



ISPRA

Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale

SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA

Organo Cartografico dello Stato (legge N°68 del 2-2-1960)

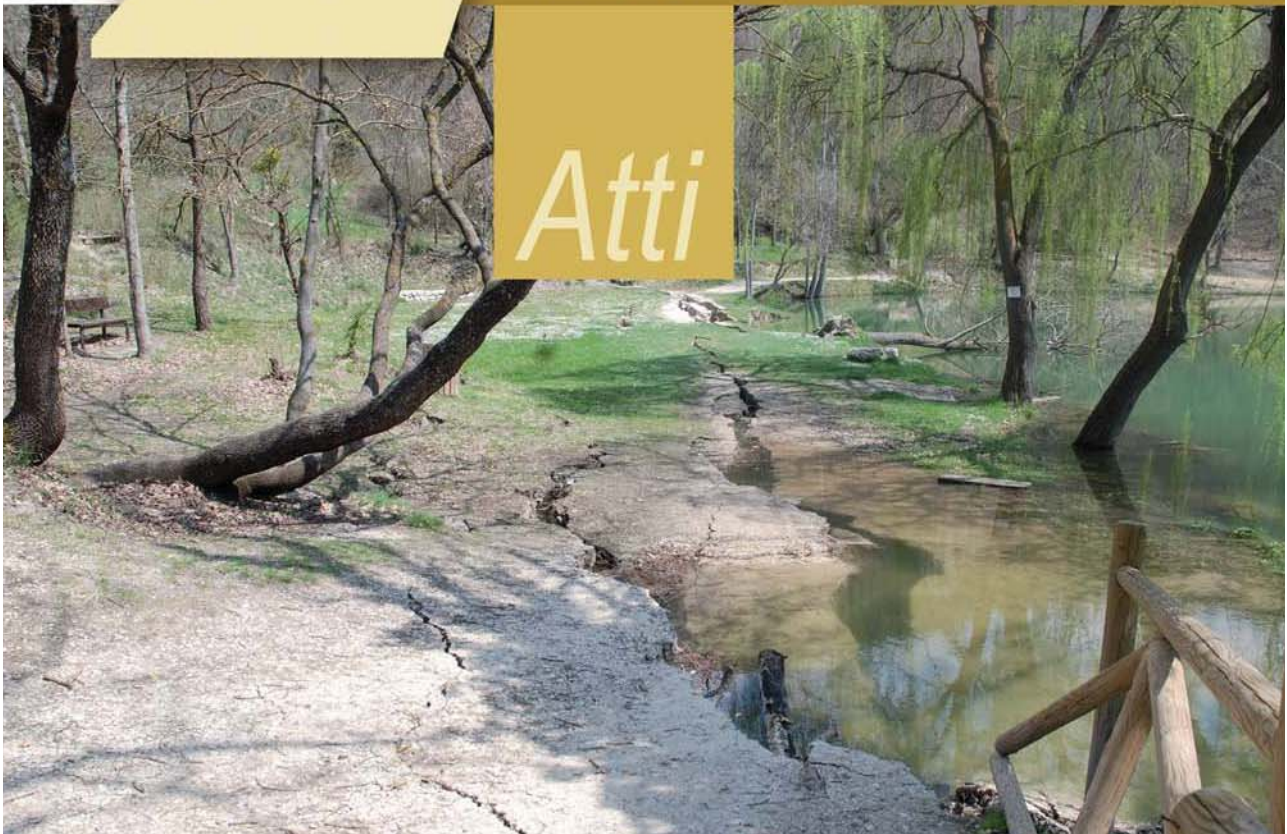
Dipartimento Difesa del Suolo

Workshop Internazionale

I SINKHOLES. GLI SPROFONDAMENTI CATASTROFICI NELL'AMBIENTE NATURALE ED IN QUELLO ANTROPIZZATO

ROMA 3 - 4 DICEMBRE 2009

Atti



I SINKHOLE DELL'APPENNINO CAMPANO: STATO DELLE CONOSCENZE

di Del Prete S.¹, Di Crescenzo G.², Santo A.³

ABSTRACT

Recent researches carried out throughout Campania territory have shown interesting information about sinkholes distribution and genesis.

Sinkholes formed both in carbonate contexts and in alluvial plains areas where high thickness of sands, conglomerate and pyroclastic deposits are present.

In the carbonate contexts the collected data suggest that karst collapse sinkholes result from enhanced dissolution phenomena related to the uprising of deeply derived fluids, for which active faults represent preferred pathways; they are favoured by the presence of a relatively shallow water table. In the collapse events, an important role is possibly played by seismic shaking.

In the alluvial plain contexts the underground voids are not directly linked with karst processes but originate due to the presence of an under pressure water circulation.

In this paper different typology of sinkhole phenomena and the results of some detailed geological surveys will be illustrated and discussed.

RIASSUNTO

Le ricerche condotte da diversi anni sui sinkhole della Campania hanno permesso di trarre alcune importanti considerazioni sulla distribuzione e sulla genesi di queste fenomenologie. I sinkhole si aprono sia in contesti pedemontani di natura carbonatica, sia in aree alluvionali pianeggianti, spesso colmate da potenti coltri di depositi alluvionali e piroclastici. Nei contesti carbonatici questi fenomeni non hanno una distribuzione casuale ma sono concentrati in settori caratterizzati dalla contemporanea presenza di più fattori predisponenti quali: calcari fortemente fratturati e carsificati, falde mineralizzate, faglie regionali con evidenze di attività tardo quaternaria. In questi casi il ruolo della mineralizzazione delle acque, a causa di venute endogene, svolge un ruolo importante per la carsificazione e il conseguente indebolimento degli ammassi rocciosi, sino al collasso, soprattutto in concomitanza di forti terremoti.

