

DOLINAS ALUVIALES EN LAS TERRAZAS DEL EBRO AL OESTE DE ZARAGOZA: UN ANALISIS EMPIRICO DE LOS FACTORES DE RIESGO

J.L. SIMON; M.A. SORIANO; J. GRACIA & T. SALVADOR

Departamento de Geología. Universidad de Zaragoza

Resumen. La zona central de la Depresión del Ebro está rellena por materiales yesíferos y carbonatados de edad neógena, sobre los que se disponen varios niveles encajados de terrazas y glacis cuaternarios. En este contexto se han producido un gran número de dolinas aluviales como consecuencia de la disolución del yeso terciario y arrastre de los detríticos cuaternarios. Se localizan de forma especial al NW de la ciudad de Zaragoza, provocando graves problemas geotécnicos.

Este trabajo ofrece una primera contribución al análisis regional del fenómeno, determinando cuáles son las principales variables que coadyuvan a su desarrollo. Para ello se realiza la cartografía detallada de dolinas de varias épocas, la recopilación de datos acerca de sus posibles factores genéticos y el análisis empírico de las relaciones entre ambos. Hemos constatado que, a una escala de trabajo 1:50.000, las variables principales que intervienen en el desarrollo de las dolinas son: el bajo contenido en sulfatos del agua, las zonas de vaguada en la superficie del contacto entre Terciario y Cuaternario, el bajo porcentaje de lutitas en el Cuaternario, las elevadas variaciones anuales del nivel freático y el reducido espesor de la cubierta aluvial. Los primeros favorecen la creación de cavidades en el subsuelo, y el último, el hundimiento de la cubierta. Estas cinco variables han sido combinadas en una ecuación empírica, cuyos valores regionales se expresan en un mapa a escala 1:50.000 con la ayuda de un programa de cartografía digitalizada, constituyendo nuestro modelo teórico de riesgo.

Palabras clave: Dolina aluvial, análisis de riesgo, mapa de riesgo.

Abstract. The central part of the Ebro Basin was filled by gypsum and carbonate materials of a Neogene age. Quaternary alluvial terrace and pediment levels overlay the Tertiary layers. Alluvial dolines have been developed in this region because the gypsum dissolution and dragging of detrital materials. These depressions are mainly located in the NW of the city of Zaragoza, and they are responsible for frequent geotechnical problems.

This work presents a regional study of the factors which produce this phenomenon. With this purpose, a detailed mapping of dolines, a compilation of the main variables related to their development and a empirical analysis of the relations between both were made. For a 1:50.000 scale, we have found that the main factors which favour doline generation are: low sulphate contents in water, areas where the contact between Tertiary and Quaternary deposits is low, low percentage of lutitic materials in the Quaternary, high annual variations of the water table and low thickness of the Quaternary cover. The last factor favours the collapse of the cover and the others contribute to the generation of cavities in the subsoil. These five variables have been combined into a empirical equation, whose regional values are expressed on a 1:50.000 map elaborated by means of a program of digital cartography. Both constitute our theoretical hazard model.

Key words: Alluvial doline, hazard analysis, hazard map.

1. Introducción

La zona central de la Depresión del Ebro se encuentra rellena por sedimentos paleógenos y neógenos, de composición detrítica en los márgenes y carbonatada y evaporítica (yesos y halita) en el centro (Quirantes, 1978). Durante el Cuaternario la incisión de la red fluvial produjo el desarrollo de relieves estructurales y la formación de ocho niveles encajados de terrazas y seis de glacis que recubren parcialmente los depósitos anteriores (Soriano, 1990).

Sobre los sedimentos cuaternarios se han desarrollado un gran número de dolinas aluviales (van Zuidam, 1976; Gutierrez *et al.*, 1985; Soriano, 1986, 1991 y Benito & Gutierrez, 1987). Estas aparecen de manera especial sobre los niveles más recientes de terrazas del río Ebro (T₁, T₂ y T₃) al NW de Zaragoza, observándose la mayor densidad en el nivel T₂ (figura 1). Su morfología es variada, encontrándose los principales tipos descritos en la literatura tradicional sobre este tema (cubeta, embudo, ventana y fondo plano con paredes escarpadas) (Cvijic, 1893 y Palmquist, 1979). Del mismo modo, su forma en planta y sus dimensiones presentan una gran variabilidad; la longitud máxima observada está comprendida entre 10 y 1.100 m, la anchura entre 10 y 600, y la profundidad entre 2 y 9 m.



