entre los metros 300 y 700 de los perfiles dibujando geometrías en sección plano-cóncavas. Estos dominios de mayor resistencia dinámica responden a sectores con presencia de anomalías de reflectividad previas, cambios estructurales significativos en los registros y donde el mayor paralelismo se identifica con los perfiles de reflectividad (Fig. 4d). Es decir, las mayores resistencias del terreno se identifican en aquellos sectores con mayores tasas de actividad de subsidencia superficial o inferida de la geofísica.

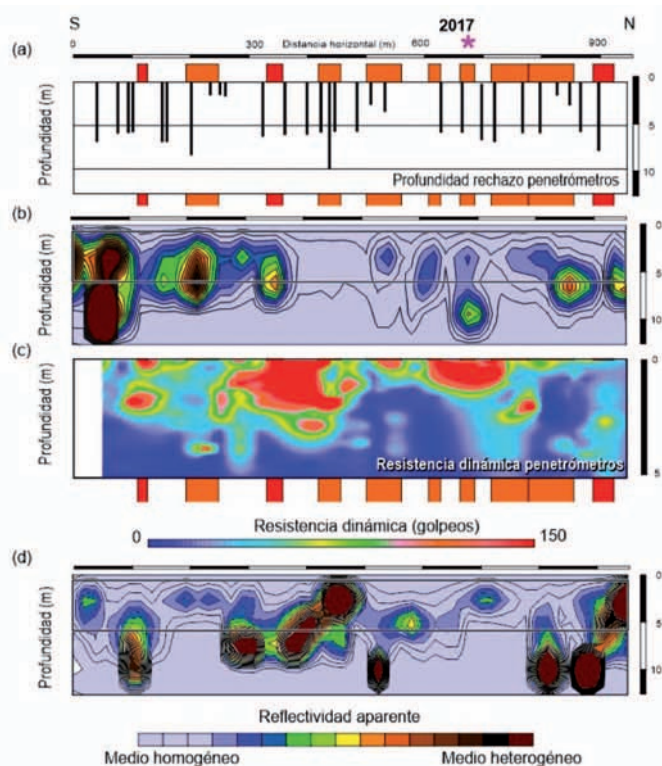


Fig. 4.- a) Localización de los penetrómetros dinámicos. b) Interpolación del modelo de reflectividades aparentes (perfil de 2010). c) Modelo de correlación de resistencias dinámicas de penetrómetros. d) Modelo de reflectividades aparentes para el perfil de 2015. Se representan detrás de las figuras los colapsos y zonas de subsidencia conocidas previamente. Ver figura en color en la web.

Fig. 4.- a) Location of dynamic penetration essays. b) Apparent reflectivity models from GPR profile from 2010. c) Model of interpolation of dynamic soil resistance. d) Apparent reflectivity models from GPR profile of 2015. Behind the plots collapse and subsidence known areas are also included. See color figure in the web.

Discusión y conclusiones

La evaluación de los procesos de subsidencia kárstica afectando a infraestructuras debe evaluar la tipología de las evidencias kársticas, el tipo de fenómenos y desarrollar propuestas de adaptación y de minimización del riesgo. En el caso analizado, la alta disponibilidad hídrica (acuífero aluvial del Ebro) con el nivel freático por encima del nivel soluble, y con alta recurrencia de eventos de subsidencia, supone que las propuestas de intervención deben ir orientadas a minimizar las consecuencias del proceso kárstico.

La evaluación comparada sobre la capacidad de predicción de cavidades dentro del substrato no parece accesible a través de las técnicas y aproximaciones realizadas (todas ellas relacionadas con la caracterización indirecta de la peligrosidad y no su origen como tal; Pueyo Anchuela *et al.*, 2016). Sin embargo, el georradar sí muestra un buen registro de la deformación que afecta al aluvial en zonas con actividad previa de subsi-

dencia y que constatan que aquellas zonas que han registrado previamente actividad (superficial o inferida por medio de la geofísica) presentan actividad superficial actual y tienen mayor probabilidad de desarrollar nuevos eventos de subsidencia en el futuro.