Nelle aree alluvionali, caratterizzate dalla presenza di notevoli spessori di materiali sciolti a granulometria fine, la formazione dei vuoti sotterranei e il trasporto del materiale non sembrerebbero legati a processi carsici riferibili a un substrato profondo, ma essenzialmente all'azione di acque sotterranee in pressione, da mettere in relazione a risalite della falda in concomitanza di intensi eventi piovosi all'interno del materasso piroclastico alluvionale.

1 Geologo, Federazione Speleologica Campana

2 Dottore di Ricerca in Geologia Applicata

3 Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Geotecnica ed Ambientale (Sez. di Geologia Applicata) Università di Napoli Federico II

Nel presente lavoro vengono individuati differenti contesti geologici e geomorfologici in cui si sono verificati fenomeni di sinkhole e descritte le loro peculiarità geologico stratigrafiche e idrogeologiche. Vengono, inoltre, riportati alcuni casi di studio ed alcune indagini di dettaglio condotte sia in contesti carbonatici che alluvionali e ci si sofferma sulla possibile genesi dei sinkhole.

1. PREMESSA

I fenomeni da sinkhole sono ampiamente diffusi nel territorio italiano ed interessano sia terreni granulari che rocce litoidi (AA.VV., 2008). Il termine sinkhole viene frequentemente utilizzato anche per indicare sprofondamenti connessi ad attività antropiche in sotterraneo e, più in generale, collassi che non si verificano necessariamente in ambiente carsico. La confusione terminologica relativa alle diverse tipologie di sinkhole è anche favorita dall'utilizzo del termine "sinkhole" negli Stati Uniti con finalità prevalentemente ingegneristiche, rispetto a una più frequente diffusione del sinonimo "dolina", in ambito europeo, utilizzato con finalità prevalentemente geomorfologiche.

Nel caso delle aree carsiche, la più recente e completa classificazione dei sinkhole è quella proposta da WALTHAM et al. (2005) che suddivide i fenomeni di sinkhole in sei tipologie: *solution*, *collapse*, *caprock*, *dropout*, *suffosion*, *buried sinkhole*.

Questa classificazione, tuttavia, facendo stretto riferimento ad ambiti carsici o comunque caratterizzati dalla presenza di un substrato carbonatico carsificabile sepolto ma comunque non profondo, in alcuni casi, come ad esempio in contesti di piana alluvionale con substrato carbonatico molto profondo, può risultare di difficile applicazione tanto che alcuni Autori italiani ne hanno proposto altre (NISIO, 2003; NISIO & SALVATI, 2004; NISIO et al., 2004) di più ampio respiro.

Nonostante le numerose ricerche, la complessità di questi fenomeni spesso rende la loro genesi ancora poco chiara ed anche il loro controllo e monitoraggio risulta difficile in quanto i sinkhole si formano improvvisamente senza particolari segni premonitori.

Solo di recente, peraltro, il verificarsi di catastrofici fenomeni di collasso in varie regioni italiane che hanno coinvolto aree abitate come Camaione, in Toscana (ottobre 1995), Telesse, in Campania (febbraio, 2002) e Gallipoli, in Puglia (marzo 2007) stanno iniziando ad attirare anche l'attenzione delle Amministrazioni statali in termini di pianificazione del territorio e di Protezione Civile come dimostrano i primi provvedimenti legislativi adottati da regioni come il Lazio, la Toscana e la Sardegna.

In questa nota, dopo una breve rassegna sulle precedenti conoscenze relative alle varie interpretazioni delle morfologie da sinkhole presenti sul territorio campano, viene analizzato lo stato odierno delle conoscenze acquisite sulla distribuzione del fenomeno e sulle probabili genesi di fenomeni di sinkhole sia in aree di piana s.l. (piana alluvionale, piana fluviale e conca intramontana) che su versanti carbonatici.

2. PRECEDENTI CONOSCENZE

La presenza di alcune depressioni morfologiche nell'area alluvionale del medio corso del F. Volturno, nel settore settentrionale della Campania, già dalla prima metà dell'800 aveva attirato l'attenzione di alcuni studiosi, GUSSONE & TENORE (1835) e SCACCHI (1885), che, precorrendo i tempi, già le interpretavano come fenomeni da sprofondamento in analogia a fenomeni e morfologie presenti anche nel Lazio.

Successivamente, tuttavia, altri Autori (SCHERILLO, 1965; SCHERILLO et al., 1965; 1966; 1968, GASPARINI, 1965; 1966), reinterpretarono queste stesse morfologie come crateri

vulcanici “gassosi” da mettere in relazione al vulcanismo del Roccamonfina secondo le stesse supposizioni avanzate anche per le “Fosse falerne” presenti lungo la fascia pedemontana del Monte Massico.

Nel 1986, CORNIELLO & DE RISO, in uno studio sull'idrogeologia e idrochimica delle sorgenti dell'agro telesino, individuano sul colle calcareo di Montepugliano (estrema propaggine meridionale del più ampio massiccio dei Monti del Matese) un gran numero di doline da collasso la cui origine è messa in relazione con il ripetuto oscillare del livello di base carsico e la presenza di acque mineralizzate cui sono associati fenomeni di ipercarsismo.