Fig. 1. Mapa de situación y cartografía de dolinas en el área estudiada

Las dolinas se forman como consecuencia, en primer lugar, de la movilización y evacuación por el agua subterránea de material infrayacente, con formación, por lo general, de cavidades en el subsuelo. Dicha movilización consiste, fundamentalmente, en la disolución de los yesos miocenos, pero también, en parte, en el arrastre mecánico subsuperficial (sufosión) de los propios materiales detríticos cuaternarios. A ella sigue una respuesta del terreno suprayacente que puede manifestarse bien por un colapso brusco (produciéndose entonces dolinas de bordes escarpados) o bien por subsidencia lenta (dando zonas de hundimiento de bordes difusos).

El impacto económico que producen estos hundimientos es considerable, tanto por su incidencia geotécnica sobre las obras civiles (construcciones, vías de comunicación, redes de abastecimiento...) como por las pérdidas que ocasionan en terrenos cultivables. Ello justifica el interés que, en los últimos años, ha despertado el estudio de este fenómeno, tanto desde el punto de vista geomorfológico como geotécnico. En este último campo, sin embargo, los trabajos han ido siempre encaminados a la resolución de problemas puntuales, no habiendo existido ningún intento de análisis regional del fenómeno y de sus causas.

En este trabajo pretendemos realizar una primera contribución a dicho análisis regional, haciendo una evaluación general de los hundimientos en el área al NW de Zaragoza, de sus condicionantes genéticos y de las variables o combinaciones de variables que pueden explicarlos de forma satisfactoria. Todo el proceso queda plasmado en cartografías temáticas a escala 1: 50.000, y su objetivo final es elaborar un modelo teórico de riesgo que, a su vez, pueda servir de base para la realización de mapas de riesgo en el área.

La metodología que se ha empleado es variada, y se relaciona con disciplinas muy diversas dentro de la Geología y ciencias afines. El proceso de estudio ha comportado tres aspectos fundamentales:

(1) Identificación, cartografía detallada y análisis de la evolución temporal de todos aquellos fenómenos de hundimiento registrados en el área a partir de su reflejo morfológico (dolinas aluviales) o su repercusión sobre las construcciones humanas.

(2) Recopilación de la información disponible acerca de cada una de las variables que se considera intervienen en el proceso y constituyen, por tanto, potenciales factores de riesgo, y plasmación de la misma en los correspondientes mapas temáticos.

(3) Análisis empírico de las relaciones espaciales entre los fenómenos de hundimiento y las variables contempladas, mediante un programa informático de tratamiento de datos y cartografía automática (programa *Cartographie* para Apple Macintosh).

2. Cartografía y cuantificación de la densidad de dolinas

La cartografía de dolinas se ha realizado a partir de levantamientos geomorfológicos sobre fotogramas aéreos de cuatro épocas distintas: 1946, 1957, 1970 y 1986, cuyas escalas son, respectivamente, 1:43.500, 1:32.000, 1:20.000 y 1:18.000. Una vez realizados aquéllos, han sido trasladados a una escala común 1:50.000 a fin de poder integrar y comparar sus resultados.

Posteriormente se ha realizado un cálculo de densidad de dolinas por kilómetro cuadrado, plasmándolo en el mapa digitalizado de la figura 2. Hay que decir que dicha densidad se ha cuantificado ponderando el tamaño de las dolinas. Para ello se ha definido un rango de tamaños (aproximadamente entre 15 y 100 m. de diámetro) dentro del cual la dolina se considera de "valor unidad", aplicando luego factores multiplicadores a otras de mayor tamaño en función de su relación de superficie respecto a dicha "dolina unidad".

