

EL RIESGO DE COLAPSO KARSTICO Y SU INCIDENCIA EN LA COMUNIDAD VALENCIANA

Policarpo Garay Martín

(Agència del Medi Ambient, Generalitat Valenciana)

1. INTRODUCCION

Los procesos de subsidencia son fenómenos naturales extendidos por todo el mundo y que originan descensos verticales de la superficie del terreno. Generalmente afectan a áreas o regiones amplias, como consecuencia de mecanismos de compactación de materiales por desecación o presión litostática o debido a causas tectónicas, isostáticas o epirogénicas. Si bien se trata de un fenómeno natural, como ya se ha dicho, también puede ser desencadenado o acelerado por la intervención humana. Las causas más comunes en este caso son: la extracción de aguas subterráneas (disminución de la presión hidrostática), la extracción de combustibles fósiles, la aplicación de agua (hidrocompactación y arrastres), la sobrecarga del terreno por edificaciones, la desecación de cuencas lacustres y turberas, etc.

Podría decirse que un caso particular de subsidencia, caracterizado por su manifestación puntual y su rápida velocidad de formación, es el que da lugar a las simas o pozos naturales de hundimiento, sin embargo, las causas responsables de estos últimos difiere netamente de las de aquellos.

El término *colapso kárstico* se aplica a los hundimientos bruscos del terreno producidos por el derrumbamiento de una bóveda o cavidad subterránea subyacente. En términos karstológicos y espeleológicos, estos fenómenos son conocidos como *simas de hundimiento*, independientemente de que su formación sea reciente o antigua y que permita o no el acceso directo hacia redes o conductos kársticos. Lo correcto es aplicar el término *colapso kárstico* al proceso de derrumbamiento en sí, reservando el de *sima de hundimiento* para referirse al fenómeno resultante de tal proceso.

2. ASPECTOS GENETICOS

Las simas de hundimiento son formas kársticas frecuentes en todas las latitudes y regiones climáticas del planeta. Algunas de ellas dan lugar a cavidades colosales, entre las que se encuentran las bocas y pozos (verticales absolutas) más grandes del mundo.

Desde hace años se conoce la magnitud de enormes pozos naturales en Yugoslavia, con diámetros de hasta 200 metros y profundidades aún mayores. Recientemente, en el karst de Nueva Bretaña (Papua-Nueva Guinea) hemos tenido ocasión de reconocer *in situ* varias de estas simas de hundimiento, con

diámetros de 100 a 400 metros y profundidades similares. El fondo de estas cavidades, cuyo volumen se mide en hectómetros cúbicos, está ocupado por grandes conos de derrubios, centrales o laterales, que evidencian su procedencia autóctona por hundimiento remontante de su bóveda hasta alcanzar el exterior.

Sin duda alguna, el ejemplo de sima de hundimiento con más frecuencia recurrido en la bibliografía karstológica corresponde al Aven de Padirac (Lot, Francia), que es una de las cavidades turísticas más importantes del mundo. Tanto esta sima como las referidas en Papua-Nueva Guinea, se encuentran recorridas en su base por ríos subterráneos con notable caudal que discurren por amplias galerías. A lo largo de éstas resulta frecuente la aparición de grandes salas cuyas bóvedas progresan en altura a base de sucesivos hundimientos de la roca caliza (procesos clásticos). Generalmente, estos fenómenos se dan en macizos kársticos de estructura tabular, es decir, con estratificación subhorizontal, lo que posibilita la formación de grandes bloques paralelepípedicos que van quedando individualizados por la disolución preferencial que actúa sobre las juntas (diaclasas y planos de estratificación) de la roca calcárea, y que finalmente ceden simplemente por gravedad o ayudados por vibraciones o convulsiones telúricas.

Los conos de derrubio así formados pueden llegar a taponar completamente el acceso hacia las galerías subyacentes (fig. 1).