Nel 1995, CORNIELLO & SANTO, svolgendo uno studio sulle problematiche geologiche connesse ai fenomeni di dissesto della basilica benedettina di S. Angelo in Formis, segnalano la presenza di trincee e di doline da crollo ellittiche lungo i versanti settentrionali del Monte Tifata (margine nord orientale della Piana Campana), presumibilmente a movimenti gravitativi profondi di versante.

A seguire, BUDETTA et al. (1996) e SANTO & TUCCIMEI (1997), nell'ambito di uno studio sui fenomeni deformativi lungo versanti carbonatici associati a fenomeni carsici, focalizzano la loro attenzione sulle due doline da sprofondamento della Jala, in Penisola Sorrentina, e di Pianelle nei pressi dell'area termale di Contursi. In entrambi i casi gli Autori riconoscono, tra le cause predisponenti la loro formazione, la presenza di eventuali vuoti carsici, uno stato di intensa fratturazione e carsismo degli ammassi, la presenza di manifestazioni termali e termominerali quali condizioni per l'instaurarsi di fenomeni di ipercarsismo e una correlazione con forti *shock* sismici. Vengono, inoltre, evidenziate le forti implicazioni tra lo sviluppo di questi fenomeni e quelli deformativi di versante in contesti carbonatici nonché le complesse interazioni con la presenza di infrastrutture di trasporto in sottoterraneo esistenti o in fase di realizzazione.

Dopo questa serie di ricerche puntuali o che in qualche caso trattavano solo di riflesso l'aspetto legato alla formazione di morfologie da collasso variamente interpretate, è solo nel 2004 che viene pubblicata una prima sintesi sulla distribuzione delle morfologie da sinkhole in Campania (DEL PRETE et al., 2004) cui hanno fatto seguito una serie di studi di dettaglio sia per siti o contesti specifici (SANTO et al., 2007; DEL PRETE et al., 2008a; 2010a) che di carattere generale (DEL PRETE et al., 2008b, 2010a; 2010b).

3. SINKHOLE IN CAMPANIA

Le ricerche in corso hanno consentito di identificare almeno 120 morfologie da collasso (Fig. 1) che coinvolgono terreni sia granulari che litoidi e che si distribuiscono in differenti contesti geologici riconducibili ad estese piane alluvionali, valli fluviali, conche intramontane e versanti carbonatici bordieri delle piane peritirreniche (DEL PRETE et al., 2010b).

Quando interessano terreni granulari, si tratta sia di sinkhole che si sviluppano nelle coperture detritiche pedemontane presenti alla base di massicci carbonatici (brecce di versante e ghiaie di conoide), che di sprofondamenti in materiali limoso-sabbioso-ghiaiosi costituiti da piroclastiti in sede o rimaneggiate in aree di piana alluvionale o conche intramontane (DEL PRETE et al., 2008 a; 2008b).

Viceversa, nel caso di sinkhole in terreni litoidi, essi coinvolgono rocce di natura prevalentemente calcarea, molto carsificate con eventuali coltri detritiche di copertura di ridotto spessore e si distribuiscono alla base o lungo scarpate di faglie bordiere (SANTO et al., 2007; DEL PRETE et al., 2010a).

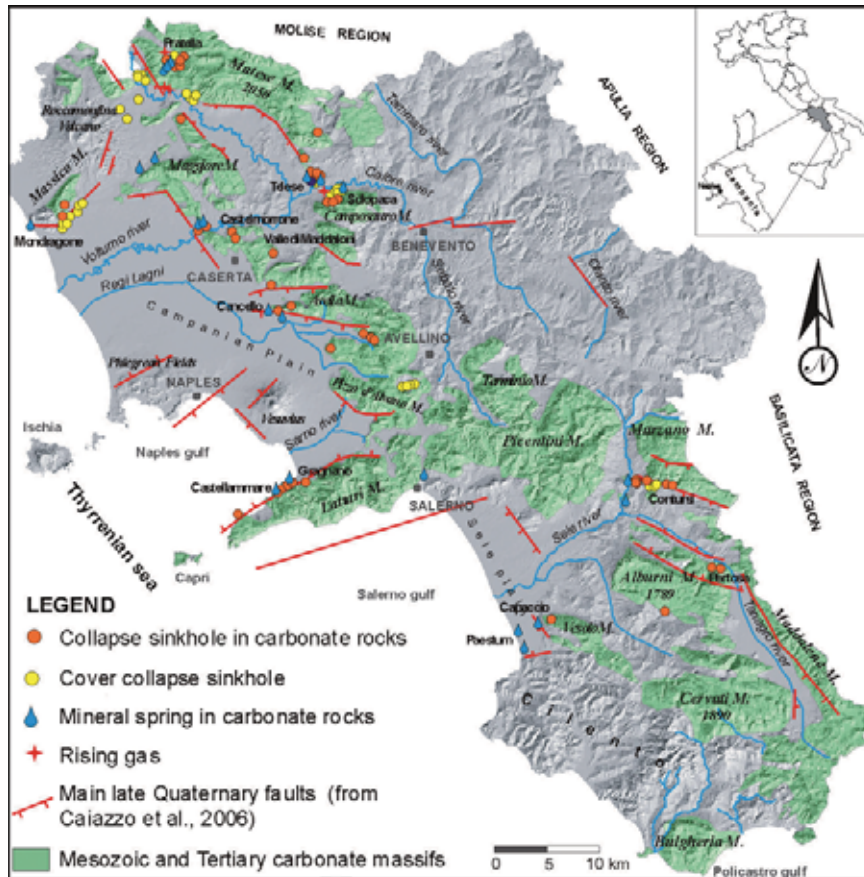


Fig. 1 - Distribuzione dei sinkhole in Campania (da Del Prete et al., 2010a)

Fig. 1 - Sinkhole distribution in Campania Region (after Del Prete et al., 2010a).