3. Análisis regional de los factores de riesgo

Los factores que parecen condicionar los procesos de hundimiento y el consiguiente desarrollo de dolinas aluviales son muy variados (Beck, 1986; Benito, 1987; Daoxian, 1988; Lamoreaux & Newton, 1986; Newton & Tanner, 1987; Soriano, 1991; Toulemont, 1987; Upchurch & Littlefield, 1988; White *et al.* 1986). Desde el punto de vista de su origen pueden dividirse en tres grupos: factores físicos (solubilidad del sustrato terciario, espesor, litología y características estructurales y geotécnicas de la cubierta cuaternaria), hidrológicos (infiltración de agua al subsuelo, gradiente hidráulico, profundidad del nivel freático, variaciones estacionales del mismo, quimismo del agua subterránea) y antrópicos (extracciones importantes de agua, regadío intensivo, construcciones). Desde el punto de vista de sus

efectos, hay algunos factores que inciden sobre las posibilidades de evacuación de material en el subsuelo (solubilidad, presencia de detríticos finos sueltos susceptibles de arrastre, infiltración, caudal y quimismo del agua) mientras otros lo hacen sobre la facilidad de colapso o subsidencia de la cobertera (litología, comportamiento geomecánico de la cubierta, profundidad y variaciones del nivel freático).

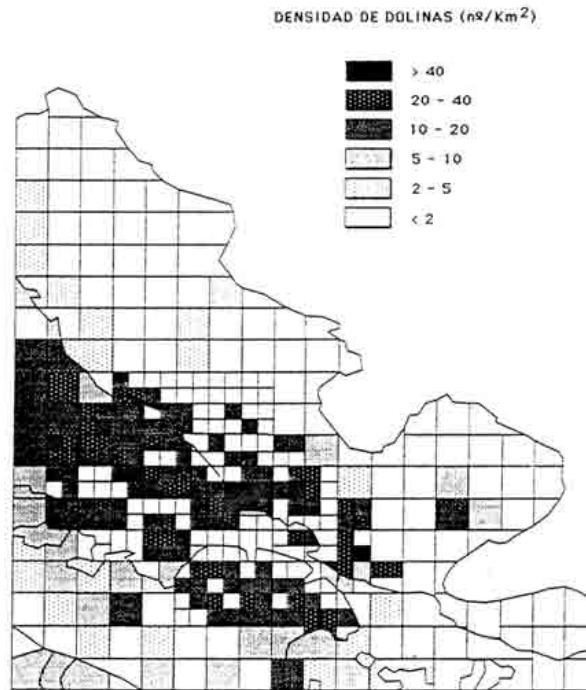


Fig. 2. Mapa de densidad de dolinas realizado mediante el programa Cartographie para Apple Macintosh

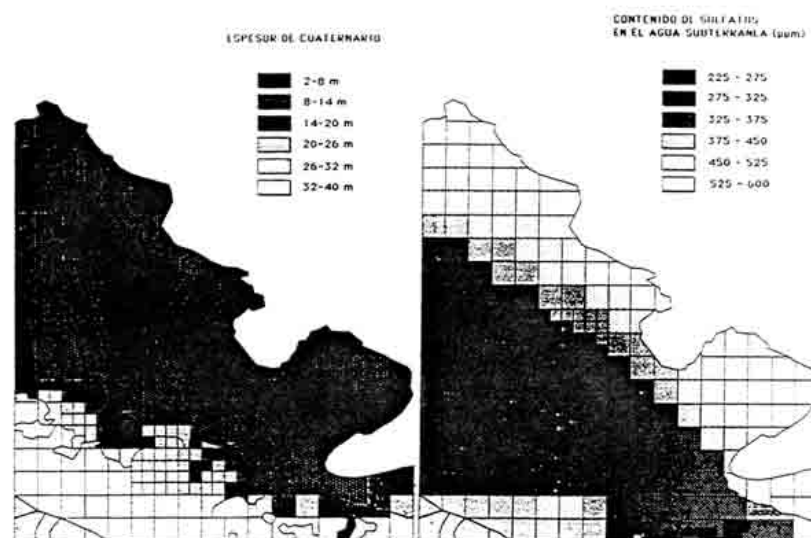
Acerca de todas estas variables potencialmente condicionantes del desarrollo de dolinas se ha realizado una recopilación exhaustiva de información procedente de sondeos mecánicos, perfiles geoeléctricos y pozos para la captación de agua subterránea, así como de información geológica de carácter general. Para recabarla ha sido necesario consultar un enorme número de informes científicos y técnicos realizados por empresas privadas y organismos de las administraciones públicas. Dicha información fue plasmada en un principio en una serie de mapas temáticos realizados manualmente, cuya relación es la siguiente:

- (a) Espesor de los depósitos cuaternarios.
- (b) Cota de la superficie del contacto entre el Cuaternario y substrato terciario.
- (c) Características litológicas del Cuaternario (especialmente de su porcentaje en lutitas).
- (d) Características litológicas y solubilidad de los materiales yesíferos miocenos
- (e) Direcciones de fracturación principales en el Mioceno y Cuaternario.
- (f) Isopiezas (elaborados para los niveles máximo y mínimo anual de una serie de años entre 1.978 y 1.988) y direcciones de flujo teórico del agua subterránea.
- (g) Profundidad del nivel freático.
- (h) Espesor saturado del aluvial cuaternario.
- (i) Variación máxima anual del nivel freático.
- (j) Parámetros geotécnicos de los materiales cuaternarios.
- (k) Contenido en sulfatos del agua subterránea.
- (l) Residuo sólido total en el agua subterránea.
- (m) Isoconductividad eléctrica.

Posteriormente, para aquellas variables en las que se ha encontrado una relación más estrecha entre su distribución espacial y la de las dolinas, se ha procedido a la realización del correspondiente mapa



Fig. 3. Mapas digitalizados de las cinco variables seleccionadas que integran el modelo teórico de riesgo a escala 1:50000



Continuación de la Fig. 3

digitalizado utilizando el programa *Cartographie*. Finalmente, un procedimiento de aproximaciones sucesivas mediante el ensayo de distintas combinaciones de variables y su comparación con el mapa de densidad de dolinas (todo ello, empleando nuevamente el programa *Cartographie*) ha permitido seleccionar cinco de dichas variables como más significativas (las señaladas como (a), (b), (c), (i) y (k)). En el apartado siguiente mostraremos cómo la combinación de las mismas se plasma en un modelo teórico de riesgo capaz de explicar de forma bastante satisfactoria el reparto espacial de los fenómenos de hundimiento. Antes de ello, sin embargo, es necesario presentar y comentar los mapas digitalizados correspondientes a cada una de ellas (figura 3).

Espesor de los depósitos cuaternarios. El espesor del Cuaternario varía en la zona aproximadamente entre 2 y 40 m. Los valores mayores se encuentran en la terraza T₃ y los mínimos, en general, en la T₁. No obstante, a lo largo de la terraza T₂ también se localiza una zona de mínimo que discurre longitudinalmente por su parte central, con valores que se sitúan en torno a los 10-12 m. Por el contrario, en la zona de la terraza T₁ existe una banda longitudinal contigua al escarpe con T₂ donde existe una especie de surco en el que los espesores aumentan hasta valores del orden de 15 m.

A diferencia de las otras variables seleccionadas, ésta no actúa seguramente sobre la tasa de disolución y arrastre, sino sobre la respuesta mecánica de la cobertera aluvial y las posibilidades de que la evacuación de material en profundidad se manifieste más o menos intensamente en superficie. Su influencia queda puesta de manifiesto por la notoria coincidencia de muchas de las dolinas con las áreas de espesor de terraza comparativamente bajo. La mayoría de las depresiones que aparecen sobre T₂ se sitúan en la franja de espesor reducido de Cuaternario (entre 10 y 15 m). Dentro de T₁, las zonas de mayor densidad son las que presentan un espesor menor de 10 m. En T₃, donde el espesor del aluvial es mayor, la densidad de dolinas disminuye, y las que existen también vienen a coincidir con las zonas de menor potencia relativa (en general, inferior a 30 m).

Contenido en sulfatos del agua subterránea. Los valores de sulfatos disueltos en el agua subterránea oscilan entre unos 225 y 600 ppm. Se observa una franja con valores mínimos que discurre paralela al río Ebro y se localiza más o menos sobre la extensión de la terraza T₂. En toda ella los valores se sitúan por debajo de los 300 ppm, a partir de los cuales se observa un crecimiento moderado hacia el suroeste y otro mucho más acusado hacia el noreste, hasta alcanzar los 600 ppm. en el área contigua al río Ebro. Este crecimiento general hacia el Ebro es algo lógico si tenemos en cuenta que ése es el sentido de flujo del agua; ésta va disolviendo los yesos miocenos y cargándose progresivamente en sulfatos conforme descende hacia el nivel de base. El aumento muy brusco del contenido en sulfatos que se produce aproximadamente a la altura del escarpe entre T₂ y T₁ sugiere que es precisamente bajo los depósitos de la primera de estas terrazas donde más activa es la disolución de yesos. No resulta igual de lógico el

