



**PELIGROSIDAD, DAÑOS Y MITIGACIÓN DE INUNDACIONES,
SUBSIDENCIA POR DISOLUCIÓN Y MOVIMIENTOS DE LADERA EN
LA LOCALIDAD DE CADRETE (DEPRESIÓN DEL EBRO, ZARAGOZA)**

*Flood, dissolution subsidence and landslide hazards, damages and mitigation
structures in Cadrete village (Ebro Depression, NE Spain)*

J. Guerrero⁽¹⁾, F. Gutiérrez y P. Lucha

Edificio Geológicas, Universidad de Zaragoza, C/ Pedro Cerbuna, 12; 50009 Zaragoza

(1) E-mail: jgiturbe@unizar.es; Fax: 976 761106

Resumen: El presente trabajo muestra cómo estrategias preventivas basadas en la no ocupación de zonas potencialmente peligrosas, identificables mediante estudios geomorfológicos de detalle, pueden contribuir de forma eficaz a mitigar los riesgos analizados. La subsidencia, las inundaciones y los movimientos de ladera causan daños importantes en numerosas construcciones de la localidad de Cadrete, en el valle del río Huerva. Esta población “multiriesgo”, se encuentra ubicada en una terraza situada entre la llanura de inundación y un escarpe formado por sedimentos yesíferos y arcillosos. La llanura aluvial del río Huerva actualmente ocupada por viviendas y polígonos industriales, se ve afectada por avenidas con una frecuencia relativamente elevada que causan importantes daños y aconsejan detener la urbanización de este espacio, independientemente de que se lleven a cabo las medidas estructurales proyectadas. Una cartografía geomorfológica detallada muestra cómo el escarpe se encuentra afectado por diversos tipos de movimientos de ladera (deslizamientos, desprendimientos, vuelcos, expansiones laterales) cuya distribución evidencia un marcado control litoestratigráfico. Los daños en construcciones provocados por movimientos de ladera están en todos los casos relacionados con la reactivación de deslizamientos rotacionales antiguos inducida por alteraciones provocadas por el hombre en la ladera (excavaciones, sobrecargas y aportes de agua). Por otro lado, buena parte de las construcciones de la localidad de Cadrete muestran agrietamientos y basculamientos debidos a fenómenos de subsidencia, teniendo éstos una especial incidencia al pie del escarpe. Estas patologías son atribuidas a la disolución de niveles de yeso y posiblemente halita del sustrato, y a la hidrocompactación de limos yesíferos. Se plantea que los procesos de karstificación pueden estar provocados por flujos que conectan el acuífero kárstico neógeno y el acuífero aluvial de forma reversible y controlados por el régimen de precipitaciones.

Palabras clave: riesgos geológicos, movimientos de ladera, inundaciones, subsidencia por disolución, río Huerva.

Abstract: The present work suggests that preventive planning based on the avoidance of hazardous areas recognizable through detailed geomorphological studies may contribute significantly to reduce the risk in urban areas. Subsidence, floods and slope movements cause significant damage in numerous buildings of Cadrete village, located in the Huerva River valley (NE Spain). This multihazard village is built on a terrace surface placed between the floodplain and a scarp made up of horizontally lying gypsum and argillaceous Tertiary sediments. The low recurrence floods that affect the floodplain of the Huerva River have caused severe damage in recently built houses and industrial states. Regardless of the application of the projected structural correction measures, the mitigation of the flood risk requires a preventive planning based on the avoidance of the flood-prone areas. A detailed geomorphological map shows that the scarp is affected by a large density of slope movements (translational and rotational slides, rock-falls, topples, lateral spreading). The majority of the movements are restricted to the lower litostratigraphic unit made up of shales and gypsum. The damage in buildings derived from slope movements is always related to the reactivation of old rotational landslides caused by anthropogenic alterations in the slopes (excavation, loading, additional water supply). This fact indicates the inadequateness of the old landslides for the construction of structures in spite of their apparent favourable topography. On the other hand, a large number of buildings are affected by cracking and tilting due to ground subsidence. The most severely damaged areas include the foot of the scarp. The subsidence damage is

attributed to the karstification of gypsum and possibly halite in the bedrock and to the hydrocompaction of gypsiferous silts. A reversible hydraulic connection controlled by the precipitation regime between the Tertiary karstic aquifer and the Quaternary alluvium is proposed.

Keywords: geohazards, landslides, floods, dissolution subsidence, Huerva Valley, Spain



J. Guerrero, F. Gutiérrez & P. Lucha (2004). Peligrosidad, daños y mitigación de inundaciones, subsidencia por disolución y movimientos de ladera en la localidad de Cadrete (Depresión del Ebro, Zaragoza). Rev. C. & C., 19 (1-2), 63-82.

1. Introducción

A pesar de que los conocimientos actuales permiten identificar con un grado de acierto elevado las zonas sujetas a la influencia de procesos potencialmente peligrosos (Costa y Baker, 1981; Cendrero, 1997), numerosos núcleos de población en expansión tienden a ocupar zonas de riesgo. Esta contradictoria situación está motivada en gran medida por una inadecuada percepción del riesgo y por el escaso o nulo protagonismo que se le otorga al análisis de riesgos en la ordenación del territorio. En el presente trabajo se estudia el caso de la población de Cadrete y otras poblaciones del tramo bajo del valle del Huerva (Provincia de Zaragoza), donde la subsidencia, las inundaciones y los movimientos de ladera causan daños importantes en numerosas construcciones. Los dos últimos procesos afectan principalmente a edificios de reciente construcción ubicados en la llanura de inundación del río Huerva y sobre deslizamientos antiguos que han experimentado reactivaciones inducidas por el hombre.

Las inundaciones constituyen el riesgo hidrológico con mayor impacto económico y social en nuestro país (González de Vallejo, 1988; Pujadas, 2002), causando anualmente unas 20 muertes y pérdidas materiales por valor de 210 millones de euros (Ayala-Carcedo, 1999, 2002b). Un hecho importante a destacar es que gran parte de las víctimas mortales provocadas por inundaciones en las últimas décadas son debidas a inundaciones súbitas o relámpago (*flash floods*), ocurridas en cuencas hidrográficas relativamente pequeñas y caracterizadas por la brevedad de los tiempos de presentación (*lag time*) de las crecidas (Ayala-Carcedo, 2002a). Los movimientos de ladera ocupan el tercer lugar tras la erosión de suelos en lo referente a pérdidas económicas (González de Vallejo, 1988), estimándose en 41,7 millones de euros al año para la década

1990-2000 (Ayala-Carcedo *et al.*, 2003). Las víctimas mortales causadas por este tipo de procesos son siempre debidas a movimientos rápidos, y una parte importante de las mismas a desprendimientos en zonas urbanas situadas a pie de escarpes formados por sedimentos yesíferos terciarios (Gutiérrez *et al.*, 2001; Guerrero *et al.*, 2004b). Sucesivos deslaves acaecidos en 1856, 1874, 1903 y 1946 provocaron 11, 100, 1 y 2 muertos respectivamente en la localidad Navarra de Azagra, situada al pie de un escarpe en yesos paleógenos (Ayala-Carcedo y Ferrer, 1988). En 1988 un desprendimiento en el escarpe en yesos de Calatayud causó una víctima mortal (Gutiérrez, 1998; Gutiérrez y Cooper, 2002). Por otra parte, España es el país europeo en el que el riesgo de subsidencia por disolución de evaporitas posee un mayor impacto económico, teniendo éste una especial incidencia en las zonas donde formaciones evaporíticas terciarias se encuentran fosilizadas por depósitos aluviales cuaternarios (Gutiérrez *et al.*, 2001; Gutiérrez, 2003, 2004). Resulta difícil evaluar las pérdidas económicas que genera este tipo de riesgo por su carácter disperso y la práctica habitual de ocultar sus efectos para evitar la devaluación de la propiedad. Sin embargo en determinadas zonas como el entorno de las ciudades de Zaragoza y Calatayud constituye un factor limitante importante para el desarrollo y crea a menudo situaciones de quiebra económica en particulares, ya que este tipo de daños no suele ser cubierto por las compañías de seguros. Así por ejemplo, las pérdidas económicas generadas por una dolina de colapso que afectó a un edificio de 52 viviendas de Calatayud (noviembre de 2003) se han estimado en 4,8 millones de euros (Gutiérrez *et al.*, 2004).

La proximidad de las poblaciones del curso bajo del valle del Huerva a una ciudad en expansión como Zaragoza, y su situación junto a la N-330, que enlaza las ciudades de Zaragoza, Teruel y Valencia, ha

propiciado un crecimiento urbanístico importante en las mismas, produciéndose en algunos casos la ocupación de zonas con una alta probabilidad de verse

afectadas por procesos peligrosos (Fig. 1). Un ejemplo representativo es el de la localidad de Cadrete, situada a 10 Km de Zaragoza, y que en las tres últi-

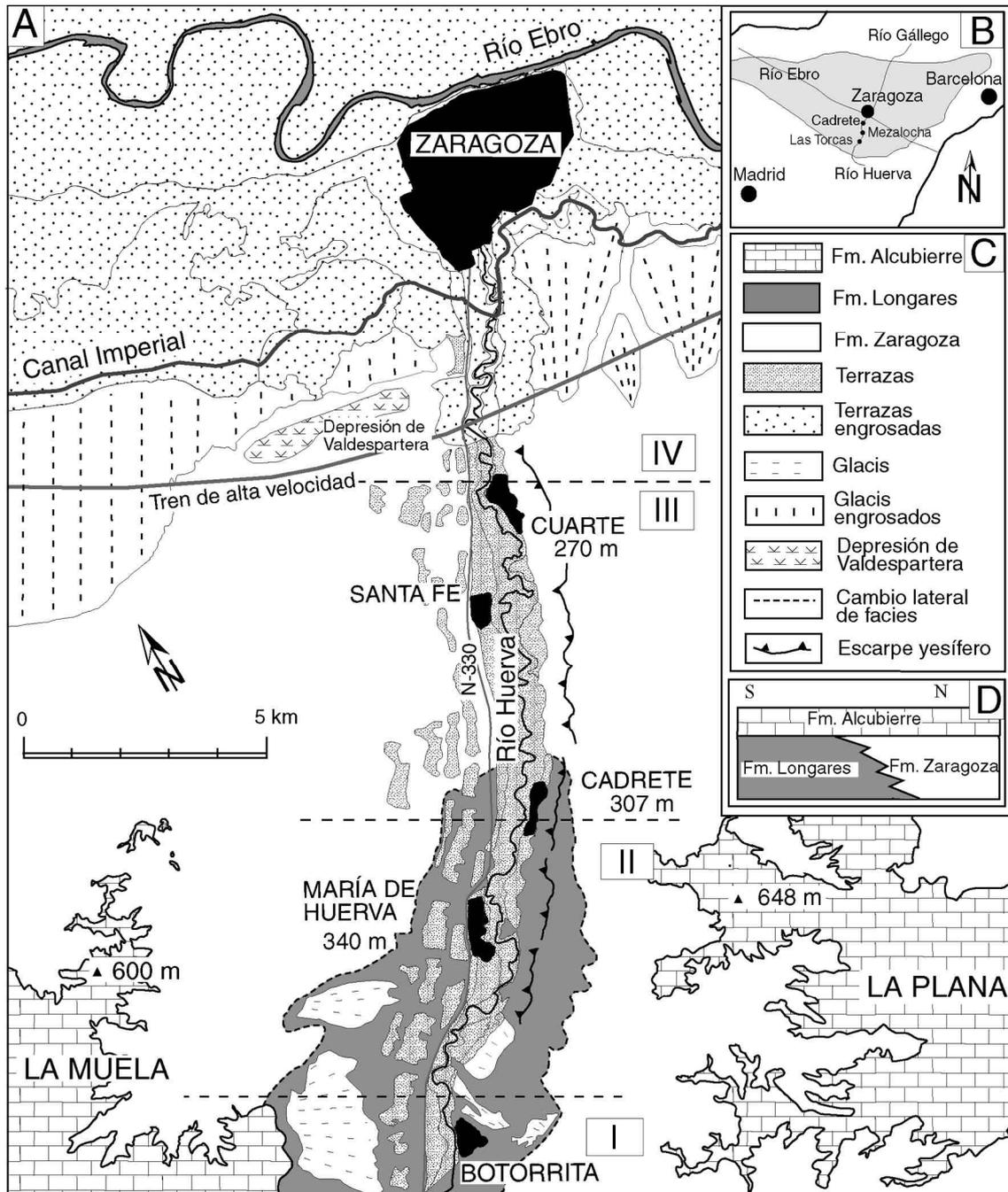


Figura. 1. A) Mapa litoestratigráfico y geomorfológico del valle del río Huerva. B) Situación geográfica del área de estudio. C) Leyenda del Mapa. D) Relación entre las diferentes unidades litoestratigráficas.