3.1 Sinkhole di pianura

I sinkhole che si sviluppano nelle aree di piana s.l., interessano ambiti geologici e geomorfologici riferibili ad ampie piane alluvionali (es. piana campana settentrionale, valle del fiume Calore beneventano; CELICO, 1983), valli fluviali strette (es: valle del fiume Lete) e conche intramontane (es. conca di Forino).

Lungo i margini interni della catena appenninica, le fasi tettoniche estensionali hanno prodotto ampi graben e piane costiere riempite da sedimenti marini, alluvionali e vulcanici con potenti spessori di alcune centinaia di metri. I sinkhole che si sviluppano all'interno di queste ampie piane alluvionali, come quella del Volturno e della Piana Campana, presentano alcune caratteristiche comuni rappresentate da:

- potenti spessori di sedimenti alluvionali (limo-sabbioso-ghiaiosi) e piroclastici (sabbioso-ghiaiosi sciolti o tufacei) in sede o rimaneggiati;
- elevate profondità del substrato carbonatico (rinvenibile ad alcune centinaia di metri di profondità);

- presenza di falda poco profonda, talora in pressione che satura i sedimenti e dà origine a piccoli laghetti ospitati all'interno dei sinkhole;
- allineamenti lungo importanti faglie regionali;
- età di formazione recente come dimostra il coinvolgimento nelle fasi di collasso di terreni olocenici e di manufatti storici;
- elevata suscettibilità a fenomeni di liquefazione dei sedimenti innescata da forti shock sismici.

I sinkhole presenti nella piana a sud est del Monte Massico e quelli presenti nella paleo valle del Volturno lungo la fascia pedemontana nord orientale del Roccamonfina, sono accomunati da quasi tutte queste caratteristiche. Sono tutti impostati in depositi limoso-sabbioso di origine alluvionale e piroclastiti riferibili sia all'Ignimbrite Campana (39.000 anni) che post Ignimbrite. Inoltre, in diversi di essi la falda è tuttora affiorante dando origine a caratteristici laghetti, mentre per altri esistono foto storiche ad attestarne la presenza nel passato. Sebbene, infine, ancora non siano state trovate prove certe sulla loro origine, non è da escludere una loro origine connessa a forti terremoti come narrano alcune leggende popolari locali.

3.2 Sinkhole in valli fluviali

In Campania sono presenti alcuni sinkhole formati all'interno di valli fluviali ampie da poche centinaia di metri a pochi chilometri. La copertura dei depositi alluvionali è in genere caratterizzata da spessori minori rispetto a quella della più ampie piane alluvionali prima descritte, ed è costituita da depositi limoso-sabbioso ghiaiosi. A questi depositi possono localmente intercalarsi anche lenti e livelli travertinosi, lacustri e piroclastici in sede o rimaneggiati e pedogenizzati. La falda è in genere superficiale o poco profonda e le sue oscillazioni relativamente limitate per l'elevata permeabilità dei depositi.

In questi contesti i sinkhole:

- non sono mai di grandi dimensioni (pochi metri di diametro);
- interessano sempre depositi sabbioso limosi;
- la loro genesi è associata a repentine oscillazioni della falda in periodi particolarmente piovosi che possono innescare fenomeni di liquefazione;
- vengono rapidamente obliterati dalle morfodinamiche fluviali.

Esempi di sinkhole originatisi in simili contesti sono presenti nell'alta valle del fiume Lete, nella valle del Calore beneventano presso Telesse e nella medio-alta valle del Volturno presso Mastrati. In tutti questi casi i sinkhole hanno coinvolto depositi limo sabbiosi (in qualche caso anche travertinosi), talora con lenti torbose (Volturno). In tutti i casi le forti variazioni di carico della falda associate a forti piogge, hanno indotto fenomeni di liquefazione che si sono manifestati con un repentino rigonfiamento dell'area interessata dal sinkhole causato dalla improvvisa risalita dell'acqua che ha provocato l'espulsione di acqua e fango.

Anche in questi contesti non si può escludere, quale ulteriore fattore d'innescio per alcuni casi, l'influenza dei forti terremoti come attestato dalla formazione del lago di Telesse in occasione del forte terremoto del settembre 1349.

3.3 Sinkhole all'interno di conche intramontane

All'interno della catena appenninica e sempre in connessione alla sue fasi di surrezione, sono presenti alcune conche intramontane. Queste depressioni possono essere ampie da alcune centinaia di metri ad alcuni chilometri e presentare riempimenti di depositi lacu-



Fig. 2 - Panoramica della stratigrafia visibile lungo le pareti del sinkhole di Contrada Petrosa (foto del marzo 2007). Legenda: A) suoli recenti con due livelli di eruzioni vulcaniche storiche [472d.C. e 1631]; B) pomici dell'eruzione vulcanica di Mercato/Ottaviano, 8000 anni fa; C) cineriti rimaneggiate (limi sabbiosi) con pomici e locali livelli di sabbie e paleosuoli; D) pomici grigie e scorie probabilmente riferibili all'eruzione di Sarno rimaneggiate in ambiente alluvionale; E) cineriti (limi sabbiosi) pedogenizzate con locali livelli di sabbie fini.