aumento que se aprecia en la parte sur del mapa. Este podría deberse, por un lado, a una dilución producto del aumento de la infiltración procedente del riego que se produce al Norte del Canal Imperial de Aragón, pero también a las características de los datos de los cuatro pozos existentes en esa área, que pueden haber proporcionado valores anómalamente altos por haberse realizado los análisis sobre muestras tomadas a gran profundidad.

En general se observa en toda el área una correlación inversa bastante estrecha entre densidad de dolinas y concentración de sulfatos. La mayor parte de las dolinas se agrupan en la franja central donde la concentración de sulfatos está por debajo de 300 ppm, lo cual resulta perfectamente coherente con la interpretación hecha antes acerca de la mayor velocidad de disolución en el ámbito de la terraza T₂, merced al mayor poder de disolución del agua al alejarse ésta de su punto de saturación.

Topografía de la superficie de contacto Mioceno-Cuaternario. Los datos altimétricos de la superficie de contacto entre Mioceno y Cuaternario han sido tratados digitalmente mediante un proceso de simplificación en el cual se asigna a cada punto un índice convencional en función de su carácter de alto o bajo relativo. Así, a partir de un mapa inicial de isohipsas se ha asignando a cada elemento de la cuadrícula unos índices de 1 a 5 que luego se traducen en un color negro para las zonas más bajas y en tramas progresivamente más claras para las zonas altas. Las primeras son transversas a los límites de terrazas, y se concentran especialmente en la zona del escarpe T₃-T₂. En ellas aumenta claramente la densidad de hundimientos, probablemente por haber funcionado como vías preferentes del flujo subterráneo de agua y, por tanto, como zonas de más rápida disolución.

Porcentaje de lutitas en los depósitos cuaternarios. La proporción de lutitas en la columna de materiales cuaternarios conocida por sondeos mecánicos o geoelectrónicos es muy variable en el área. Alcanza un mínimo (por debajo del 20%) en una buena parte de las terrazas T₂ y T₃, mientras aumenta hasta un 70-80% en las zonas más bajas de la T₁. El tránsito entre una zona y otra no es gradual, sino que se halla complicado por algunos máximos y mínimos de menor entidad dispuestos transversalmente a los límites entre terrazas. La densidad de dolinas es más alta precisamente en las terrazas que tienen una proporción de lutitas menor (T₂ y T₃, inferior siempre al 40 %). Ello sugiere que la disminución, a veces brusca, de densidad que se produce al entrar en T₁ se debe en buena medida a este factor litológico. Por otra parte, ciertas zonas de porcentajes anómalamente altos de lutitas dentro de la terraza T₂ también vienen a coincidir con zonas donde disminuye la densidad de hundimientos. Su incidencia se justifica en virtud de su relación con la transmisividad tanto vertical como horizontal del acuífero.

Variación máxima anual del nivel freático. El nivel freático en el área varía estacionalmente entre un mínimo hacia final del invierno y un máximo en septiembre-octubre. La aparente contradicción entre estas variaciones y las de la pluviometría se debe a que es precisamente en el verano cuando la actividad de regadío es más intensa y la infiltración al freático mayor. El rango de variación oscila entre algo menos de 1 m. en la parte más próxima al río Ebro y unos 4 m. en la parte más alejada (área de la terraza T₃), pasándose de uno a otro sector de forma gradual.

Según muchos de los autores que han estudiado los mecanismos de desarrollo de las dolinas aluviales, esta variación estacional favorece los procesos de hundimiento. Una variación grande implica un aumento de gradiente, lo que incentiva la capacidad de disolución y arrastre de los materiales. Su introducción como variable en el modelo permite ajustar los valores de riesgo teórico en la parte suroccidental del área estudiada, que de otro modo resultarían anormalmente bajos en relación a la densidad de dolinas constatadas.