En el caso de las zonas que desarrollan mayor actividad reciente, no se identificaban anomalías significativas en la vertical de la zona de estudio (debido a la posible posición de la cavidad fuera de la vertical de prospección o dentro del substrato al que no es posible acceder por los métodos empleados). Sin embargo, en dichas anomalías se identifica la presencia de una progresión de la propagación de cavidades con incremento del radio, de la extensión superficial

con el tiempo y de la aparición de colapsos en los medios marginales a zonas subsidentes previas (ver Pueyo Anchuela *et al.*, 2017). En el caso del colapso aparecido en 2017, sí se identifica la presencia de una anomalía de reflectividad profunda en 2010, que aparece a una cota más somera en 2015 y que supondría un registro indirecto de la propagación de la cavidad que generó el reciente colapso.

Aunque el riesgo es muy difícil de evitar en la posición actual de la infraestructura, las medidas de mitigación y de reducción del riesgo (subsidencia progresiva en lugar de colapsos), unida a la monitorización continua, si bien con las limitaciones planteadas, pueden colaborar en el mantenimiento en uso de la infraestructura. Sin embargo, la modificación de la reología de los materiales asociados a la misma, por inyecciones o nuevos elementos rígidos, volvería a producir, en este contexto, la generación de colapsos repentinos en lugar de subsidencia progresiva.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer la colaboración de Carlos Curiel (Diputación Provincial de Zaragoza) y el apoyo de CTA y Ensayo a lo largo de los distintos periodos de investigación. Este trabajo se engloba dentro de las actividades del Grupo de Investigación Geotransfer de la Universidad de Zaragoza. Los autores quieren agradecer los comentarios y sugerencias del Dr. José Ángel Pérez Benedicto, el editor Manuel Díaz Azpiroz y un revisor anónimo que han permitido mejorar la versión original del artículo.

Referencias

- Castiella Muruzabal, J., del Valle de Lersundi, J. y Ramírez del Pozo, J. (1977). *Mapa geológico de España 1:50.000, hoja nº 321 (Tauste) y memoria*. IGME, Madrid, 18p.
- Esnaola, J.M., Leyva, F., Marqués, L., Ramírez del Pozo, J., Herranz, J.M., Fernández-Gianotti, J. y Martín-Serrano, A. (1995) *Mapa geológico de España escala 1:50.000, hoja nº 353 (Pedrola) y memoria*. IGME, Madrid, 71 p.
- Gil Marín, C., Santos, J.A., Marqués, L.A., Esnaola, J.M., Ramírez del Pozo, J., Marín, G., Crespo, E., Fernández-Gianotti, J. y Martín Serrano, A. (1995) *Mapa geológico de España escala 1:50.000, hoja 354 (Alagón) y memoria*. IGME, Madrid, 45p.
- Hernández, A., van den Hurk, A., Ramírez, J.I., Navarro, J.K., Simón, J.L., Rodríguez, Santisteban, R., García Villar, A., del Olmo, A., Ramírez del Pozo, J., Cuenca, G., Fernández-Gianotti, J. y Martín Serrano, A. (1995) *Mapa geológico de España escala 1:50.000, hoja 322 (Remolinos)*. ITGE, Madrid, 65 p.
- Pueyo Anchuela, Ó., Casas Sainz, A.M. y Pocoví Juan, A. (2011). *Journal of Applied Geophysics* 75, 151-160.
- Pueyo Anchuela, Ó., Casas Sainz, A.M. y Pocoví, A., (2016). *First Break* 34, 79-86.
- Pueyo Anchuela, Ó., Pocoví Juan, A., Casas Sainz, A.M., Gracia Abadías, J. y Liesa Carrera, C.L. (2017). *International Journal of Speleology* 46 (2), 237-249.
- Simón, J.L., Soriano, M.A., Pocoví, A., Arlegui, L.E., Casas, A.M., Liesa, C.L., Luzón, A., Pérez, A., Pueyo, Ó., Pueyo, E.L., Mochales, D., Gracia Abadías, J. y Ansón, D. (2009). *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 17.3, 303-315.