Fig. 2 - View of stratigraphy along the wall of Contrada Petrosa sinkhole (photo of 2007, March). Legend: A) present soils with two levels of recent tephra (472 d.C. and 1631 eruptions); B) tephra of Mercato/Ottaviano eruption (8000 y. b.p); ash and pumice interbedded with sands and paleo-soil levels; D) grey pumices and scoria of Sarno eruption reworked in alluvial environment; E) weathered ash levels with thin sandy layers.

stri e piroclastici sia in sede che rimaneggiati dell'ordine del centinaio di metri poggianti su un substrato flischioide. Lungo i bordi sono invece presenti depositi detritici grossolani derivati dallo smantellamento dei versanti.

I sinkhole che si sviluppano all'interno delle conche intramontane, come quella di Forino, presentano alcune caratteristiche comuni rappresentate da:

- coinvolgimento di potenti spessori di sedimenti alluvionali (limo-sabbioso-ghiaiosi) e piroclastici (sabbioso-ghiaiosi sciolti) in sede o rimaneggiati;
- elevate profondità del substrato carbonatico (rinvenibile anche ad un centinaio di metri di profondità);
- rapide oscillazioni della falda con repentini incrementi del gradiente idraulico all'interno del corpo di sedimenti di riempimento della conca intramontana;
- periodica circolazione idraulica all'interno del pacco di sedimenti di riempimento della conca intramontana in occasione di forti piogge;

La conca di Forino costituisce un bacino endoreico di circa 10 km² localizzato sul margine esterno della dorsale carbonatica dei monti di Sarno. La genesi della depressione è associata all'azione di faglie attive durante il Plio-Quaternario che hanno dislocato le dorsali calcareo mesozoiche su cui poggiano, in trasgressione, successioni terrigene mioceniche. Nel centro della piana, il substrato miocenico ed i sottostanti calcari risultano ribassati a gradinata sino a poche centinaia di metri. Il riempimento quaternario della conca è costituito da successioni fluvio-lacustri, di natura limo-argillosa, ricoperte da tufi dell'Ignimbrite

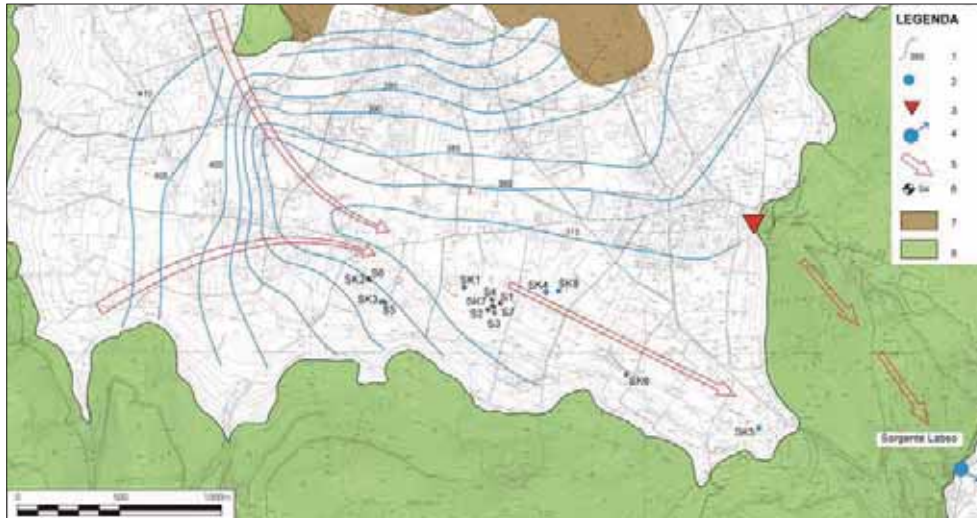


Fig. 3 - Isopiezometriche della falda della piana di Forino [da Santo et al., 1998 mod.]. Legenda: 1) curva isopiezometrica e relativa quota s.l.m.; 2) sinkhole; 3) inghiottitoio; 4) sorgente; 5) direzione di drenaggio sotterraneo; 6) sondaggio; 7) flysch miocenici; 8) calcari mesozoici.

Fig. 3 - Isopiezometric curves of the Forino plain [from Santo et al., 1998, mod.]. Legend: 1) isopiezometric curve and altitude above sea-level; 2) sinkhole; 3) ponor; 4) spring; 5) groundwater flow direction; 6) borehole; 7) Miocene flysch; 8) Mesozoic limestones.

Campana [39.000 anni] e da alternanze di piroclastiti sia in sede che rimaneggiate dell'attività flegreo vesuviana e paleosuoli limo sabbiosi.

Nella conca sono stati identificati 8 sinkhole, due dei quali generatisi nel marzo e nel giugno 2005 (Fig. 2), che nell'ambito del bacino tendono a distribuirsi lungo la fascia di deflusso preferenziale della falda del materasso alluvionale (DEL PRETE et al., 2008 a).