4. Modelo matemático y mapa de riesgo teórico a escala 1:50000

Una vez establecidas cuáles son las variables que tienen aparentemente una mayor incidencia en los fenómenos de hundimiento (a partir de su comparación por separado con los mapas de dolinas), hemos procedido a la realización de un análisis global de las mismas buscando qué combinación de variables, y con qué peso relativo de cada una, puede expresar mejor el riesgo teórico de hundimiento. Este análisis se ha realizado utilizando el mismo programa *Cartographie*. Tras una serie de ensayos de tanteo se ha ido observando cómo existe una combinación básica de las cinco variables descritas en el apartado anterior que permite explicar de una forma aceptable a escala 1: 50.000 el reparto espacial de los fenómenos de hundimiento.

Estas cinco variables han sido combinadas en una ecuación empírica que constituye la expresión matemática de nuestro modelo de riesgo. En ella se incluyen unos coeficientes correctores que permiten la

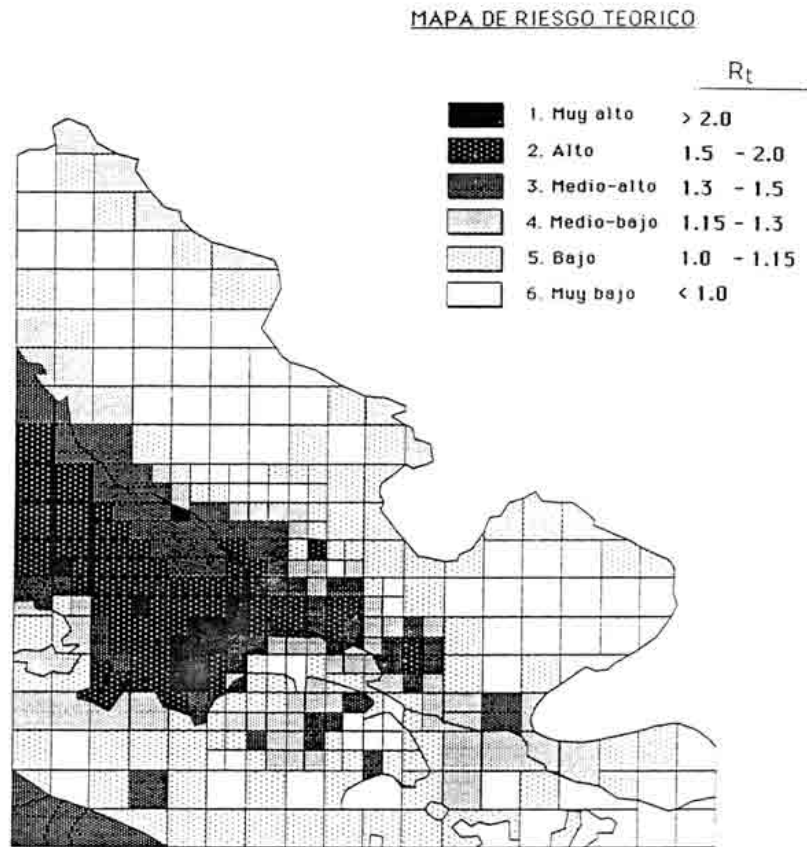


Fig. 4. Mapa de riesgo teórico realizado a partir de la combinación de las cinco variables seleccionadas

intervención de cada variable con un peso ponderado de acuerdo con la influencia que parecen tener a la vista de los resultados del análisis anterior. Dicha ecuación es la siguiente:

$$R_t = 850 / (0.5 S + 70 I_c + 5 L + 20 E - 125 V_{nf})$$

donde:

- R_t = Índice de riesgo teórico.
- S = Contenido en sulfatos del agua (en ppm).
- I_c = Índice de cota del contacto Mioceno-Cuaternario (valor arbitrario entre 1 y 5).
- L = Proporción de lutitas en el Cuaternario (% en espesor de la columna total).
- E = Espesor del Cuaternario (en m.)
- V_{nf} = Variación máxima anual del nivel freático (en m.).