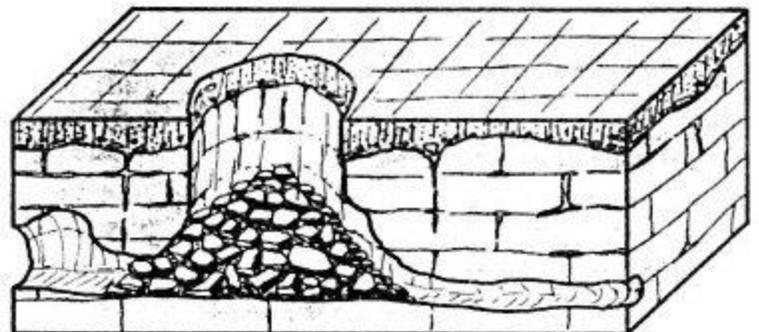


Fig. 1.- Esquema general de una sima de hundimiento.

Con frecuencia, el río subterráneo que generalmente discurre al pie de estas cúpulas de hundimiento, se encarga de ir haciendo desaparecer parte de los detritos y bloques acumulados en su base, mediante su disolución y/o arrastre (fig. 2).

La formación de simas de hundimiento no siempre responde al esquema genético que se acaba de describir, por progresivo avance de los procesos clásticos en las bóvedas de las salas subterráneas, sino que son posibles otros mecanismos y procesos como veremos a continuación. Uno de ellos es el colapso por crecimiento rápido de cavidades en rocas hipersolubles, como sucede con la sal; en este caso, la pérdida de masa responde principalmente a la disolución de la roca, sin que los procesos clásticos lleguen a ser relevantes y sin necesidad de que exista una gran galería o río caudaloso bajo la zona de hundimiento. Este tipo de colapsos es igualmente frecuente en regiones yesíferas.

Otro mecanismo generador de colapsos kársticos es el propuesto por Maucci (1952), para quien la zona vadosa o de aireación del karst está plagada de numerosas células o huecos de disolución preferente a los que denomina *husos* o *vanos* de disolución. En general se trata de cavidades con un desarrollo predominante vertical y cuya morfología se aproxima a elipsoides de revolución con sección transversal horizontal circular, ovalada o lenticular. Estos huecos crecen a favor de las discontinuidades de la roca caliza por el efecto disolvente de las aguas de infiltración que escurren por sus paredes. De esta manera, el crecimiento del huso de Maucci se produce tanto en anchura como en altura y profundidad, por lo cual dicho autor las llama *cavidades inversas*, en contraposición a las *cavidades directas* que son las que corresponderían a los cursos de agua subterránea generalmente procedentes de pérdidas superficiales o sumideros.

Para este proceso de crecimiento *inverso* de Maucci, Erasó (1966) propone, con mayor acierto, el término *corrosión remontante*. En realidad, este crecimiento remontante se produce tanto por la propia disolución o corrosión kárstica como por los procesos quimioclásticos acompañantes.

La morfología de las simas maucianas está caracterizada por presentar paredes verticales o extraplomadas y por presentar un suelo de relleno clástico con matriz limo-arcillosa o arenosa, en función de la composición de la roca madre, dando lugar a la colmatación de la parte más profunda del huso (fig. 3).

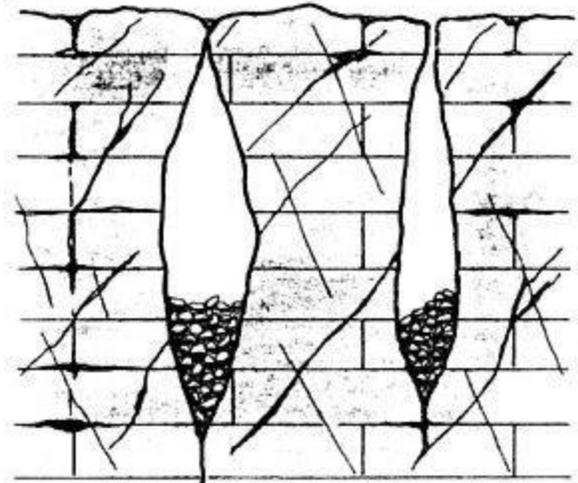


Fig. 3.- Sección transversal teórica de un huso de Maucci.