A contorno del sinkhole del giugno 2005, è stato possibile eseguire una campagna d'indagine costituita da 5 carotaggi (1 all'interno del sinkhole e 4 al contorno; Fig. 3). La ricostruzione stratigrafica di dettaglio del sito e lo studio della circolazione idrica sotterranea (Figg. 3 e 4), hanno messo in evidenza l'instaurarsi di fenomeni di erosione lungo una paleo incisione impostata nell'Ignimbrite Campana sepolta da livelli sabbioso limosi al suo top (DEL PRETE et al., 2008 a). Questi fenomeni di suffosione producono la formazione di vuoti che poi collassano in occasioni di forti piogge per incremento delle tensioni in volta dei sedimenti granulari imbibiti dalle intense precipitazioni e/o incrementi di pressione idraulica dovuti alla circolazione idrica sotterranea nel pacco di sedimenti al top dell'Ignimbrite. La ricerca da un lato ha consentito di escludere con certezza l'eventuale influenza dovuta alla presenza di cavità nel substrato carbonatico, dall'altro ha evidenziato il possibile ruolo delle dorsali carbonatiche a contorno. Detto ruolo consiste sia nell'influenzare le variazioni di carico idraulico nella falda multistrato dell'acquifero alluvionale, sia nello smaltimento delle acque dell'acquifero alluvionale e del trasporto solido che deriva dai processi di suffosione verso la falda profonda attraverso inghiottitoi sepolti ubicati nella zona di recapito finale della falda dell'acquifero alluvionale a margine della conca intramontana (Fig. 5).

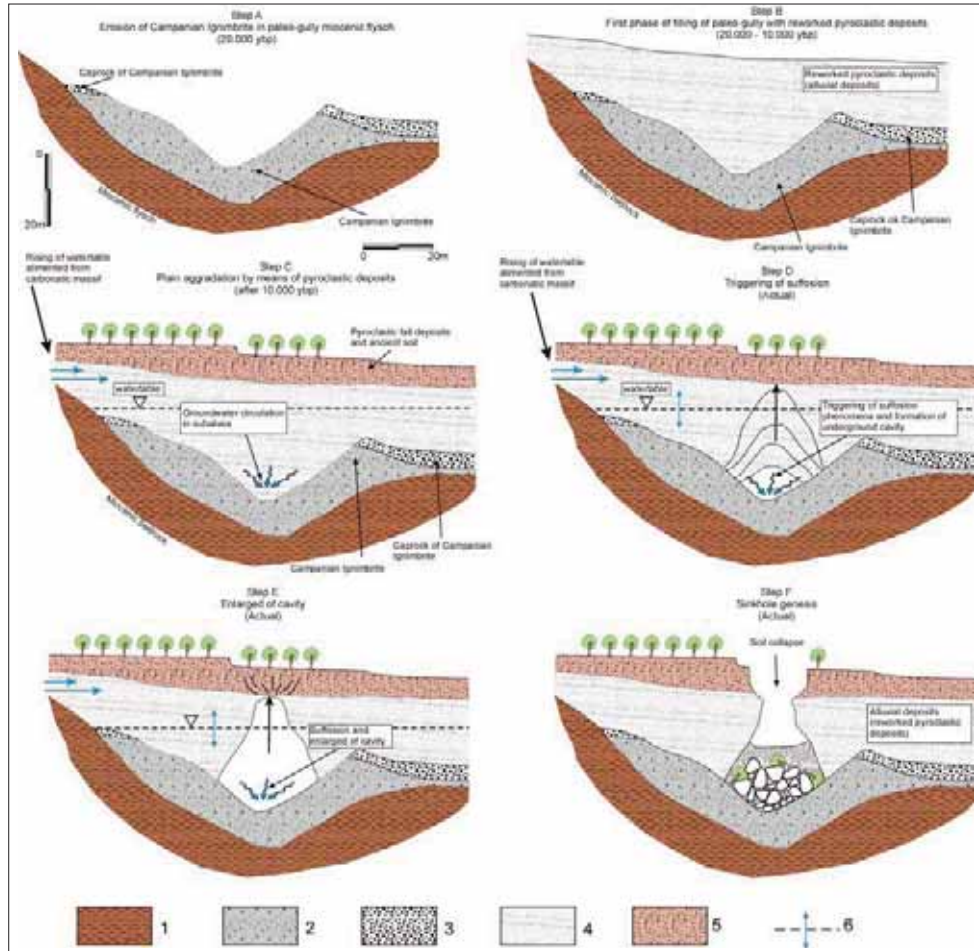


Fig. 4 - Evoluzione geomorfologica del sinkhole di Contrada Petrosa a Forino (da Del Prete et al., 2008 a mod.). A) paleoincisione nel substrato terrigeno (circa 40.000 anni fa) ed erosione dell'Ignimbrite Campana (39.000 anni) operata dal nuovo reticolo idrografico dopo la sua deposizione; B) fase di riempimento della paleoincisione (tra 20.000 e 10.000 anni fa); C) ulteriore fase di aggradazione della piana per caduta di depositi piroclastici seppellisce definitivamente la paleovalle; D) in profondità si creano le condizioni per la circolazione idrica nell'acquifero piroclastico-alluvionale con un deflusso preferenziale che segue la paleoincisione sepolta (post 10.000 anni fa); E) la circolazione idrica sotterranea innesca un lento processo di erosione sotterranea che porta alla formazione di vuoti che causa i sinkhole (F).