Figure. 1. A) Lithostratigraphical and geomorphological map of the Huerva River valley. B) Geographical location of the study area. C) Explanation of the map. D) Stratigraphical relationship among the different sedimentary units.

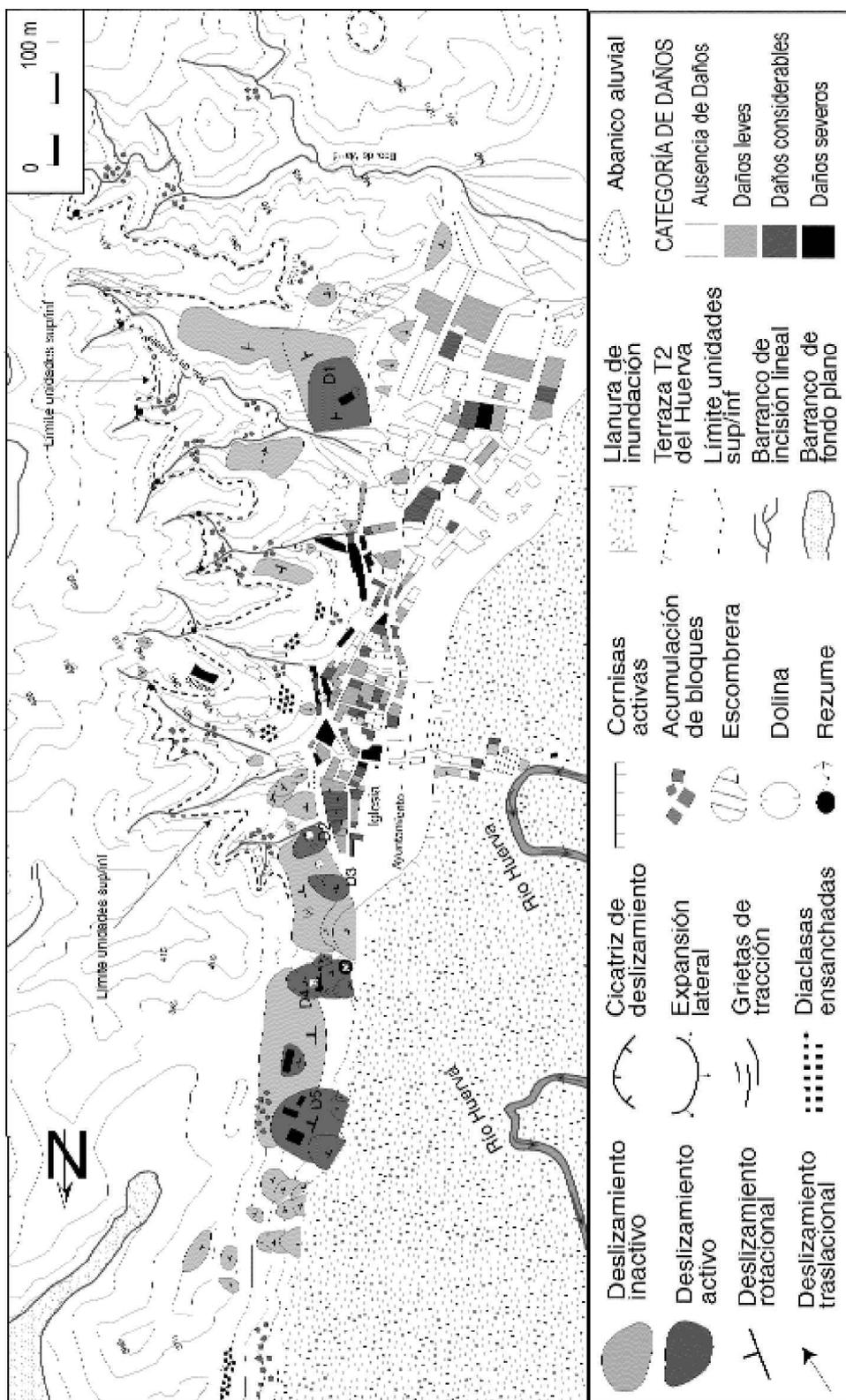


Figura 2. Mapa geomorfológico de la localidad de Cadrete en el que se muestran los movimientos de ladera que afectan al escarpe, el nivel de daños que presentan las fachadas de los edificios por efecto de la subsidencia y las construcciones situadas en la llanura de inundación.

Figure 2. Geomorphological map of Cadrete village showing the slope movements that affect the gypsum scarp, subsidence damage categories of buildings based on the examination of the façades and buildings located in the floodplain.

mas décadas ha aumentado su población de 650 (Gil, 1970) a 3500 habitantes, pasando de ser un municipio rural dedicado a actividades agropecuarias, a una pequeña ciudad dormitorio con numerosas instalaciones industriales (Ayuntamiento de Cadrete, 2004). A principios de los años 70 la distribución de la urbe quedaba restringida a la superficie de la terraza T2 (+8-10 m), flanqueada por la llanura de inundación y un escarpe inestable formado por sedimentos yesíferos y arcillosos (Fig. 2). Únicamente el Castillo de Quadrit había sido erigido sobre el escarpe en el siglo XI, estando su ruinoso estado actual motivado en gran medida por el rápido retroceso que afecta a los cantiles sobre los que se apoya la construcción. En las últimas décadas, el gran desarrollo urbanístico que ha experimentado esta población ha ido acompañado por la ocupación de algunos sectores de la llanura de inundación y del escarpe, susceptibles de ser afectados por crecidas y movimientos de ladera respectivamente. Por otra parte, la subsidencia motivada por la karstificación aluvial del sustrato evaporítico y la hidrocompactación de limos yesíferos provoca daños importantes en numerosas edificaciones. En este trabajo se analizan la distribución espacio-temporal y las causas de dichos procesos, y se plantean algunas medidas que pueden contribuir a paliar los daños que generan.

2. Contexto geológico y geomorfológico

El área de estudio se circunscribe al municipio de Cadrete, situado a unos 10 Km al SO de Zaragoza. Esta población se asienta al pie del escarpe que forma la margen derecha del valle del río Huerva, un afluente del río Ebro que surca con dirección SO-NE el sector centromeridional de la Depresión del Ebro (Figs. 1 y 2). Dicho valle ha sido excavado en sedimentos miocenos del relleno de la Cuenca del Ebro pertenecientes a las formaciones Longares, Zaragoza y Alcubierre, y que presentan un buzamiento regional de unos 3° hacia el Norte (Quirantes, 1978). A lo largo del valle se observa como las facies de arcillas y areniscas de la Formación Longares dan paso lateralmente y en el sentido de aguas abajo a las facies evaporíticas de la Formación Zaragoza (Fig. 1). En afloramiento, esta última unidad litoestratigráfica está constituida por yeso secundario, margas y arcillas. Los datos de sondeos revelan la existencia bajo la superficie de

una alta proporción de halita y sulfatos sódicos, fundamentalmente glauberita (Torrescusa y Klimowitz, 1990; Esnaola *et al.*, 1995; Ortí y Salvany, 1997; Ortí, 2000). En un sondeo de exploración minera realizado en el valle del Huerva unos 5 Km aguas abajo de Cadrete se han identificado niveles de halita y glauberita de potencia métrica a decamétrica a menos de 40 m bajo la llanura de inundación del Río Huerva (ENTECSA, com. pers.). Las calizas lacustres de la Formación Alcubierre culminan la serie neógena formando extensas plataformas en ambos márgenes del valle a más de 300 m sobre el cauce actual y constituyendo importantes áreas de recarga para el drenaje subterráneo (Fig. 1).

El municipio de Cadrete está situado en el sector donde se produce el cambio lateral entre facies terrígenas y evaporíticas (Fig. 1). En los sedimentos miocenos que afloran en el escarpe de Cadrete se diferencian dos unidades estratigráficas limitadas por un contacto neto y que poseen un contrastado comportamiento geomecánico e hidrogeológico (Guerrero *et al.*, 2004b) (Fig. 2). La unidad inferior, cuyo espesor aflorante disminuye de 70 a 35 m en el sentido de aguas abajo, está constituida por una secuencia granodecreciente de arcillas, areniscas, limolitas y yesos en la que se aprecia un claro aumento en la proporción de arcillas hacia el Norte. Esta unidad forma parte de la Formación Longares de Quirantes (1978) y de la Unidad de Remolinos-Lanaja definida por Esnaola y Gil (1995). Sondeos de investigación geotécnica practicados en la localidad de Cadrete han demostrado la existencia de niveles de halita de hasta 5 m de espesor a menos de 18 m por debajo de la superficie del nivel de terraza T2 dentro de esta unidad (PROYEX, com. pers.). La unidad superior, compuesta por yesos con intercalaciones de margas y arcillas, forma los 30-60 m superiores del escarpe y corresponde a la Formación Zaragoza de Quirantes (1978) y al Tramo Compresivo Evaporítico de Esnaola y Gil (1995).

Los sedimentos neógenos de este sector de la Cuenca del Ebro están afectados por sistemas de diaclasas subverticales, que aunque presentan direcciones preferentes N-S, E-O y ESE-ONO, sus orientaciones pueden ser muy diversas (Arlegui y Simón, 2001). En Cadrete, asociadas al frente del escarpe se observan fracturas y fallas normales con dirección NE-SO, mostrando estas últimas saltos de orden métrico. Las discontinuidades sin desplazamiento vertical pueden corresponder a diaclasas

ensanchadas por descarga o a grietas generadas por la pérdida de confinamiento lateral que han experimentado los sedimentos sobreconsolidados del escarpe. Con relación a las fallas, es difícil dilucidar si poseen un origen tectónico o corresponden a deformaciones gravitacionales (planos de deslizamiento), las cuales a su vez podrían aprovechar estructuras tectónicas preexistentes.

El encajamiento y la migración lateral del sistema fluvial hacia el SE a lo largo de su evolución han dado lugar a un valle marcadamente asimétrico. Los 12 niveles identificados de terraza se sitúan fundamentalmente en la margen izquierda, mientras que la margen opuesta está formada por un abrupto escarpe al pie del cual se asienta la localidad de Cadrete (Guerrero *et al.*, 2003, 2004a) (Fig. 1). Dicho escarpe, de unos 10 Km de longitud y hasta 120 m de desnivel, presenta una traza rectilínea de dirección NE-SO. Aguas abajo de Cadrete, el escarpe, constituido mayoritariamente por yeso, presenta paredes verticalizadas y patentes facetas triangulares que evidencian un rápido retroceso. Por otra parte, los aluviones cuaternarios depositados sobre sedimentos evaporíticos (terrazas y glacia) presentan engrosamientos y gran variedad de deformaciones gravitacionales provocadas por procesos de disolución y subsidencia. Atendiendo al tipo y magnitud de las estructuras de subsidencia kárstica se han diferenciado 4 tramos en el curso bajo del valle del Huerva (Guerrero *et al.*, 2003, 2004a) (Fig. 1). En el tramo superior (I) los depósitos de terraza, apoyados sobre sustrato detrítico, se mantienen indeformados y no superan los 4 m de espesor. En los tramos intermedios (II y III) la disolución en el techo del sustrato evaporítico ha dado lugar a engrosamientos locales de más de 15 m de potencia y deformaciones que afectan principalmente a la cobertera aluvial. La localidad de Cadrete se sitúa dentro del tramo II (Fig. 1). Finalmente, en el tramo inferior (IV), correspondiente a los últimos 8 Km del valle situados aguas arriba de la desembocadura del Huerva en el río Ebro, los depósitos de terraza alcanzan más de 60 m de espesor y las estructuras de subsidencia poseen mayor entidad. En este sector las deformaciones frecuentemente afectan tanto a los depósitos aluviales como a los sedimentos neógenos, lo que indica que la karstificación también actúa en el seno del sustrato evaporítico, afectando posiblemente a niveles de halita y sulfatos sódicos (Guerrero *et al.*, 2003, 2004a).