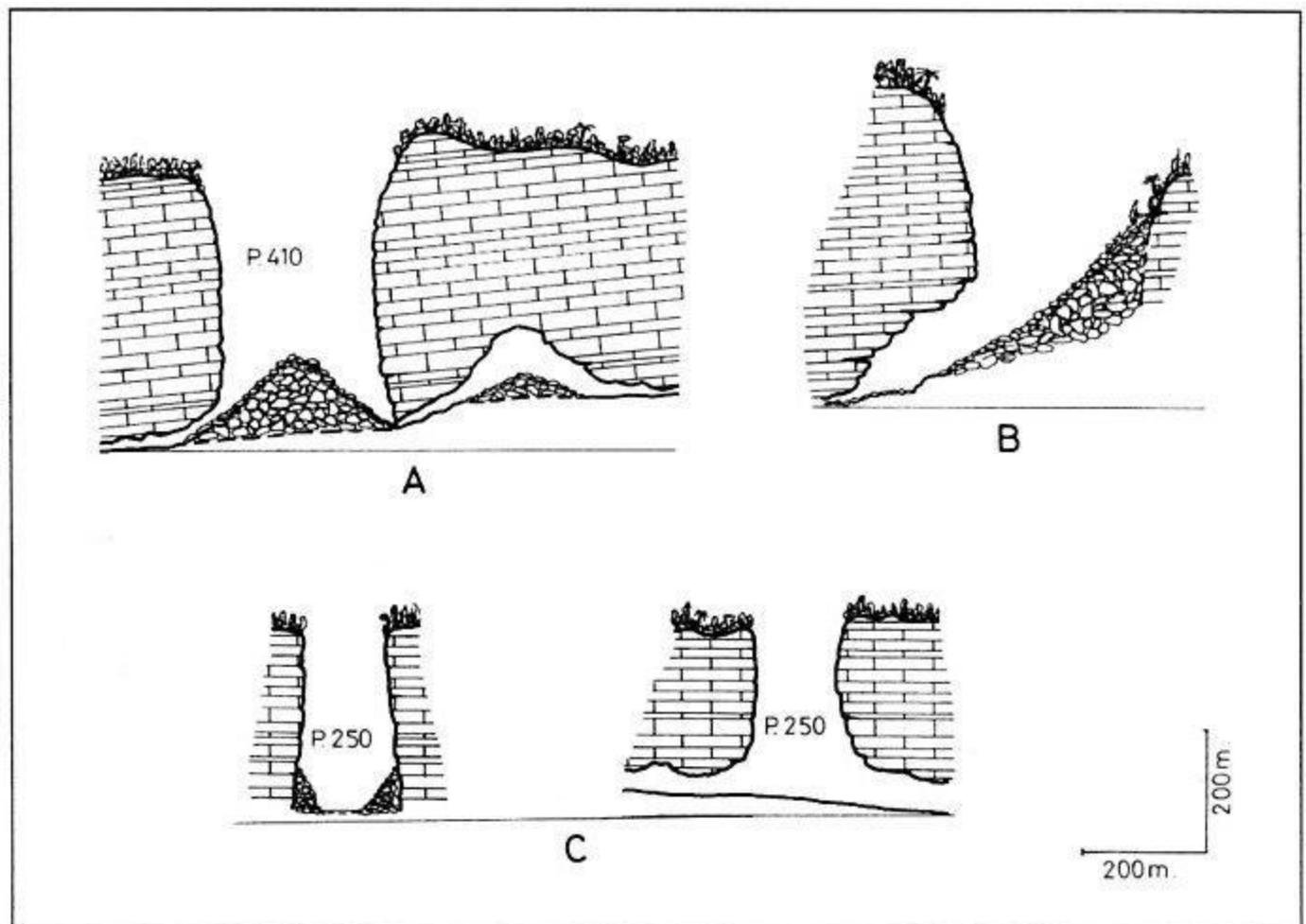


Fig. 2.- Tres ejemplos de grandes simas de hundimiento en el Karst de Nueva Bretaña. a) Minyé, con cono central, b) Kavakuna, con cono lateral, y c) Naré, con cono central desmantelado.