Fig. 4 - Geomorphological evolution of the Contrada Petrosa sinkhole (modified after Del Prete et al., 2008). A) Palaeo-gully in the flysch deposits and erosion of the Campanian Ignimbrite (about 39.000 BP) after its deposition with genesis of a new gully (about 20.000 BP); B) phase of valley filling (between 20.000 and 10.000 BP); C) plain aggradation by means of pyroclastic fall deposits. The ancient valley, cut in the Campanian Ignimbrite and filled with reworked pyroclastic deposits, is definitely buried (10.000 BP); D) groundwater circulation within the alluvial-pyroclastic aquifer has a flow direction oriented as the buried paleo-gully, and causes a slow erosion that produces formation of void; E) upward void migration causes the sinkhole (F).

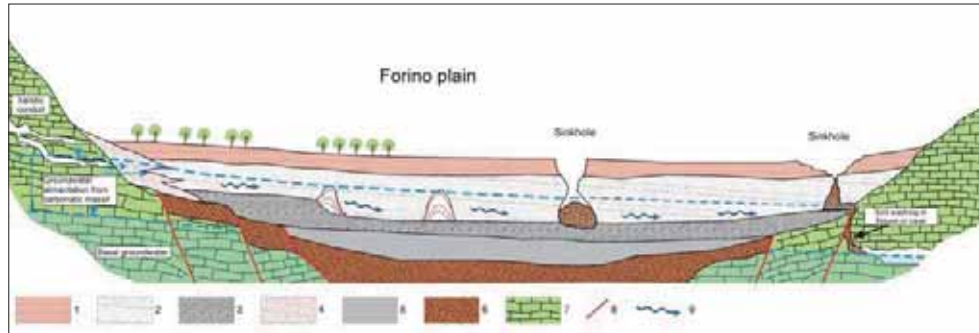


Fig. 5 - Rappresentazione schematica della formazione dei sinkhole nella piana di Forino. 1) Depositi piroclastici da fall alternati a paleosuoli e livelli alluvionali; 2) piroclastiti rimaneggiate in ambiente alluvionale; 3) Ignimbrite Campana; 4) detrito di versante; 5) depositi limoso-sabbiosi pre - Ignimbrite campana; 6) flysch miocenici; 7) substrato carbonatico mesozoico; 8) faglia; 9) circolazione idrica sotterranea nell'acquifero alluvionale.

Fig. 5 - Schematic representation of sinkhole formation in the Forino plain. Legend: 1) pyroclastic fall deposits, paleosoils alternated with alluvial deposits; 2) alluvial deposits; 3) Campanian Ignimbrite; 4) detrital talus; 5) alluvial sandy and silty deposits pre-Campanian Ignimbrite; 6) Miocene flysch; 7) Mesozoic limestones; 8) fault; 9) underground water circulation inside alluvial aquifer.

3.4 Sinkhole su versanti carbonatici

In Campania sono presenti numerosi massicci carbonatici interessati da un diffuso carsismo sia epigeo che ipogeo (Russo et al., 2005). I paesaggi carsici possono presentare una enorme varietà anche in termini di forme e dimensioni che combinate fra loro possono creare delle condizioni estremamente complesse per le costruzioni ingegneristiche la cui conoscenza è di fondamentale importanza per la definizione dell'*hazard* in aree carsiche nel campo dell'ingegneria civile.

Il collasso di una cavità formatasi per dissoluzione è il più classico dei processi evolutivi di un'area carsica.

In Campania è emerso che i 77 sinkhole in terreni carbonatici studiati sono principalmente localizzati nel settore settentrionale della regione concentrandosi lungo aree ben specifiche coincidenti con le principali faglie attive durante il Quaternario e/o in prossimità delle principali sorgenti minerali della regione (DEL PRETE et al., 2010a).

La gran parte di questi sinkhole si distribuisce lungo le aree di versante (46%) e secondariamente nelle aree pedemontane o di top del versante. Presentano in genere delle morfologie da sub circolari a ellittiche, ma le forme su versante hanno forma più frequentemente rettangolare o rombica evidenziando un chiaro controllo strutturale da parte di faglie o fratture principali.

A differenza dei sinkhole in terreni granulari, in quelli carbonatici sono molto frequenti morfologie di notevoli dimensioni con lunghezze degli assi che frequentemente superano il centinaio di metri e volumi principalmente ricadenti in un intervallo di 10.000-100.000 m³ (64%). In 3 casi è stato stimato un volume anche di 1 milione di m³.

Da un punto di vista litologico la stragrande maggioranza dei sinkhole identificati coinvolge depositi carbonatici Mesozoici (soprattutto calcari cretacei di piattaforma) e subordinatamente brecce di versante o depositi ghiaiosi di conoide su substrato carbonatico.