3. El riesgo de inundación

El río Huerva en su desembocadura en el río Ebro drena una superficie de cuenca de 1020 km². Aguas arriba de la zona de estudio el río está regulado por los embalses de Las Torcas, con una capacidad de almacenamiento de 8 hm³, y Mezalocha, con 3.5 hm³ de capacidad, situados a unos 38 y 21 Km aguas arriba de Cadrete, respectivamente (Fig. 1B). El río Huerva en su curso bajo se caracteriza por presentar un régimen marcadamente torrencial, en el que periodos prolongados de escaso caudal se ven interrumpidos, en ocasiones de forma súbita, por breves intervalos de elevada descarga en los que se produce la inundación de la llanura aluvial (Fig. 3). Las avenidas que tienen lugar en los meses de Diciembre y Enero son claramente debidas a lluvias frontales mientras que las que suceden a finales de la primavera y principios del verano (Mayo, Junio y primeros de Julio) están relacionadas preferentemente con lluvias convectivas (Camarasa, 2002). Estas avenidas generalmente están asociadas con eventos de tormenta de elevada magnitud e intensidad o con periodos prolongados de lluvia. En ocasiones, la inundación de determinados tramos del valle no es debida al desbordamiento del propio cauce del Huerva, sino a avenidas relámpago (*flash floods*) generadas en los sistemas de barrancos laterales por tormentas convectivas. Este tipo de inundaciones locales que en ocasiones no quedan reflejadas en los datos de aforo, puede dar lugar a flujos de mayor energía y competencia que las primeras, capaces de generar daños importantes en bienes y personas. Entre las inundaciones históricas destaca la de 1921, que con un caudal punta de unos 660 m³/s afectó gravemente a numerosas poblaciones causando decenas de muertos (Comisión Nacional de Protección Civil, 1983). El valle del Huerva también se ha visto afectado por una crecida causada por la rotura de una presa. En 1726 se construyó en el estrecho de Marimarta, punto en el que hoy se encuentra la cerrada del Embalse de Mezalocha, una presa de mampostería de 30 m de altura con la finalidad de abastecer a los pueblos ribereños y sus regadíos. El 20 de julio de 1776 una avenida del Huerva reventó la presa dando lugar a una de las inundaciones más dañinas de las que se tiene constancia (Gil, 1970).

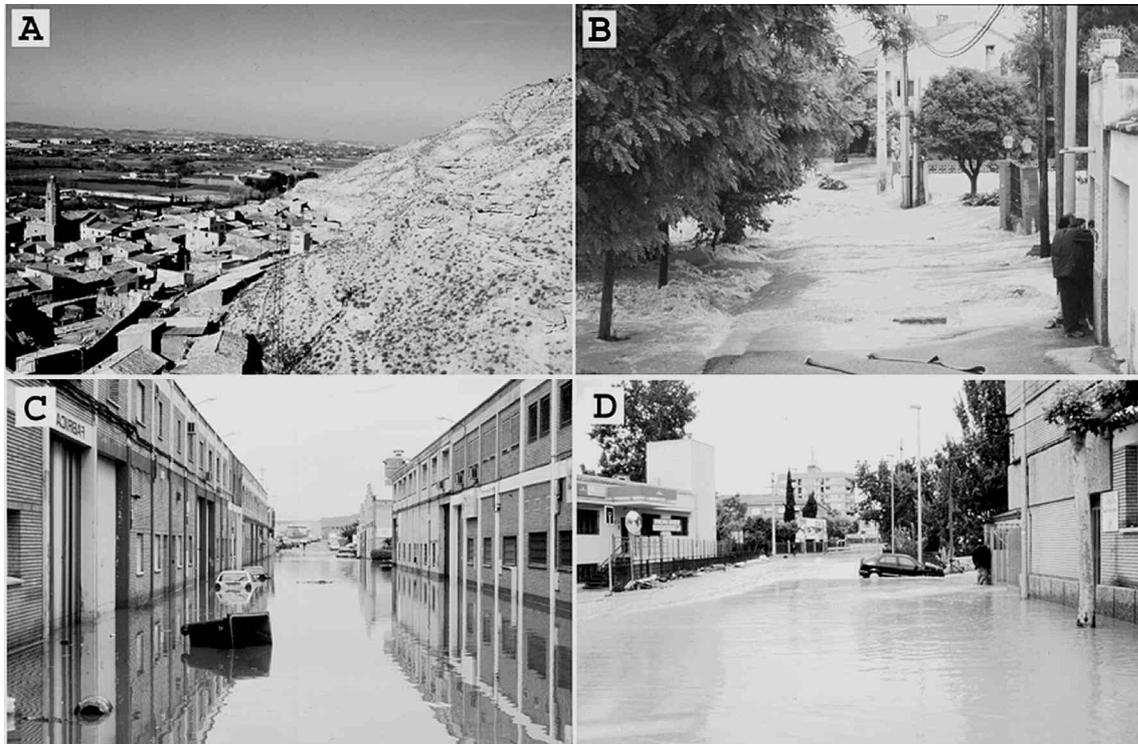


Figura 3. A) Vista general del casco antiguo del pueblo de Cadrete situado al pie del escarpe yesífero sobre el nivel de terraza T2 del río Huerva. B) Efectos de la crecida de Mayo de 2003 en Cadrete. C) Polígono industrial en la llanura de inundación del río Huerva anegado por la avenida de Mayo de 2003 (localidad de Cuarte, 5 km aguas abajo de Cadrete). D) Puente sobre el río Huerva en Cuarte cubierto por las aguas en la inundación de Mayo de 2003.

Figure 3. A) View of Cadrete village built on T2 terrace at the toe of the gypsum scarp. B) Effects of the May 2003 flood in Cadrete villa - ge. C) Industrial state in Cuarte village (5 km downstream of Cadrete village) during the May 2003 flood. D) Flood waters covering a bridge in Cuarte village during the May 2003 flood.

Independientemente de su origen, los registros de caudales tomados con posterioridad a la construcción de los embalses de Las Torcas y Mezalocha demuestran que las inundaciones en el curso bajo del Río Huerva son un fenómeno con una recurrencia relativamente baja (Tabla 1 y Fig. 4). Los datos de aforo registrados por la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) en Zaragoza muestran que desde 1977 el río Huerva ha experimentado tres inundaciones con caudales punta superiores a $70 \text{ m}^3/\text{s}$. Estas cifras y la curva de frecuencia de caudales de Zaragoza sugieren, sin olvidar las limitaciones que plantea un registro tan breve (Viessman y Lewis, 1995), que los eventos de crecida con una magnitud igual o superior a dicho valor poseen un periodo de recurrencia inferior a 10 años en el tramo bajo del Huerva (Tabla 1 y Fig. 4). Las curvas de frecuencia de caudales elaboradas

con las series más amplias de las estaciones de Las Torcas y Mezalocha, con cuencas de drenaje más reducidas, indican periodos de retorno del orden de 20 a 25 años para este caudal. La inundación de julio de 1990, provocada por una tormenta en la que se registraron 52 mm en 2 horas, alcanzó un caudal punta de $70,90 \text{ m}^3/\text{s}$ en Zaragoza (Tabla 1). Este evento causó cuantiosos daños materiales en Cadrete, Cuarte y Zaragoza al anegar extensas áreas de cultivo y numerosas viviendas y naves industriales. En esta crecida, 45 personas encaramadas en tejados, 15 de ellas en la localidad de Cadrete, tuvieron que ser rescatadas con lanchas por efectivos de Protección Civil. La última inundación se produjo el 8 de mayo de 2003 como consecuencia de copiosas lluvias que afectaron a la totalidad de la cuenca durante dos días (Tabla 1). Según estimaciones indirectas realizadas por la Confederación

Tabla 1. Datos de caudales máximos instantáneos en m³/s registrados en las estaciones de aforo del Río Huerva situadas en los embalses de Las Torcas y Mezalocha y en la ciudad de Zaragoza. Los valores de >80 m³/s corresponden a eventos en los que el caudal pico excedió la capacidad de medida de la estación de aforo (Confederación Hidrográfica del Ebro, <http://www.oph.chebro.es>).
 Table 1. Maximum annual peak discharge values in m³/s for Huerva River recorded in Zaragoza city and Las Torcas and Mezalocha reservoirs. Values of >80 m³/s correspond to floods in which the discharge exceeded the measurement limit of the gauging station.

Años	Zaragoza (m ³ /s)	Mezalocha (m ³ /s)	Torcas (m ³ /s)
03/05/1951	—	26,80	43,00
16/05/1954	—	29,00	63,25
27/05/1956	—	27,75	46,50
18/06/1957	—	26,80	53,70
06/06/1959	—	21,00	67,50
29/04/1969	—	42,24	52,10
20/05/1971	—	55,54	69,00
05/12/1971	—	48,30	66,40
24/03/1974	—	54,90	79,60
11/06/1975	—	70,30	80,75
15/01/1977	>80,00	80,06	68,75
02/06/1979	—	55,42	4,55
21/01/1988	40,00	30,42	36,00
29/07/1990	70,90	12,38	23,09
10/01/1997	29,72	21,32	21,72
08/05/2003	>80,00	>80,00	—

Hidrográfica del Ebro, el caudal punta en la estación de aforo de Zaragoza superó los 80 m³/s. En este evento el flujo inundó cerca del 90% de la llanura de inundación afectando a una gran extensión de campos de cultivo, infraestructuras lineales y numerosas edificaciones, fundamentalmente naves y viviendas de reciente construcción de Botorrita, María de Huerva, Cadrete, Cuarte y Zaragoza (Fig. 3). Por otra parte, las averías provocadas por la crecida en ocho centros de transformación dejaron sin suministro eléctrico durante dos días a más de 700 clientes en la población de Cuarte. En numerosos tramos la acción erosiva del agua provocó un aumento de la sección del canal y el descalce de algunos puentes, que localmente actuaron como presas elevando el nivel del agua (Fig. 3D). En la localidad de Cadrete 10 personas quedaron aisladas en tejados y otras 15 tuvieron que ser rescatadas.