Con frecuencia, varios de estos husos, cuando se encuentran próximos llegan a conectarse entre sí como consecuencia de su progresivo crecimiento, dando lugar de esta manera a cavidades de morfología más compleja en las que aumentan las probabilidades de profundización espeleológica. La conexión lateral de varios husos desarrollados hacia la misma cota puede dar lugar a pseudogalerías.

El acceso a estas simas casi siempre tiene lugar a través de su ápice cenital, al alcanzar éste la superficie del terreno; la conexión, frecuentemente, tiene lugar mediante colapso. Resulta altamente ilustrativa la aportación de Maucci (op. cit.) dando cuenta de al menos 29 colapsos kársticos acaecidos en la región italiana de Venezia Giulia durante el período comprendido entre 1888 y 1935.

Con muchísima frecuencia, los colapsos kársticos tienen lugar en áreas donde la roca karstificable no aflora directamente al exterior, sino que se encuentra cubierta por una capa margosa o detrítica que puede alcanzar espesores de hasta varias decenas de metros. El colapso se produce de forma repentina y violenta en el momento en que se sobrepasa un factor crítico de equilibrio (Jianyi *et al.*, 1987) que ha sido estudiado y definido numéricamente en base a las características geométricas de cada caso particular (espesor de la cobertera, diámetro de la cavidad subyacente, posición del nivel freático...) y de los parámetros geotécnicos del material (cohesión, ángulo de rozamiento interno, etc...).

Derycke (1979) da cuenta de la frecuencia y espectacularidad que alcanzan los procesos de colapso kárstico en la región de Tournai (Bélgica). Las simas de hundimiento (*puits naturels*) por él observadas las define como agujeros cilíndricos en la superficie del terreno provocados por un hundimiento localizado sobrevenido en profundidad, siendo fenómenos que se pueden producir en cualquier región donde la roca carbonática se localiza en el subsuelo. En la citada región, este autor refiere la apertura de cuatro simas de hundimiento al año, por término medio durante el período 1910/1964. Igualmente cita un grupo de quince hundimientos acaecidos tan solo entre el 28 y el 31 de diciembre de 1966 en una llanura aluvial próxima a Kain, al Este del río Escaut; en los 11 años siguientes, en la misma área, son registrados al menos otros treinta colapsos kársticos.

Abundando en todas estas cifras de colapsos kársticos en la región de Tournai, Delattre (1985) cita 93 casos inventariados entre 1955 y 1983.

La formación de simas de hundimiento constituye en sí un proceso natural cuyas causas han sido ya comentadas, sin embargo, este proceso puede verse intensamente acelerado o *catalizado* por causas antrópicas, e incluso estar motivado directamente por ellas. En efecto, determinadas actuaciones humanas de tipo extractivo (minerales, combustibles fósiles, agua...) producen tensiones y deformaciones en los suelos adyacentes, pudiendo originar una subsidencia más o menos generalizada en la superficie del terreno o, por el contrario dar lugar a simas de hundimiento. Estas últimas son muy frecuentes en el Sudeste de los Estados Unidos, en particular en Georgia, Alabama y Florida, con diámetros que varían entre 1 y 90 metros y profundidades de hasta 30 metros (Carbognin, 1985).