Mediante el programa *Cartographie* se ha elaborado, a escala aproximada 1: 50.000, el mapa de los valores que arroja dicha ecuación en cada uno de los elementos de superficie definidos en el área al NW de Zaragoza (figura 4). Si lo comparamos con el mapa de densidad de dolinas tratado cuantitativamente por el mismo procedimiento se observa una similitud bastante elevada entre ambos. Únicamente la zona más oriental de T₃ presenta discrepancias serias ya que la densidad constatada de hundimientos a partir del análisis fotogeológico supera ampliamente los valores de riesgo potencial que se deducen teóricamente de

la combinación de variables. Es posible que esto se deba a que, tal como señalan Upchurch & Littlefield (1987) y Bahtijaveric (1989), en zonas de karst cubierto con potencias de cobertera mayor de 30 m. no se encuentra apenas relación entre las dolinas nuevas que se van formando y las antiguas. Ello haría que se multiplicase el número total de dolinas contabilizadas en años sucesivos y resultase una densidad aparentemente mayor que las de otras zonas donde las dolinas son más persistentes.

5. Discusión y conclusiones

Teniendo en cuenta el esquema genético de desarrollo de las dolinas aluviales, y analizando espacialmente las variables que se supone pueden facilitar o entorpecer los procesos involucrados en él, es posible realizar una evaluación regional del riesgo de hundimientos. De las múltiples variables teóricamente implicadas, cinco han sido las que, en el área de las terrazas inferiores del Ebro al NW de Zaragoza, han mostrado una mayor eficacia para justificar la presencia de dichos hundimientos en ciertas zonas preferentes: el bajo contenido en sulfatos del agua, las zonas de vaguada en la superficie de contacto entre Mioceno y Cuaternario, el bajo porcentaje de lutitas en este último, las elevadas variaciones anuales del nivel freático y el reducido espesor de la cubierta aluvial. Los cuatro primeros factores propiciarían el aumento de la disolución y arrastre y la consiguiente creación de cavidades, mientras el último favorecería la posibilidad de colapso o subsidencia del suelo.

La ecuación empírica propuesta, en la que dichas cinco variables son combinadas incluyendo unos coeficientes de ponderación, representa una aproximación útil para explicar el reparto espacial de los fenómenos de hundimiento observados y, junto con el correspondiente mapa a escala 1:50.000, constituye nuestro modelo teórico de riesgo.

No queremos con ello expresar que éstas sean realmente las únicas variables que condicionan los procesos de hundimiento. Existen con seguridad otras que también tienen incidencia sobre la movilización de materiales en el subsuelo o sobre el comportamiento geomecánico de la cobertera. Sin embargo, los resultados de nuestro análisis sugieren que tales variables deben de actuar a una escala o bien más amplia (de carácter más regional) o bien de mayor detalle, de forma que no ha sido posible detectar su influencia a la escala de trabajo 1: 50.000. Entre las primeras se encontraría, por ejemplo, la solubilidad del substrato mioceno. Por una parte, dicha solubilidad es en general alta en toda el área estudiada y, por otra, sus variaciones de unas zonas a otras dentro de la misma son difíciles de controlar debido a la escasez de datos disponibles. Por consiguiente, esta variable, que sí explica bien la aparición de los fenómenos de hundimiento de una forma generalizada en toda el área de Zaragoza-Casetas, no puede en cambio aducirse para justificar sus variaciones relativas de densidad dentro de ella. En el otro extremo, existen factores que seguramente operan a una escala mucho más pequeña de la que ha sido posible analizar por nosotros. Por ejemplo, la fracturación del Mioceno es sin duda un factor que coadyuva a los procesos de disolución, pero la identificación de sistemas de fracturas concretos susceptibles de favorecer tal proceso en un punto determinado es difícil debido al recubrimiento continuo de depósitos aluviales. Otro tanto podría decirse de las características geomecánicas de la cobertera cuaternaria, de las que tenemos también una información fragmentaria que no alcanza a permitir el análisis de detalle que se necesitaría para constatar su verdadera influencia sobre las posibilidades de hundimiento.

En resumen, el modelo aquí propuesto da una explicación teórica bastante satisfactoria a la distribución espacial de dolinas aluviales al NW de Zaragoza a una escala 1:50.000, y puede servir de base para la realización de mapas de riesgo de hundimientos a esa misma escala u otras similares. No obstante, representa sólo una aproximación parcial, por cuanto no contempla algunas variables que con toda seguridad operan a un nivel de mayor detalle. En la medida en que éstas últimas sean puestas de relieve y conocida su distribución espacial, el modelo, manteniendo el mismo esquema conceptual y la metodología de trabajo, podrá irse perfeccionando hasta permitir la realización de cartografías de riesgo a escalas mayores.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Diputación General de Aragón (Proyecto CB-1/89).