Los datos que disponemos permiten pronosticar que en un futuro próximo las avenidas con un periodo de retorno de 10 años pueden incrementar los daños debido al incremento de la ocupación que está experimentando la llanura de inundación del río Huerva en su curso bajo. Por otra parte, es muy probable que aunque las avenidas no aumenten su frecuencia, los daños provocados por este tipo de fenómenos experimenten un aumento considerable por la creciente ocupación que están experimentan-

do las zonas inundables. El Plan Integral diseñado por la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) para la mitigación del riesgo de inundación en la cuenca del río Huerva contempla diversas medidas para el área comprendida entre María de Huerva y su desembocadura en el Ebro (CHE, 2001) (Fig. 1): (1) Aplicación de medidas de corrección hidrológica en los barrancos laterales, (2) Mejora de la capacidad de desagüe del cauce principal mediante la ampliación de su sección y la disminución de su rugosidad, (3) Construcción de muros de protección para evitar el desbordamiento, (4) Un estudio de la incidencia de las avenidas en el casco urbano de Zaragoza, (5) La posible construcción de un cauce complementario de desvío de avenidas en la ciudad de Zaragoza. Por otra parte, el 7 de Julio de 1992 las Cortes de Aragón aprobaron el recrecimiento del Embalse de Las Torcas hasta una capacidad de 13,7 hm³ con el fin de ampliar el área de regadío y aumentar su capacidad de laminación de crecidas siendo esta propuesta ratificada posteriormente en la Ley 10/2001, de 5 de Julio del Plan Hidrológico Nacional (Boletín Oficial de Aragón, BOA, N.º 40). Es evidente que estas medidas, de llevarse a la práctica, aunque pueden evitar las inundaciones “ordinarias”, no eliminan la posibilidad de que el fondo del valle se vea afectado por las crecidas mayores y de menor frecuencia.

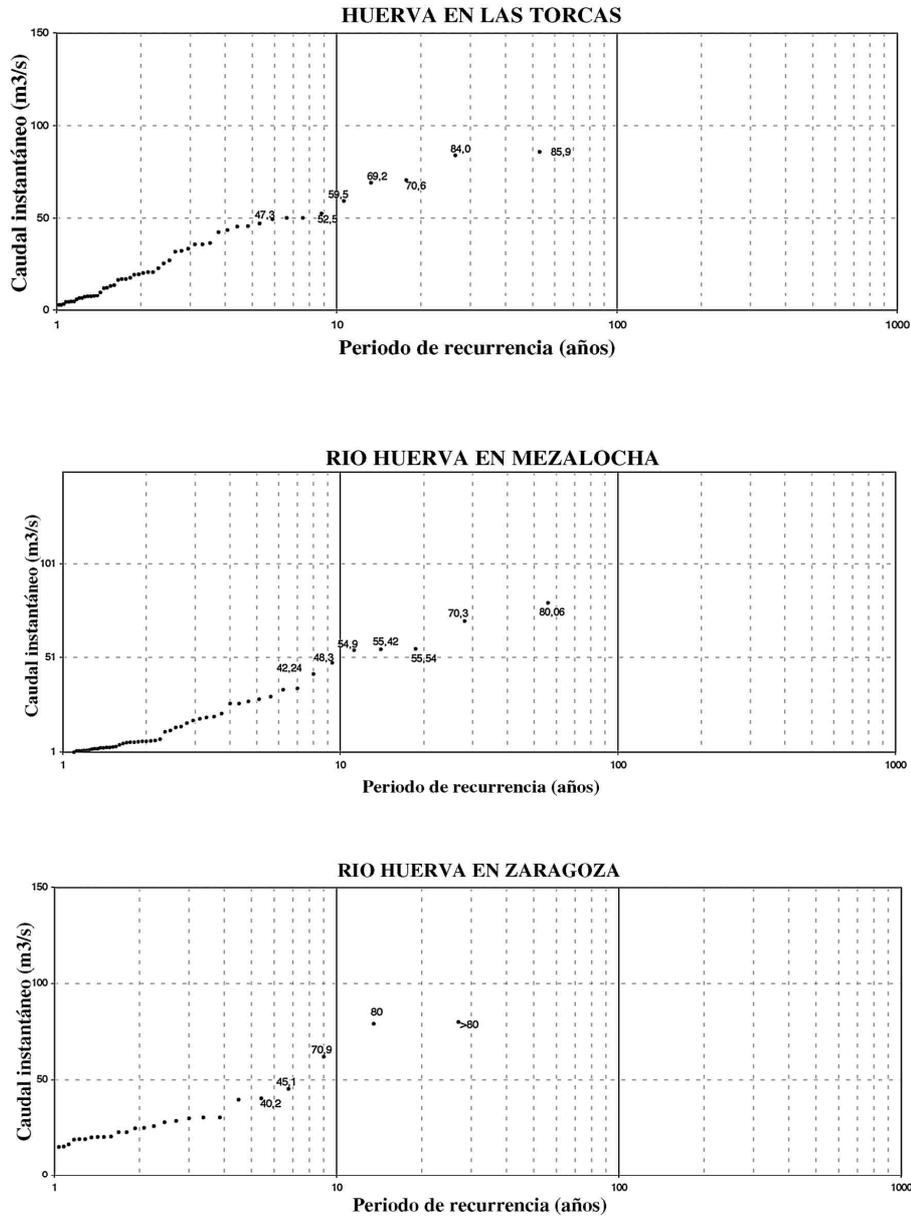


Figura 4. Relaciones caudal-frecuencia elaboradas a partir de los registros de las estaciones de aforo situadas en Zaragoza (1975-2001) y en los embalses de Las Torcas (1949-2001) y Mezalocha (1949-2001) aplicando la ecuación de Weibull.
 Figure 4. Plots showing the Peak discharge-frequency relationships for the Huerva River in Zaragoza city (1975-2001), Las Torcas reservoir (1949-2001) and Mezalocha reservoir (1949-2001) gauging stations applying the Weibull equation.

Además, la construcción de diques o el aumento de la capacidad de los embalses pueden alejar aún más la percepción del riesgo de inundaciones. Esta falsa sensación de seguridad podría acelerar el ritmo al que actualmente se está ocupando la llanura de inundación, aumentando así la exposición y el ries-

go potencial (Derrick Sewell, 1969; Dunne y Leopold, 1978; Costa y Baker, 1981).

Por estos motivos, la estrategia de mitigación más eficaz consiste en impedir la urbanización de las zonas susceptibles de verse afectadas por crecidas, para lo que es preciso la incorporación de

mapas de peligrosidad por inundación en la ordenación territorial (Dunne y Leopold, 1978; Costa y Baker, 1981; Dunne, 1988; Leopold, 1994; Penning-Rowsell y Tunstall, 1996; Luino, 2002; Ayala-Carcedo, 2002a, 2002b). Esta medida preventiva debería complementarse con otras actuaciones no estructurales como planes de vigilancia y evacuación apoyados en el Sistema de Información Hidrológica (SAIH), programas de seguros (Smith, 1996; Smith y Ward, 1998; Ministerio de Medio Ambiente, 2002) y planes informativos y educativos que ayuden a que la ciudadanía y la administración adquiera una percepción más acertada del riesgo (Derrick Sewell, 1969; Nuhfer *et al.*, 1993; Penning-Roswell y Tunstall, 1996).

4. El riesgo de subsidencia

4.1. Daños y caracterización geotécnica del subsuelo

Con el fin de analizar la distribución espacial de la subsidencia y sus posibles causas, se han caracterizado litoestratigráfica y geotécnicamente los materiales del subsuelo de Cadrete. Para ello se han integrado los datos de 4 sondeos mecánicos completos (PROYEX, com. pers.) con la información geomorfológica del emplazamiento. Las unidades identificadas de techo a muro son:

(1) Depósitos coluviales constituidos por limos yesíferos con cantos y bloques de yeso. El espesor de esta unidad disminuye progresivamente desde las partes proximales del escarpe, donde alcanza 18 m, hacia la terraza y la llanura de inundación. Estos sedimentos son producto de flujos hídricos que discurren por las laderas del escarpe y los barrancos que lo disectan y de desplomes procedentes del mismo. Los limos yesíferos se caracterizan por poseer una textura muy laxa, altamente porosa e inestable, en la que las partículas del esqueleto se encuentran enlazadas por cristales intersticiales de yeso secundario (Jimenez-Salas *et al.*, 1974). Esta particular estructura propicia que estos materiales puedan experimentar bruscas reducciones de volumen con la adición de agua, especialmente cuando están sometidos a cargas externas. La disolución de los puentes de yeso por la incorporación de agua provoca la reorganización de las partículas que pasan a formar un empa-

quetamiento más denso, con una consecuente disminución de volumen de hasta el 10% (Jiménez-Salas *et al.*, 1974; Faraco, 1975). Este fenómeno, conocido habitualmente como colapso en el ámbito nacional, es generalmente designado como hidrocolapso o hidrocompactación en la literatura internacional (Waltham, 1989; Dibben *et al.*, 1998; USGS, 1999). Por otra parte, estos depósitos no consolidados, pobremente clasificados y con una arquitectura poco uniforme, pueden también experimentar fenómenos de compactación diferencial. Ambos tipos de subsidencia pueden explicar los daños que afectan a las edificaciones situadas próximas al escarpe.

(2) Los depósitos fluviales situados bajo la superficie de la terraza T2 y de la llanura de inundación alcanzan hasta 15 m de potencia. Esta unidad está formada por una alternancia de tramos de orden métrico de limos de color anaranjado y gravas de naturaleza cuarcítica y calcárea con matriz limosa. Estas facies fluviales se interdigitan lateralmente con los depósitos coluviales anteriormente descritos. La potencia anómalamente elevada de la cobertera aluvial sugiere que la zona en la que se asienta Cadrete se ha visto afectada por un fenómeno de subsidencia sinsedimentaria debido a la disolución del substrato evaporítico. La compactación-consolidación de estos materiales podría ser la causante de tenues asentamientos diferenciales en el terreno.

(3) Entre la cobertera detrítica y el substrato existe un tramo de arcillas y margas verdosas oscuras con nódulos y fragmentos de yeso sin apenas resistencia a la penetración, y cuyo espesor en los testigos de sondeo varía entre 1 y 1,5 m. Este material es interpretado como un residuo kárstico en el que se concentra la fracción insoluble del substrato detrítico-evaporítico afectado por karstificación aluvial. La consolidación de este material de reducido espesor podría ser responsable de pequeños asentamientos en superficie.

(4) Bajo el nivel de alteración se encuentra el substrato mioceno formado por sedimentos detríticos de grano fino con niveles decimétricos a métricos de yeso y halita. En los sondeos realizados en Cadrete se han llegado a atravesar niveles de halita a partir de 18 m de profundidad que alcanzan hasta 5 m de espesor (PROYEX, com. pers.). La karstificación de estos materiales puede provocar tanto asentamientos graduales, como la generación de

dolinas colapso por el hundimiento del techo de cavidades. Este tipo de fenómenos puede afectar a la totalidad de la localidad de Cadrete.

4.2. Evaluación de los daños generados por subsidencia y sus causas

Con el fin de analizar la distribución espacial de las patologías que provoca la subsidencia así como sus causas, se ha confeccionado una cartografía de daños en fachadas de un sector de la localidad de Cadrete. El área estudiada incluye el casco antiguo situado al pie del escarpe y los edificios y naves industriales de reciente construcción ubicados dentro de los límites que definen el barranco de Marré y el río Huerva (Fig. 2). La cartografía se ha elaborado aplicando una clasificación de cuatro categorías de daños basada en la graduación establecida por el National Coal Board Mining Department de Gran Bretaña (N.C.B., 1975) para la evaluación de daños en edificios causados por subsidencia minera:

- Categoría 0 (ausencia de daños): ningún tipo de daño en las fachadas exteriores de los edificios.
- Categoría 1 (daños leves): agrietamientos de orden milimétrico asociados preferentemente a los vanos de puertas y ventanas. Leve atasco de puertas y ventanas.
- Categoría 2 (daños considerables): ligeros basculamientos en muros y grietas de hasta 1 cm. Los marcos de puertas y ventanas se encuentran deformados.
- Categoría 3 (daños severos): grietas de orden centimétrico. Basculamientos evidentes. Deformaciones muy patentes en marcos de puertas y ventanas.