3. COLAPSOS KARSTICOS EN LA COMUNIDAD VALENCIANA

En las dos últimas décadas hemos tenido ocasión de presenciar o reconocer al menos una treintena de colapsos kársticos de

variable magnitud. A continuación se presenta una recopilación de algunos de estos fenómenos, agrupados en 18 localizaciones pertenecientes o próximas a la Comunidad Valenciana. Hay que indicar previamente que no se trata de un inventario exhaustivo y que la magnitud y significancia de los distintos fenómenos puede llegar a ser muy dispar, coexistiendo simas de muy modestas dimensiones con otras de cierta espectacularidad. La figura 4 recoge la distribución territorial de las mismas, con la numeración y orden con que son sintetizados en el cuadro adjunto.

La mayoría de estos colapsos ha tenido lugar en materiales evaporíticos del Triásico superior en facies Keuper. En cuanto a los que se citan sobre rocas carbonatadas hay que señalar que al menos en dos casos (Picaio y Pedreguer) en realidad lo que se produjo fue el destaponamiento de cavidades ya existentes pero fosilizadas u obstruidas por rellenos detríticos (coluviales o lutíticos); en otro de los casos (Masías, Montcada) colapsó parte del techo de una pequeña sala próxima a la superficie.

El hundimiento de Coves de Vinromà se produjo en las proximidades de esta población, sobre el cauce del río Coves, cuyo caudal desaparecía a través del mismo. Los materiales observados fueron exclusivamente gravas y grandes cantos redondeados propios del depósito aluvial.

El caso más sorprendente por su litología y la magnitud del colapso es el de Benifaió, que afectaba a las arenas amarillentas del Tortoniense cubiertas por un depósito de glaciares de 2-3 metros de espesor. Estas arenas, a menudo proporcionan caudales hídricos difícilmente explicables por simple porosidad, lo que hacía presumible atribuirles un cierto grado de karstificación; ésta queda evidenciada por la presencia de concavidades tapiadas por concreciones botroidales de aragonito en el interior del hundimiento.

Una de las circunstancias que con mayor frecuencia concurren en la mayoría de los casos referidos es la presencia de aguas superficiales en el lugar del colapso, ya sea por cauces hídricos, por canales de agua para riego (en los que se producen fugas) o simplemente por regadío agrícola. Estas aguas de infiltración serían factores determinantes, en la mayoría de los casos, para la disolución o vaciado de cavidades subyacentes.

La pérdida de masa que da lugar a estas cavidades se produce por disolución -en el caso de los yesos- o por arrastre de los rellenos lutíticos por las aguas subterráneas. En ambos casos juega un papel fundamental los abatimientos y sucesivas recuperaciones de la superficie piezométrica producidos por la explotación de los acuíferos. Este hecho ha sido ya referido en el caso del Forat de Pedreguer (Garay, 1986), donde el nivel piezométrico llegó a situarse a más de 60 metros de profundidad respecto al nivel del mar, recuperándose en varias ocasiones tras períodos de intensas precipitaciones. El vaciado de la cavidad en este caso se produjo por un arrastre remontante asociado al pistoneo del nivel piezométrico. Varios de los colapsos referidos parecen responder a causas similares relacionadas con la proximidad de puntos de bombeo de aguas subterráneas.

En las tres localidades en las que se han registrado hundimientos por disolución de materiales salinos no aflorantes, éstos responden a la salida natural o extracción artificial de caudales hídricos muy concentrados en cloruro sódico.

Por último hay que señalar que los colapsos se han producido con mayor frecuencia coincidiendo con períodos de abundante pluviosidad o, por el contrario, cuando más deprimidos se encontraban los niveles piezométricos. Este último es el caso de Pedreguer, de la Cènia, Coves de Vinromà, Bugarra y otros.