Referencias bibliográficas

- Bahtijaveric, A.** (1989) Sinkhole density of the Forest City Quadrangle. *3rd Multidisciplinary Conference on Sinkholes*. pp. 75-82. St. Petersburg Beach, Florida.
- Beck, B.** (1986) A generalized genetic framework for the development of sinkholes and karst in Florida, U.S.A. *Environ. Geol. Water Sci.* vol 8, pp. 5-18.
- Benito, G** (1987) Karstificación y colapsos kársticos en los yesos del sector central de la Depresión del Ebro. *Cuaternario y Geomorfología*, vol. 1, pp. 61-76.
- Benito, G & Gutierrez, M.** (1987) Karst in gypsum and its environmental impact on the middle Ebro Basin (Spain). In: *2nd Multidisciplinary Conference on sinkholes and the environmental impacts of karst* pp. 137-141. Orlando.
- Cvijic, J.** (1893) The dolines. Translate of *Geog. Abhandlungen* 5 pp. 225-276. In SWEETING, M.M. (ed.) 1981 *Karst Geomorphology*. Hutchinson.
- Daoxian, Y.** (1988) Environmental and engineering problems of karst geology in China. *Environ. Geol. Water Sci.*, vol. 12, pp. 79-87.
- Gutierrez, M.; Ibañez, M.J.; Peña, J.L.; Rodriguez, J. & Soriano, M.A.** (1985) Quelques exemples de karst sur gypse dans la Depression de l'Ebre. *Karstologia* 6, pp. 29-36.
- Lamoreaux, P. E. & Newton, J. G.** (1986) Catastrophic subsidence: An environmental hazard, Shelby County, Alabama. *Environ. Geol. Water Sci.*, vol. 8, pp. 25-40.
- Newton, J.G. & Tanner, J.M.** (1987) Case histories of induced sinkholes in the eastern United States. *2nd Multidisciplinary Conference on sinkholes and the environmental impacts of karst*, pp. 15-23. Orlando.
- Palmquist, R.** (1979) Geologic controls on doline characteristics in mantled karst. *Z. Geomorph. N.F. Suppl. Bd. 32*, pp. 90-106.
- Quirantes, J.** (1978) *Estudio sedimentológico y estratigráfico del terciario continental de los Monegros*. Institución Fernando el Católico. 200 p.
- Riba, O.; Reguant, S. & Villena, J.** (1984) Ensayo de síntesis estratigráfica y evolutiva de la cuenca terciaria del Ebro. *Tomo homenaje a Ríos. v. II*. pp. 131-160. I.G.M.E.
- Soriano, M.A.** (1986) Dolinas de disolución normal y dolinas aluviales en el sector centro-meridional de la Depresión del Ebro. *Bol. Geol. Min.* t. XCVII pp. 328-337.
- Soriano, M.A.** (1990) *Geomorfología del sector centro-meridional de la Depresión del Ebro*. 269 p. Diputación Provincial de Zaragoza.
- Soriano, M.A.** (1991) Characteristics of the alluvial dolines developed because of gypsum dissolution in the central Ebro Basin (en prensa) *Z. fur Geomorphology*
- Toulemont, M.** (1987) Les risques d'instabilité liés au karst gypseux lutétien de la région parisienne. Prevision en cartographie. *Bull. liaison Labo. P et Ch.* 150-151, pp. 109-116
- Upchurch, S.B. & Littlefield, J.R.** (1988) Evaluation of data for sinkhole development risk models. *Environ. Geol. Water Sci.* vol.12, pp. 135-140.
- White, E.L.; Gert, A. & White, W.B.** (1986) The influence of urbanization on sinkhole development in central Pennsylvania. *Environ. Geol. Water Sci.* vol. 8, pp. 91-97.
- Van Zuidam, R.A.** (1976) *Geomorphological development of the Zaragoza region, Spain. Processes and landforms related to climatic changes in a large Mediterranean river basin*. I.T.C. 211p. Enschede.