Esta clasificación ha sido aplicada satisfactoriamente al estudio de la subsidencia por disolución de evaporitas en zonas urbanas como Ripon en Inglaterra (Griffin, 1986), Calatayud en la Provincia de Zaragoza (Gutiérrez y Cooper, 2002), o Ivars de Noguera en la Provincia de Lérida (Lucha *et al.*, 2004). Este tipo de cartografías, a pesar de que poseen claras limitaciones, debidas principalmente a que los marcadores utilizados para detectar las deformaciones no son homogéneos (edad, tipo de construcción, rehabilitaciones, etc.), son una herramienta de utilidad para obtener información sobre la distribución espacial de la

subsidencia y sus causas, pudiendo ser utilizada con fines preventivos y correctivos (Cooper y Calow, 1997; Gutiérrez, 2004).

Las zonas donde existe una mayor proporción de construcciones con daños severos se encuentran en el escarpe y en los sectores más próximos a la base del mismo (Fig. 2), especialmente al pie de la ladera en la que se ubica el castillo y la ladera contigua más al sur (Fig. 5B y D). Otros puntos en los que la subsidencia ha provocado daños severos son la Iglesia Parroquial de la Purísima Concepción de Cadrete y algunos edificios de su entorno (Fig. 2). Dicha iglesia, construida a principios del siglo XVIII, es una de las construcciones más dañadas de Cadrete, encontrándose ligeramente basculada y afectada por grietas con aperturas superiores a los 10 cm. Todos los edificios afectados del escarpe se sitúan sobre deslizamientos activos, por lo que sus patologías se atribuyen a movimientos de ladera, analizados en el apartado siguiente. En relación al resto de las construcciones dañadas, el deterioro parece estar relacionado con fenómenos de subsidencia por disolución y/o hidrocompactación, según sectores. La contribución de los procesos de compactación y consolidación parece ser irrelevante dada la magnitud de los asentamientos. El hecho de que exista una mayor concentración de edificios afectados por daños severos en una zona situada al pie del escarpe, donde los limos yesíferos alcanzan los 18 m, sugiere que la hidrocompactación juega un papel importante en la subsidencia que afecta a esta franja, sin descartar la intervención de la subsidencia por disolución. Por otra parte, la karstificación de los niveles de yeso y halita del sustrato debe ser la principal causa responsable de la subsidencia que afecta a los inmuebles situados en zonas alejadas del escarpe, donde no existen limos yesíferos. Otro argumento que apoya la intervención de la subsidencia kárstica en todo el casco urbano es la existencia de dolinas de colapso, las cuales aparecen preferentemente al pie del escarpe (Figs. 2 y 5A, B y E).

La existencia de niveles de halita en el sustrato posee una gran relevancia para el desarrollo de los fenómenos de subsidencia por disolución. Mientras que la solubilidad del yeso a 25 °C es de 2,4 gr/l, la de la halita es de 360 gr/l (Ford y Williams, 1989). Por otro lado, la solubilidad del yeso puede aumentar hasta 4 veces en soluciones con alta concentración en NaCl debido al aumento de la fuerza iónica (Ponsjack, 1940; Klimchouk, 2000). En consecuencia, la karstificación de la halita en el subsuelo de

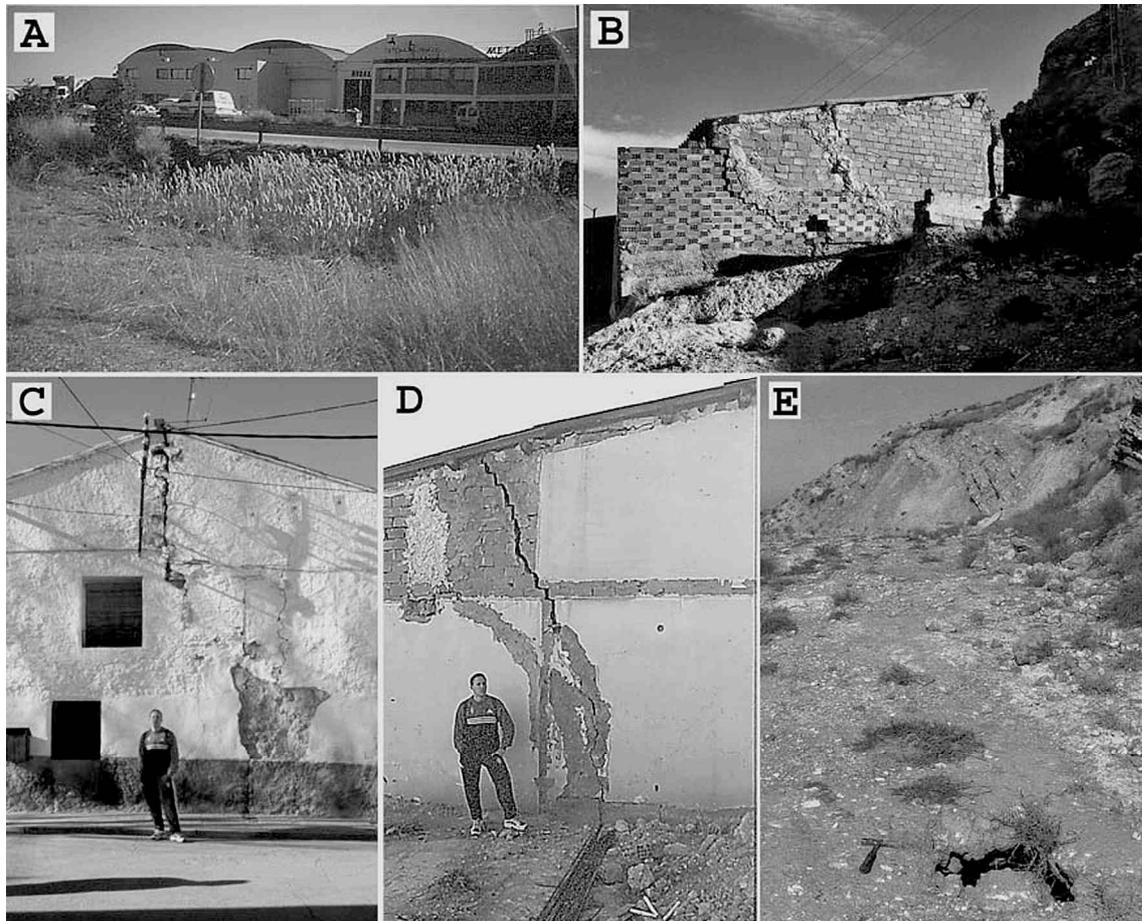


Figura 5. Efectos de la subsidencia en Cadrete y sus inmediaciones. A) Dolina vegetada por carrizo afectando a la nacional N-330 en la localidad de Cadrete. B) Casa dañada por subsidencia situada en la base del escarpe yesífero. Su cimentación se encuentra gravemente dañada por la aparición reciente de una dolina de colapso. C y D) Viviendas de la localidad próximas a la base del escarpe afectadas por subsidencia con aberturas decimétricas. E) Pequeña dolina de colapso en una berma excavada en la base de los deslizamientos rotacionales D2 y D3 (ver localización en la figura 2).

Figure 5. Effects of the subsidence in Cadrete village and its surroundings. A) Plant-covered sinkhole affecting the N-330 Motorway. B) Building situated at the toe of the scarp whose structure has been severely damaged as a result of the formation of a collapse sink-hole. C and D) Buildings at the toe of the scarp with subsidence-induced decimetric cracks. E) Collapse sinkhole in a berm excavated at the toe of the D2 and D3 rotational landslides (see location in Figure 2).

Cadrete puede generar cavidades a gran velocidad y aumentar la agresividad de los flujos subterráneos frente a la disolución del yeso. En los procesos de karstificación del sustrato pueden intervenir tanto las aguas del acuífero aluvial como los flujos más profundos que circulan a través del sustrato y que tienen como nivel de base el valle del Huerva. Es probable que la relación entre el acuífero terciario y el aluvial del Río Huerva esté condicionada a corto plazo por el régimen de precipitaciones. En periodos húmedos el nivel piezométrico del acuífero

kárstico terciario puede encontrarse por encima del nivel piezométrico del acuífero aluvial, produciéndose un flujo ascendente de aguas altamente mineralizadas desde el sustrato hacia el aluvial (sistema efluente) (Fig. 6A). Por el contrario, tras periodos prolongados de sequía, el nivel piezométrico del karst puede llegar a situarse por debajo del nivel freático del acuífero aluvial produciéndose un flujo descendente de aguas con gran poder de disolución desde el aluvial hacia el sustrato terciario (sistema influente) (Fig. 6B). En la localidad de Cadrete el

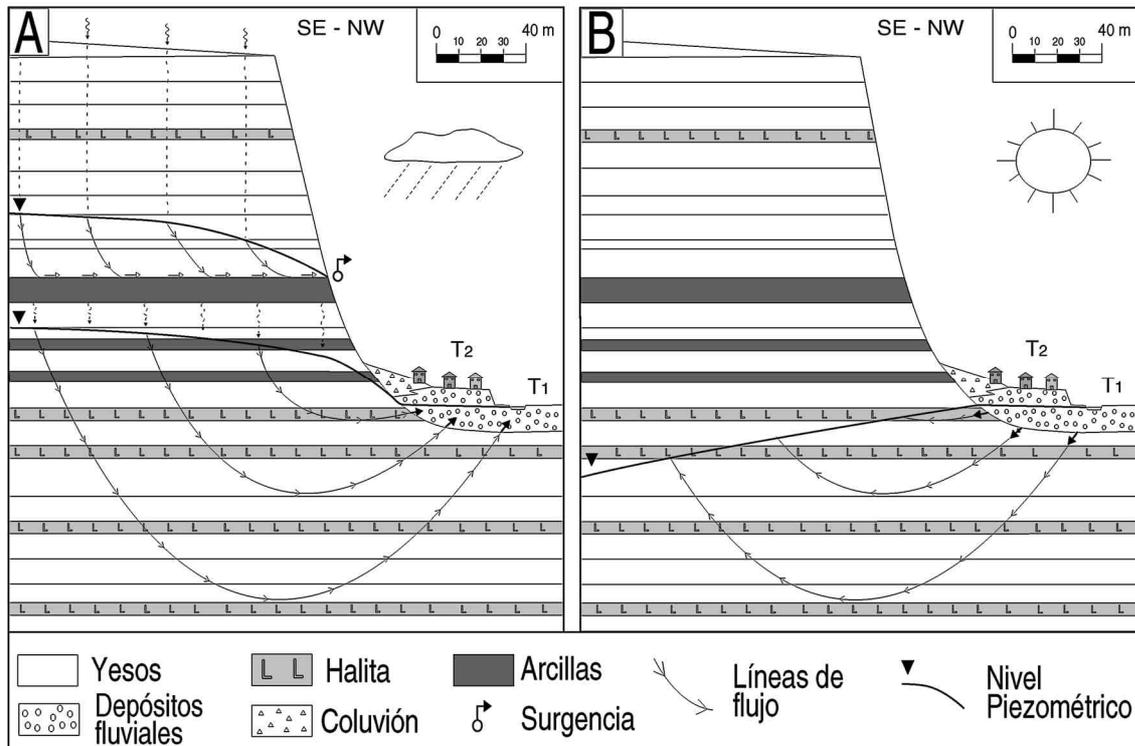


Figura 6. Posible funcionamiento hidrogeológico de los acuíferos kárstico y aluvial en la localidad de Cadrete controlado por el régimen de precipitaciones. A) En estaciones húmedas se produce la descarga de aguas altamente mineralizadas procedentes del sustrato en el aluvial (sistema efluente). B) En las estaciones secas el flujo se invierte fluyendo las aguas agresivas del aluvial hacia acuífero kárstico (sistema influente).
 Figure. 6. Hypothetical relationships between the karstic and alluvial aquifers in Cadrete village. A) During wet seasons highly concentrated waters discharge in the river terrace deposits (effluent system). B) During dry seasons fresh water from the alluvial aquifer may flow downwards feeding the underlying karstic aquifer (influent system).

esquema descrito se ve sensiblemente complicado por la existencia de una unidad basal más arcillosa que determina la presencia de un acuífero colgado (Fig. 6). Esta unidad hidroestratigráfica superior da lugar a pequeñas surgencias y rezumes asociados al techo de la unidad inferior y situados preferentemente en los barrancos que disectan el escarpe. Muy posiblemente los aportes adicionales de agua al subsuelo debidos a roturas en conducciones y pérdidas en acequias contribuyan localmente a acelerar la subsidencia por disolución e incluso la hidrocompactación (Guerrero *et al.*, 2004a).