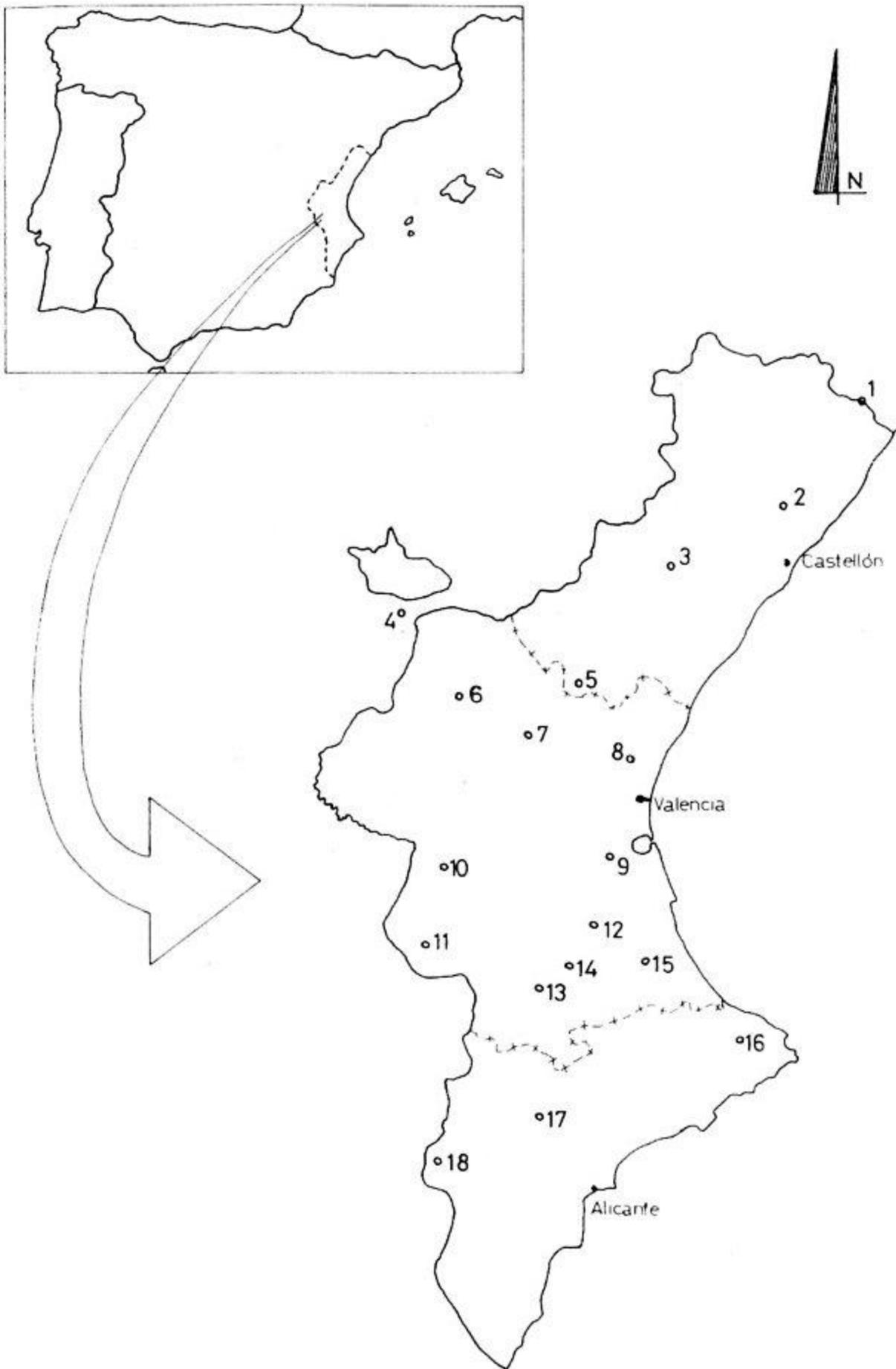


Fig. 4.- Situación de los colapsos kársticos estudiados, ocurridos entre 1970 y 1990