4.3. Posibles medidas de mitigación

Aunque en la localidad de Cadrete no existen zonas en las que la peligrosidad por subsidencia sea nula, sí que parece que la franja situada al pie del escarpe es relativamente más susceptible, qui-

zás debido a que en este sector se superponen los efectos de la subsidencia kárstica y la hidrocompactación. Por esta razón conviene priorizar la urbanización de otras zonas e intensificar las medidas de corrección en este sector. Las medidas correctivas pueden enfocarse hacia la reducción de la actividad de los procesos (peligrosidad) o de la vulnerabilidad de las estructuras (Gutiérrez, 2003, 2004). Entre las primeras caben destacar las actuaciones encaminadas a minimizar la incorporación de agua al subsuelo. Para evitar roturas y fugas en las redes de abastecimiento y saneamiento diversos autores recomiendan la utilización de conductos flexibles y juntas telescópicas (N.C.B., 1975; Pauktyš *et al.*, 1999; Gutiérrez y Cooper, 2002). Las pérdidas en acequias y la infiltración del agua de escorrentía en los sistemas de drenaje pueden ser paliadas mediante revestimientos (Milanovic, 2003). Es también importante minimizar los apor-

tes adicionales de agua por riego. Si bien estas medidas pueden ayudar a atenuar la velocidad de los procesos que actúan bajo la superficie, difícilmente podemos llegar a detenerlos, por lo que para llevar a cabo una gestión eficaz del riesgo es indispensable proteger las estructuras mediante cimentaciones especiales a prueba de subsidencia (Guerrero *et al.*, 2004a; Gutiérrez, 2003, 2004).

La elección del tipo de cimentación depende de diversos factores como el tipo de construcción, características de la subsidencia o los costes del proyecto. Algunas de las opciones planteadas por diversos autores son (N.C.B., 1975; Cooper, 1995; Cooper y Calow, 1997; Braja, 1999; Paukty *et al.*, 1999): (1) Cimentación con pilotes apoyados en el sustrato inalterado. (2) Estructuras rígidas continuas (*continuous foundations*) formadas por un retículo de vigas longitudinales y transversales que pueden tener una mayor anchura en la base para abarcar una mayor superficie. Los pilares maestros del edificio se apoyan en los puntos de intersección de las vigas, (3) Cimentaciones hidráulicas (*jackable foundations*) que permitan corregir *a posteriori* basculamientos provocados por movimientos diferenciales, (4) Cimentaciones enlazadas (*linked foundations*) en las que edificios contiguos comparten las estructuras portantes.

5. El riesgo de movimientos de ladera

5.1. Tipos y distribución

Los movimientos de ladera que afectan al escarpe de la localidad de Cadrete han sido estudiados previamente por Guerrero *et al.* (2004b). En este trabajo se expone un breve análisis de los mismos y como aportación adicional se plantean posibles medidas que pueden ayudar a mitigar los daños que provocan este tipo de procesos. Los movimientos de ladera han sido cartografiados en campo sobre un mapa topográfico a escala 1:1000 (Fig. 2) y las tipologías diferenciadas están basadas en las clasificaciones de Varnes (1978) y Cruden y Varnes (1996). Los deslizamientos rotacionales, los desprendimientos y los vuelcos son los tipos más abundantes. También se han identificado deslizamientos traslacionales y movimientos complejos en los que intervienen procesos de expansión lateral, rotación y deslizamiento.

La cartografía elaborada muestra cómo en la distribución de todos estos tipos existe un marcado control litoestratigráfico, afectando la mayor parte de los movimientos a la unidad arcillosa inferior y los yesos basales de la unidad superior (Fig. 2).

Los desprendimientos y los vuelcos (Fig. 7A) se originan en paredes formadas por rocas yesíferas, siendo especialmente frecuentes en los cantiles descalzados que forman los yesos de la base de la unidad superior. Estos movimientos están favorecidos por los sistemas de fracturas (diaclasas y grietas de descarga) ensanchadas por disolución que individualizan bloques de orden decimétrico a métrico. Aunque se ha identificado algún deslizamiento traslacional de escasa entidad, gran parte de los deslizamientos cartografiados son rotacionales (Fig. 7B y C), siendo frecuentemente múltiples. Prácticamente la totalidad de los deslizamientos afectan a los materiales arcillosos de la unidad inferior. Si bien la mayor parte de los deslizamientos rotacionales son antiguos e inactivos, algunos han experimentado reactivaciones como consecuencia de diversos tipos de alteraciones provocadas por el hombre en la ladera (deslizamientos rotacionales D1, D2, D3, D4 y D5) (Fig. 2). Un aspecto destacable es que todas las construcciones ubicadas en el sector septentrional del escarpe se asientan sobre antiguos deslizamientos rotacionales donde la topografía es aparentemente más favorable. El deslizamiento D1 ha experimentado una reactivación parcial debido a las obras de excavación y posterior construcción de un edificio, el cual está afectado por grietas con aperturas de orden centimétrico. Los deslizamientos D2 y D3 (Figs. 7B, C y 8B) han sido reactivados por la excavación de una berma que afecta a la parte inferior de los mismos y en la que se han formado diversas dolinas de colapso (Fig. 5E), lo que indica que los procesos de karstificación juegan un papel importante en la desestabilización del talud. La construcción de dos depósitos de agua en la parte inferior y media del deslizamiento D4, previa excavación de la ladera, ha provocado la reactivación de este movimiento. Ambos depósitos se encuentran dañados, especialmente el ubicado en el sector medio que presenta grietas centimétricas por las que se producen pérdidas de agua. La reactivación del deslizamiento D5 parece ser consecuencia de la construcción de varias vivien-

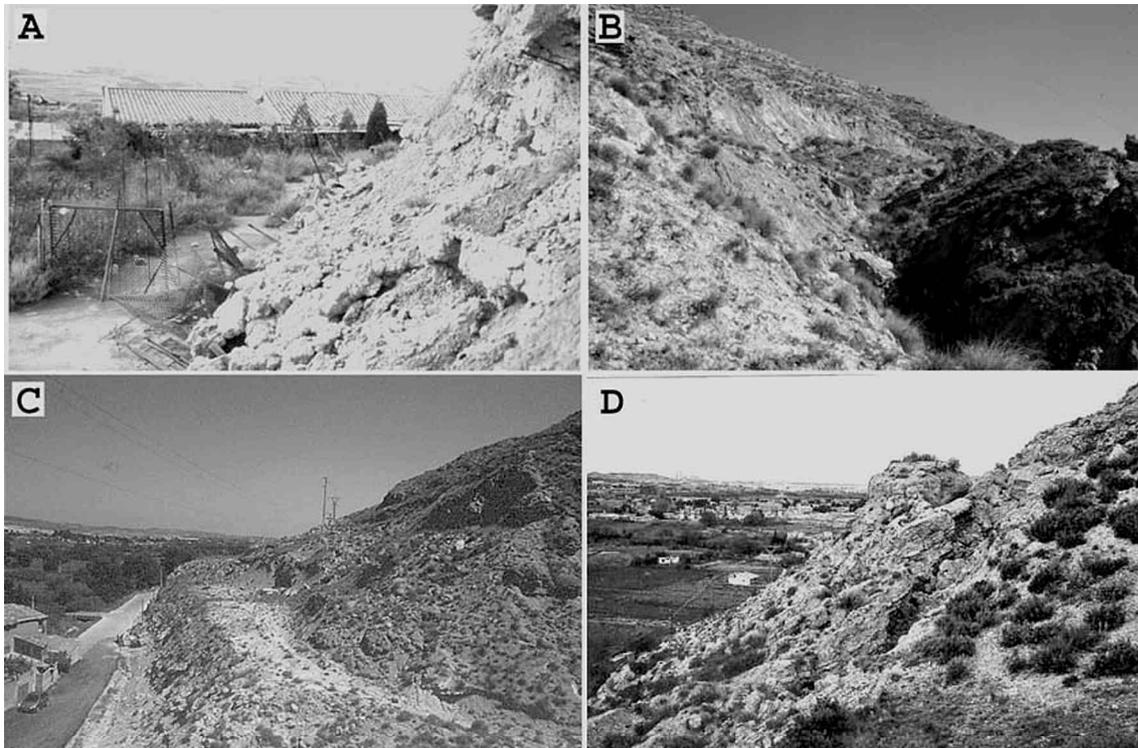


Figura 7. A) Desplome afectando a uno de solares más cercanos al escarpe. B) Deslizamiento D3 previamente a la excavación de una berma. C) Berma excavada en el deslizamiento D3 provocando su reactivación. D) Bloques de yeso de más de 45 m³ individualizados por grietas extensionales paralelas a la dirección del escarpe de hasta 70 m de longitud, 3 m de ancho. Estos bloques están afectados por movimientos de expansión lateral y vuelco como consecuencia de la deformación de los niveles de arcilla infrayacentes. Figure 7. A) Rockfall affecting one of the closest properties to the scarp. B) D3 rotational landslide before the excavation of a berm. C) Reactivation of D3 rotational landslide after the excavation of the berm. D) Gypsum blocks more than 45 m³ individualised by extensional cracks up to 70 m long and 3 m wide. The plastic deformation of the underlying clays leads to lateral spreading processes and topples.

das unifamiliares con jardines y piscinas, las cuales muestran deformaciones evidentes.

Los movimientos de expansión lateral, menos frecuentes, se han reconocido en las inmediaciones del castillo y en el extremo septentrional de la zona de estudio, afectando en ambos casos a materiales yesíferos apoyados sobre sedimentos arcillosos (Fig. 2). Los situados próximos al castillo afectan a capas de yeso de 0,5 a 1 m de espesor apoyadas sobre tramos arcillosos de hasta 5 m de potencia. Los bloques de yeso individualizados por los sistemas de fracturas están afectados por desplazamientos laterales, rotación y subsidencia como consecuencia de la deformación plástica de las arcillas basales, las cuales llegan a englobar los bloques de yeso. En el sector norte del escarpe el tramo de yesos de unos 15 m de espesor situado sobre las arcillas del techo de la unidad inferior está afectado

por un sistema de grietas de tracción paralelas al escarpe de hasta 70 m de longitud y 3 m de ancho (Fig. 7D). Estas discontinuidades individualizan paneles ligeramente basculados que han experimentado un desplazamiento lateral y una rotación hacia el valle por un proceso de *cambering* provocado por la deformación plástica de las arcillas basales, pudiendo evolucionar a vuelcos, desprendimientos o deslizamientos traslacionales (Varnes, 1978; Cruden y Varnes, 1996; Pasuto y Soldati, 1996).

5.2. Factores condicionantes y desencadenantes

Con relación a los factores condicionantes, un hecho significativo es que la mayoría de los movimientos de ladera afectan a los sedimentos arcillosos de la unidad inferior o a los niveles yesíferos basales de la unidad superior, lo que demuestra el papel

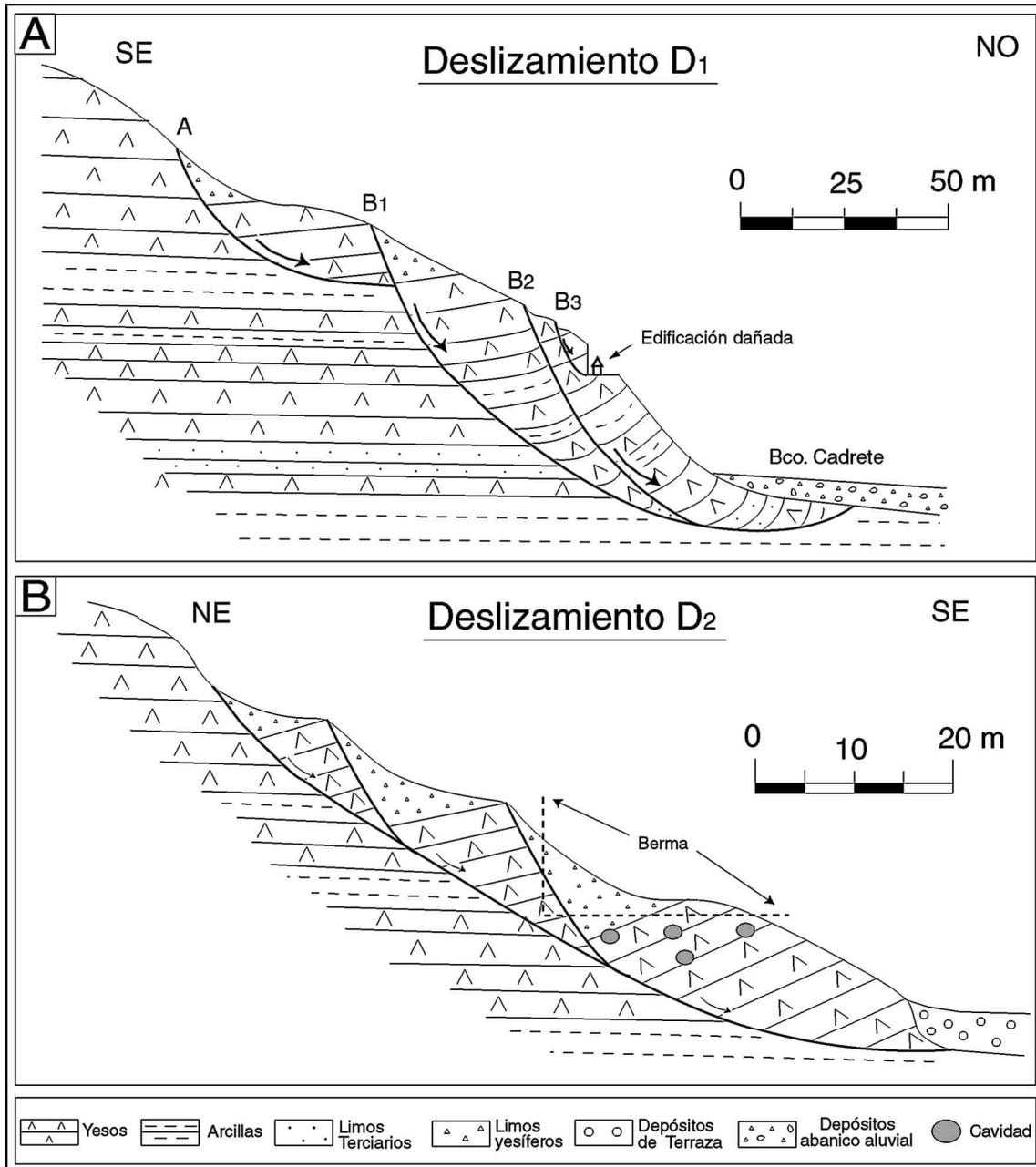


Figura 8. Corte de los deslizamientos múltiples D1 y D2 actualmente activos como consecuencia de la acción antrópica.
 Figure 8. Sketch of D1 and D2 multiple rotational slides.

determinante que juegan las arcillas. El desarrollo de los movimientos de ladera está relacionado en buena medida con el contrastado comportamiento hidrogeológico de las arcillas y los yesos, y la relativa celeridad con la que la resistencia mecánica de estos materiales puede verse reducida por la presencia de

agua. Por una parte, las arcillas en contacto con el agua llegan a adquirir un comportamiento plástico y la disolución de sus componentes yesíferos provoca su desintegración. Además, los niveles arcillosos se erosionan a mayor velocidad que los yesíferos, especialmente allí donde existen rezumes (*sapping*),

dando lugar a cornisas inestables en los tramos yesíferos suprayacentes. El ensanchamiento por disolución de las discontinuidades es el principal proceso que contribuye a reducir la resistencia mecánica de los yesos (Gutiérrez *et al.*, 1994). La subsidencia kárstica que afecta a la base de la ladera, tal y como evidencian la generación de colapsos y las deformaciones que presentan los edificios, también puede incidir de forma significativa en la inestabilidad del escarpe (Guerrero *et al.*, 2004b).

Los principales factores desencadenantes están relacionados con diversas modificaciones llevadas a cabo por el hombre en las laderas en tiempos recientes. Como se ha señalado, la aplicación de sobrecargas (construcciones, vertidos), las modificaciones en la geometría del talud (excavaciones) y los aportes adicionales de agua (fugas, riegos) han provocado la reactivación de diversos deslizamientos rotacionales antiguos. Otro factor responsable de la formación, reactivación o aceleración de movimientos de ladera son las lluvias intensas y prolongadas. Éstas provocan una reducción de los esfuerzos normales efectivos en planos potenciales de rotura, aumentan el peso de la ladera y favorecen los procesos de meteorización que contribuyen a reducir la resistencia mecánica de los materiales (Guerrero *et al.*, 2004b).

5.3. Posibles estrategias de mitigación

La estrategia de mitigación más eficaz consiste en evitar la ocupación de las zonas potencialmente inestables. Como primera regla de cara a la planificación convendría impedir la construcción en zonas afectadas por deslizamientos. Este planteamiento se sustenta en el hecho de que gran parte de los daños provocados por movimientos de ladera en Cadrete son debidos a la reactivación de antiguos deslizamientos rotacionales sobre los que se han realizado construcciones y diversas actuaciones adversas para la estabilidad del talud (excavaciones, aportes de agua). Como segunda regla sería deseable limitar en la medida de lo posible la ubicación de estructuras en los sectores más inestables de la ladera correspondientes a la unidad inferior y los niveles yesíferos basales de la unidad superior, tal y como muestra la cartografía realizada (Fig. 2). Entre las medidas de carácter no estructural que pueden contribuir a reducir la actividad de la ladera cabe citar el minimizar los aportes artificiales de agua a la ladera e impedir

las excavaciones y sobrecargas por vertidos de escombros. Quizás las medidas estructurales más indicadas para la estabilización de los deslizamientos existentes o taludes con un coeficiente de seguridad bajo son la construcción de tacones o muros al pie de la ladera y puntualmente la excavación de zanjas de drenaje superficial. El alcance de los desplomes puede reducirse mediante mallados, vallas metálicas, cunetas o bermas (Laín, 2002; Ferrer, 2002).

6. Conclusiones

Originalmente la localidad de Cadrete quedaba restringida a un nivel de terraza colgado sobre la llanura de inundación del río Huerva y al pie de un escarpe formado por sedimentos yesíferos y arcillosos. En las últimas tres décadas, el rápido crecimiento que ha experimentado esta población ha ido acompañado por la colonización de zonas de la llanura de inundación y del escarpe susceptibles de verse afectadas por inundaciones y movimientos de ladera, respectivamente. El resultado, ya previsible, es que en los últimos años numerosas construcciones recientes han sido afectadas por crecidas y movimientos de ladera. Por otra parte, un buen número de inmuebles de esta población “multiriesgo” se encuentran severamente dañados por subsidencia, siendo relativamente frecuentes la aparición de colapsos y la rotura de conducciones. La experiencia y los datos de caudales disponibles indican que la llanura de inundación del curso bajo del río Huerva se ve afectada por avenidas, en ocasiones súbitas, con una frecuencia elevada (<10 años). Cabe esperar, que de no adoptar medidas de mitigación eficaces, los daños por inundaciones aumentarán considerablemente en un futuro próximo dada la rápida colonización que están experimentando las zonas inundables. En este sentido, teniendo en cuenta las limitaciones y problemas que plantean las medidas de corrección estructurales, se plantea como medida preventiva prioritaria el detener la ocupación de la llanura de inundación. Con relación a los movimientos de ladera, la cartografía detallada del escarpe muestra como las distintas tipologías identificadas (deslizamientos rotacionales y traslacionales, desprendimientos, vuelcos y expan-

siones laterales) afectan fundamentalmente a la unidad inferior (arcillas y yesos) y al tramo yesífero basal de la unidad superior (yesos con margas). Entre los factores que conducen a la reducción de la resistencia mecánica de los materiales del escarpe destacan el comportamiento plástico y la disgregación de las arcillas por disolución de sus componentes yesíferos en presencia de agua, y la karstificación controlada estructuralmente de los yesos. En los últimos años, algunos deslizamientos rotacionales antiguos han experimentado reactivaciones como consecuencia de alteraciones provocadas por el hombre en la ladera (excavaciones, sobrecargas, aportes de agua), causando daños en diversas construcciones recientes. Esta circunstancia aconseja evitar la ubicación de estructuras en los sectores más inestables del escarpe y especialmente sobre antiguos deslizamientos, a pesar de que ofrezcan topografías aparentemente más favorables. Respecto a los daños por subsidencia, el mapa de daños elaborado muestra como las zonas más afectadas se sitúan al pie del escarpe y el entorno de la iglesia. Se plantean como causas más probables de la subsidencia la karstificación sub-superficial de niveles de yeso y posiblemente halita, y la hidrocompactación de limos yesíferos. Las medidas de mitigación habitualmente utilizadas en estas circunstancias incluyen la utilización de conducciones deformables y el diseño de cimentaciones especiales. El presente trabajo pone de manifiesto como los estudios geomorfológicos detallados son una herramienta indispensable para el análisis y mitigación de los riesgos geológicos, ayudando a identificar las zonas sujetas a la influencia de procesos potencialmente más peligrosos.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al Ayuntamiento de Cadrete por la ayuda prestada, a las empresas de geotécnia ENTECSA y PROYEX por aportar datos de sondeos y a la Confederación Hidrográfica del Ebro por el suministro de datos foronómicos. Este trabajo ha sido subvencionado por el proyecto de investigación BTE2000-1149.

Referencias bibliográficas

- Arlegui, L. & Simón, J.L. (2001): Geometry and distribution of regional joint sets in a non-homogeneous stress field: case study in the Ebro Basin (Spain). *Journal of Structural Geology*, 23, 297-313.
- Ayala-Carcedo, F.J. (1999): Selección racional de estrategias estructurales y no estructurales y de actuaciones públicas y privadas en la mitigación del riesgo de inundaciones en España. Un análisis comparativo. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 93 (I) 99-114.G
- Ayala-Carcedo, F.J. (2002a): El sofisma de la imprevisibilidad de las inundaciones y la responsabilidad social de los expertos. Un análisis del caso español y sus alternativas. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 33, 79-92.
- Ayala-Carcedo, F.J. (2002b): Estrategias y medidas de mitigación del riesgo de inundaciones. Gestión de zonas inundables. En: *Riesgos naturales* (F.J. Ayala-Carcedo & J. Olcina, eds.). Ariel Ciencia, Barcelona, 977-995.
- Ayala, F. & Ferrer, M. (1988): *Catálogo Nacional de Riesgos Geológicos*. ITGE, Madrid, 263 pp.
- Ayala-Carcedo, F.J., Olcina, J. & Vilaplana, J.M. (2003): *Impacto económico y estrategias de mitigación de los riesgos naturales en España en el periodo 1990-2000*. Gerencia de Riesgos y Seguros, MAPFRE, 84, 19-27.
- Ayuntamiento de Cadrete. (2004). <http://www.cadrete.es/web/index.asp>
- Boletín Oficial de Aragón (BOA), N.º 40 del 7 de Julio de 1990. <http://www.boa.es>
- Braja, M.D. (1999): *Principles of foundation engineering*. PWS Publishing, California State University, Sacramento, 855 pp.
- Camarasa, A.M. (2002): Crecidas e inundaciones. En: *Riesgos naturales* (Ayala-Carcedo, F.J. y Olcina, J.). Ariel Ciencia, Barcelona, 859-879.
- Cendrero, A. (1997): Riesgos naturales e impacto ambiental. En: *La interpretación de la problemática ambiental* (M.N. Villaverde & R.L. Tébar, coords.). Fundación Universidad-Empresa, Madrid, 23-90.
- Comisión Nacional de Protección Civil (1983): *Estudio de inundaciones históricas, mapa de riesgos potenciales, Cuenca del Ebro*. Juicio del Senado de 1983. 2 Tomos.
- Confederación Hidrográfica del Ebro (2001). Defensas y acondicionamiento de cauces. <http://www.opf.chebro.es/PlanHidrologico/PlanH/Normativa/DEFENSAS.html#M4>
- Cooper, A.H. (1995): Subsidence hazards due to the dissolution of Permian gypsum in England: investigation and remediation. En: *Karst geohazards* (Beck, B., ed.). Balkema, Rotterdam, 23-29.
- Cooper, A.H. & Calow, R. (1997): *Gypsum geohazards: their impact on development*. Technical Report WC/97/17, British Geological Survey, Nottingham, 30 pp.