LOCALIDAD	FECHA COLAP.	PROFUND.	DIAMETRO	LITOLOGIA	OTROS
1. La Cenia	1975-78	30 metros	—	caliza J	(4) (6)
2. Coves Vinromà	1977	6 metros	8 metros	grava Q	(4) (6)
3. Lucena del Cid	1976	6 metros	4 metros	margas T	(3) (5)
4. Sta. Cruz Moya	1985-88	—	—	sal-yeso T	(5) (7)
5. Masía Uñoz(Altura)	1983	3 metros	3 metros	arcilla-yeso T	(2) (3)
6. Chelva	1982-83	7 metros	2 metros	yeso T	—
7. Bugarra	1981	6 metros	20 metros	yeso T	(2) (3) (4)
8. Masías (Montcada)	1972	5 metros	3 metros	caliza M	(1) (3)
9. Benifaió	1983	12 metros	16 metros	arenas M	(1) (2) (3) (4)
10. Agrás (Cofrentes)	1976-90	20 metros	20 metros	yesos T	(1) (6) (7)
11. Ayora	1982	—	—	yesos T	(7)
12. Cast. de la Ribera	1987	12 metros	4 metros	yesos T	(2) (3) (4)
13. Saraella (Vallada)	1972-73	7 metros	15 metros	sal-yeso T	(5) (7)
14. Llanera de Ranes	1990	20 metros	9 metros	yeso T	(2) (3) (4) (7)
15. Picaio (Barx)	1982	34 metros	1 metros	caliza C	(7)
16. Pedreguer	1982	71 metros	12 metros	caliza C	(2) (3) (4)
17. Castalla	1990	4 metros	1 metros	yeso T	—
18. Pinoso	—	—	—	sal-yeso T	(3) (7)

T = Triásico

J = Jurásico

C = Cretácico

M = Mioceno

Q = Cuaternario

(1) presencia de canal de riego, (2) cultivo de regadío, (3) bombeo próximo de agua subterránea, (4) cobertura detrítica superior a 1 metro, (5) manantial próximo, (6) cauce fluvial o torrencial, (7) más de 1 colapso

4. CONCLUSIONES Y CRITERIOS DE PREVENCIÓN

Las observaciones y comentarios precedentes permiten deducir que no existe un proceso único de formación de simas de hundimiento, pero que éstas generalmente responden a los cuatro modelos o tipos genéticos siguientes:

- Salas en rocas hipersolubles, donde el proceso dominante es la disolución.
- Cúpulas de hundimiento, donde los procesos clásticos juegan un papel primordial.
- Vaciado de rellenos kársticos, donde predominan la erosión y los arrastres en turbidez.

Los referidos procesos de colapsación pueden responder a causas naturales (disolución, gravedad, etc.) pero, en la práctica se ha constatado como casi todos ellos responden o se aceleran por intervenciones antrópicas. Entre ellas hay que destacar especialmente dos: por una parte las transformaciones agrarias a regadío y la construcción de canales y otras conducciones de agua, susceptibles de sufrir fugas localizadas, es decir, el hecho de crear una fuente continua de flujo hídrico capaz de infiltrarse puntualmente; en segundo lugar, hay que destacar los bombeos de agua subterránea capaces de producir abatimientos piezométricos y trayectorias de flujo intenso con arrastre de partículas sólidas. Otras causas antrópicas podrían llegar igualmente a ser notables, como es el caso de las extracciones de carbón e hidrocarburos, la sobrecarga por edificaciones, la existencia puntual de vibraciones intensas y/o frecuentes (voladuras, ferrocarriles, etc.).

En consecuencia, con las observaciones realizadas y desde el punto de vista de la Geología Ambiental, puede ser tratado el proceso de colapso kárstico como un riesgo natural cuyo grado de incidencia puede llegar a ser notable en áreas kársticas sometidas a determinadas actuaciones antrópicas.