- Costa, J.E. & Baker, V.R. (1981): *Surficial geology: building with the earth*. John Wiley & Sons, New York, 498 pp.
- Cruden, D.M. & Varnes, D.J. (1996): Landslide types and processes. En: *Landslides. Investigation and Mitigation* (Turner, A.K. & Schuster, R.L., eds.). National Academy Press, Washington D.C., 36-73.
- Derrick Sewell, W.R. (1969): Human response to floods. En: *Water, earth and man: a synthesis of hydrology, geomorphology and socio-economic geography*. (R.J. Chorley, ed.). Methuen & Co. Ltd., Londres, 431-451.
- Dibben, S.C., Jefferson, I.F. & Smalley, I.J. (1998): The "Loughborough Loess" Monte Carlo model of soil structure. *Computers and Geosciences*, 24, 4, 345-352.
- Dunne, T. (1988): Geomorphologic contributions to flood control planning. En: *Flood geomorphology* (V.R. Baker, R. Craig & P.C. Patton, eds.). John Wiley & Sons, New York, 421-438.
- Dunne, T. & Leopold, L.B. (1978): *Water in environmental planning*. W.H. Freeman and Company, New York, 818 pp.
- Esnaola, J.M., Santos, J.A., Gil, C. & Marqués, L.A. (1995): *Memoria y Mapa Geológico de España 1: 50.000; Alagón (354)*. ITGE, Madrid, 46 pp.
- Esnaola, J.M. & Gil, C. (1995): *Memoria y Mapa Geológico de España 1: 50.000; Zaragoza (382)*. ITGE, Madrid, 46 pp.
- Faraco, C. (1975): Estudio del colapso de la estructura de los limos yesíferos. *Revista de Obras Públicas*, 3127, 776-790.
- Ferrer, M. (2002): Taludes. En: *Ingeniería Geológica* (González de Vallejo, L., coord.). Prentice Hall, Madrid, 429-486.
- Ford, D.C. & Williams, P. (1989): *Karst Geomorphology and Hydrology*. Unwin Hyman, London, 601 pp.
- Gil, S. (1970): *Cadrete: un municipio del valle del Huerva*. Institución Fernando el Católico, CSIC, Zaragoza. 95 pp.
- González de Vallejo, L. (1988): La importancia socioeconómica de los riesgos geológicos en España. En: *Riesgos geológicos* (F.J. Ayala-Carcedo & J.J. Durán, eds.). IGME, 21-34.
- Griffin, D.A. (1986): *Geotechnical assesment of subsidence in and around Ripon, North Yorkshire, due to natural solution*. University of Newcastle upon Tyne, M Sc Thesis, 85 pp.
- Guerrero, J., Gutiérrez, F. & Lucha, P. (2003): Subsidence hazard due to evaporite dissolution in the Huerva River Valley (Ebro Basin, Spain). Ninth Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impact of Karst. Alabama, ASCE, 150-162.
- Guerrero, J., Gutiérrez, F. & Lucha, P. (2004a): Paleosubsidence and active subsidence due to evaporite dissolution in Zaragoza city area (Huerva River valley, NE Spain). *Engineering Geology*, 72 (2), 309-329.
- Guerrero, J., Gutiérrez, F. & Lucha, P. (2004b): El riesgo de movimientos en escarpes yesíferos. El caso de la localidad de Cadrete (Depresión del Ebro). En: *Riesgos Naturales y Antrópicos en Geomorfología* (Benito, G. & Díez Herrero, A.). *VIII Reunión Nacional de Geomorfología*. Toledo, 453-462.
- Gutiérrez, F. (1998): *Fenómenos de subsidencia por disolución de formaciones evaporíticas en las fosas neógenas de Teruel y Calatayud (Cordillera Ibérica)*. Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza, 569 pp.
- Gutiérrez, F. (2003): El riesgo de dolinas de subsidencia en terrenos evaporíticos. *Historia Natural*, 3, 52-60.
- Gutiérrez, F. (2004): El riesgo de dolinas de subsidencia en terrenos evaporíticos. Investigación y mitigación. En: *Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle Amministrazioni Statali e locali nel governo del territorio* (S. Nisio, S. Panetta, & L. Vita, eds.). Apat-dipartimento Difesa del Suolo, Roma, 367-377.
- Gutiérrez, F., Arauzo, T. & Desir, G. (1994): Deslizamientos en el escarpe en yesos de Alfajarín (Zaragoza). *Revista Cuaternario y Geomorfología*, 8 (1-2), 57-68.
- Gutiérrez, F., Orti, F., Gutiérrez, M., Pérez-González, A., Benito, G., Gracia, J. & Durán Valsero, J.J. (2001): The stratigraphical record and activity of evaporite dissolution subsidence in Spain. *Carbonate and Evaporites*, 16 (1), 46-70.
- Gutiérrez, F. & Cooper, A.H. (2002): Evaporite dissolution subsidence in the historical city of Calatayud, Spain; damage appraisal and prevention. *Natural Hazards*, 25, 259-288.
- Gutiérrez, F., Lucha, P. & Guerrero, J. (2004): La dolina de colapso de la casa azul de Calatayud (Noviembre de 2003). Origen, efectos y pronóstico. En: *Riesgos Naturales y Antrópicos en Geomorfología* (Benito, G. & Díez Herrero, A.). *VIII Reunión Nacional de Geomorfología*. Toledo, 477-489.
- Jimenez-Salas, J.A., Justo, J.L., Romana, M. & Faraco, C. (1974): Colapso de limos y arcillas yesíferos de baja plasticidad en climas áridos y semiáridos. *Boletín de Información de Transporte y Mecánica de Suelo*, CEDEX, 105, 13-20.
- Klimchouk, A. (2000): Dissolution and conversions of gypsum and anhydrite. En: *Speleogenesis evolution of karst aquifers* (Klimchouk, A., Ford, D., Palmer, A. & Dreybrodt, W., eds.). National Speleological Society, Huntsville, Alabama, 161-168.
- Laín, R. (2002): Técnicas de estabilización de laderas y taludes. En: *Riesgos naturales* (F.J. Ayala-Carcedo & J. Olcina, eds.). Ariel Ciencia, Barcelona, 421-444.
- Leopold, L.B. (1994): *A view of the river*. Harvard University Press, Cambridge, 298 pp.
- Lucha, P., Gutiérrez, F. & Guerrero, J. (2004): Riesgos por subsidencia derivados de la disolución natural y artificial de evaporitas en el sector occidental del anticlinal de Barbastro (Cuenca del Ebro). En: *VIII Reunión Nacional de Geomorfología*. Toledo, en Prensa.
- Luino, F. (2002): Flooding vulnerability of a town in the Tanaro Basin: the case of Ceva (Piedmont-Northwest Italy). En: *Paleofloods, historical data and climatic variability. Applications in flood risk assessment* (V.R. Thorndycraft, Benito G., M. Barriendos & M.C. Llasat, eds.). Proceedings of the Phefra Workshop, Barcelona, 321-326.

- Milanovic, P. (2003): Prevention and remediation in karst engineering. En: *Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst* (B. Beck, ed.). Geotechnical Special Publication, 122, 3-31.
- Ministerio de Medio Ambiente (2002): Libro Blanco del Agua en España. http://www.mma.es/rec_hid/libro_b/sintesis.pdf.
- N.C.B. (1975): *Subsidence Engineer's Handbook*. National Coal Board Mining Department, Reino Unido, 111 pp.
- Nuher, E.B., Proctor, R.J. & Moser, P.H. (1993): The citizen's guide to geologic hazards. En: *Guía ciudadana de los riesgos geológicos* (L. Suárez & M. Regueiro, eds.). Ilustre Colegio Oficial de Geólogos de España, 196 pp.
- Ortí, F. (2000): Unidades glauberíticas del Terciario Ibérico: nuevas aportaciones. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 13 (2), 65-87.
- Ortí, F. & Salvany, J.M. (1997): Continental evaporitic sedimentation in the Ebro basin during the Miocene. En: *Sedimentary deposition in rift and foreland basins in France and Spain* (G. Busson & B.Ch. Schreiber, eds.). Columbia University Press, New York, 420-439.
- Pasuto, A. & Soldati, M. (1996): Rock spreading. En: *Landslide recognition* (R. Dikau, D. Brunsden, L. Schrott & M.L. Visen, eds.). Wiley, Chichester, 122-136.
- Paukty, B., Cooper, A.H. & Arustiene, J. (1999): Planning for gypsum geohazards in Lithuania and England. *Engineering Geology*, 52, 93-103.
- Penning-Rowsell, E.C. & Tunstall, S.M. (1996): Risks and resources: defining and managing the floodplain. En: *Floodplain processes* (M.G. Anderson, D.E. Walling & P.D. Bates, eds.). John Wiley & Sons, Chichester, 493-533.
- Ponsjack, E. (1940): Deposition of calcium sulphate from sea water. *American Journal of Science*, 239, 559-568.
- Pujadas, J. (2002): Las inundaciones en España: impacto económico y gestión del riesgo. En: *Riesgos naturales* (F.J. Ayala-Carcedo & J. Olcina, eds.). Ariel Ciencia, Barcelona, 879-888.
- Quirantes, J. (1978): *Estudio sedimentológico y estratigráfico del Terciario continental de los Monegros*. Institución Fernando El Católico, CSIC, 200 pp.
- Smith, K. (1996): *Environmental Hazards. Assessing risk and reducing disaster*. Routledge, Londres, 389 pp.
- Smith, K. & Ward, R. (1998): *Floods. Physical processes and human impacts*. John Wiley & Sons, Chichester, 382 pp.
- Torrescusa, S. & Klimowitz, J. (1990): Contribución al conocimiento de las evaporitas Miocenas (Fm. Zaragoza) de la Cuenca del Ebro. En: *Formaciones evaporíticas de la Cuenca del Ebro y cadenas periféricas y de la zona de Levante* (F. Ortí & J.M. Salvany, eds.). ENRESA-GPPG, Barcelona, 62-66.
- USGS (1999): *Land subsidence in the United States*. U.S. Geological Survey Circular 1182, 177 pp.
- Varnes, D.J. (1978): Slope movement types and processes. En: *Landslides. Analysis and Control* (R.L. Schuster & R.J. Krized, eds.). National Academy of Science, Washington D.C., 11-29.
- Viessman, Jr.W. & Lewis, G.L. (1995): *Introduction to hydrology*. Harper Collins, New York, 760 pp.
- Waltham, A.C. (1989): *Ground subsidence*. Chapman and Hall, New York, 202 pp.

Recibido 7 de septiembre 2004

Aceptado 1 de marzo 2005