El riesgo de colapso kárstico es susceptible de ser integrado cartográficamente junto a otros riesgos de movimientos de masa como son los deslizamientos. El grado de detalle de la información expresada en dicha cartografía, como es lógico, dependerá de la escala de trabajo utilizada, siendo recomendable, no obstante, prestar atención a las siguientes características territoriales:

- Macizos calizos y dolomíticos, delimitando en éstos las áreas cubiertas por arcillas de decalcificación y otros rellenos detríticos, así como las depresiones y sumideros kársticos, los depósitos travertínicos y las posibles simas de hundimiento.
- Afloramientos y subafloramientos de materiales evaporíticos con indicación de las formas kársticas reconocidas.
- Otros materiales susceptibles de albergar cavidades (coladas de lava).
- Llanuras aluviales y mantos de arroyada con sustrato karstificable.
- Otras áreas con elevado riesgo de subsidencia, como turberas y zonas de minería subterránea.

- Inventario y localización de colapsos kársticos recientes o registrados históricamente.

Por otra parte, puede resultar de gran interés la estimación y cuantificación del riesgo de colapso kárstico sobre áreas más reducidas sobre las que se pretenda la ejecución de proyectos de obra o infraestructuras. Para estos casos, además del reconocimiento *in situ* del terreno y la exploración mediante sondeos mecánicos, puede resultar de gran interés la aplicación de diversas técnicas de prospección geofísica. Concretamente, los métodos gravimétricos (microgravimétricos) se han revelado útiles en la localización de cavidades subterráneas en zonas de relieve suave; las posibilidades de estos métodos se reducen notablemente cuando la cavidad se localiza a una profundidad menor que dos veces su altura y cuanto menor sea el desarrollo lateral de la cavidad. Estas cavidades entrañan un déficit de atracción terrestre, del orden de microgales, que es función del volumen de la anomalía y de la diferencia de densidad entre el relleno de la cavidad (aire, agua, sedimentos...) y la roca encajante. El déficit de atracción medio suele ser mayor que el de la cavidad propiamente dicha, lo cual responde a los fenómenos de descompresión y de disolución alrededor de la anomalía principal.

Pueden ser aplicados igualmente con cierto éxito métodos de prospección geoelectrónica en corriente continua, especialmente calicatas eléctricas, si bien estos tienen un poder de resolución relativamente débil, aunque pueden aportar información cualitativa muy valiosa. Todavía más restringida es la utilidad de métodos sísmicos salvo en determinadas condiciones estructurales.

BIBLIOGRAFÍA

- CARBOGNIN, L. (1985) La subsidencia amenaza el medio ambiente en todo el mundo. *La Naturaleza y sus Recursos*, vol XXI: 2-12.
- DELATRE, N. (1985) Les puits naturels du Tournaisis. Etude de Leur localisation et contribution a l'étude de leur genese. *Ann. Soc. Géol. de Belgique*, 108: 117-123. Liege.
- DERYCKE, F. (1979) Le Karst souterrain du Tournaisis, du Paléozoïque a aujourd'hui. *Ann. Soc. Géol. Belgique*, 102: 27-30. Liege.
- ERASO, A. (1966) Mecanismo de la corrosión en la formación de cavidades fusoidales. *Est. del G. Espel. Alavés*, III: 9-18, Alava.
- GARAY, P. (1986) Informe geológico sobre la sima de hundimiento de Pedreguer (provincia de Alicante). *Jornadas sobre el karst en Euskadi*, t. I: 323-333. San Sebastian.
- JIANYI, T. AND JIAN, CH. (1987) Preliminary study of Karst collapse. Forecast Method. *Proceedings of the 1986 Meeting Int. Geogr. Union. Endins n° 13: 99-104*. Ciutat de Mallorca.
- MAUCCI, W. (1952) L'ipotesi dell' erosione inversa come contributo allo studio della speleogenesi. *Bol. Soc. Adriat. Sc. Nat.*, 46. Trieste.