Osservazioni di carattere macro strutturale hanno, inoltre, evidenziato che i lineamenti tettonici principali associati a faglie con orientamento appenninico (N120°), influenzano

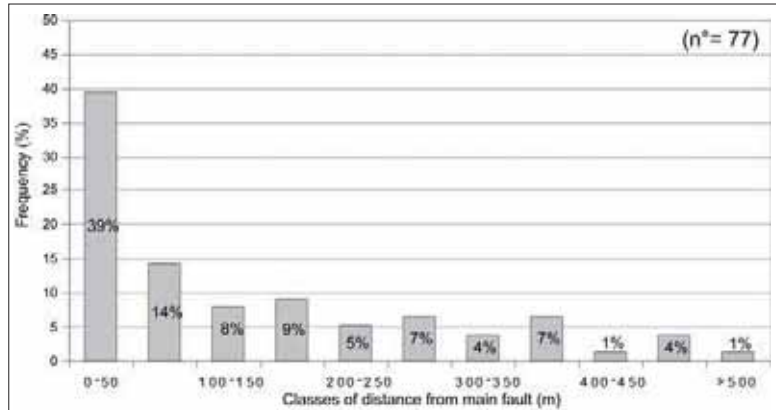


Fig. 6 - Diagramma di frequenza della distanza dei sinkhole dalle faglie principali.
Fig. 6 - Frequency diagram for the distance from the main fault.

soprattutto la forma rombica o rettangolare del sinkhole, mentre la loro localizzazione è più strettamente controllata da fattori litostutturali locali.

La stretta relazione con i lineamenti tettonici principali dei versanti su cui si impostano è altresì confermata dalla ridotta distanza rispetto ai quali si ubicano le depressioni che nella maggior parte dei casi (90%) è inferiore a 350m (Fig. 6).

La valutazione del Rock Mass Rating (BIENIAWSKI, 1979) effettuata lungo le pareti di alcuni sinkhole (DEL PRETE et al., 2010a), ha evidenziato valori piuttosto scadenti dell'ammasso (classe IV).

Dal punto di vista idrogeologico è emerso che i sinkhole sono frequentemente associati alla presenza di emergenze mineralizzate presenti alla base dei massicci e sono caratterizzate da elevati tenori di CO₂ e H₂S.

Un altro aspetto importante da considerare nell'ambito delle relazioni tra falde mineralizzate e genesi dei sinkhole, è anche la variazione nel tempo della quota della falda all'interno dell'ammasso. In tal senso sono significative le osservazioni che si possono fare lungo i versanti meridionali del colle di Montepugliano, a Telesse, dove si possono osservare zone di alterazione dovute a manifestazioni mineralizzate (acque sulfureo-bicarbonato calciche) a diverse altezze lungo i fronti di cava provocate dalle variazioni della quota di sfioro delle sorgenti nel tempo lungo la verticale del rilievo (CORNIELLO & DE RISO, 1986). Numerose e dettagliate sono le fonti storiche che riportano di frequenti terremoti anche distruttivi in Appennino meridionale, tuttavia solo raramente si riportano informazioni sulla concomitante formazione di sinkhole.

Nello specifico le fonti storiche consentono di risalire con certezza alla formazione di sinkhole sul colle di Montepugliano in occasione del terremoto del 9 settembre 1349 (Fig. 7) con epicentro nell'area di Montecassino (ROSSI, 1857; RICCARDI, 1927) e successivi ampliamenti di alcuni sinkhole della stessa zona in occasione dell'evento sismico del 26 luglio 1805 (ROSSI, 1857; PORFIDO et al., 2002; intensità Macrosismica M=6,8).

Anche il sinkhole di Pianelle lungo il versante di Monte Marzano generatosi nel maggio 1981, viene considerato da BUDETTA et al. (1996) come un effetto secondario associato al terremoto del 23 novembre 1980 [magnitudo M=6,9].

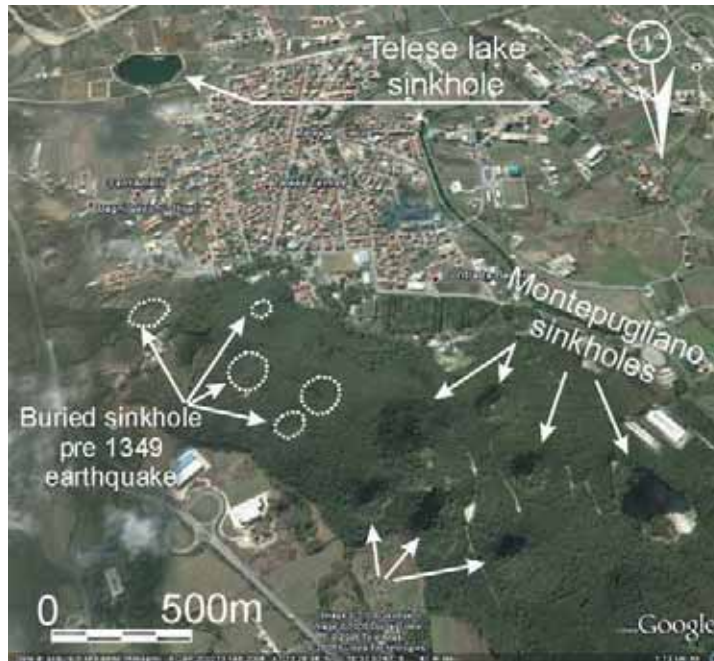


Fig. 7 - Sinkhole sul colle di Montepugliano e nella antistante piana (lago di Telese) generati con il terremoto del 1349. Nella foto è possibile osservare anche la presenza di altri sinkhole colmati dai depositi dell'Ignimbrite Campana e, quindi, precedenti il 1349.

Fig. 7- Montepugliano hill and Telese plain (Telese lake) sinkholes formed during the 1349 earthquake. The aerial view show some other sinkhole buried by Campanian Ignimbrite (39.000 ybp).

BUDETTA et al. (1996) e SANTO & TUCCIMEI (1997) ipotizzano che anche il sinkhole della Jala si sia formato a seguito di una crisi sismica che avrebbe interessato l'area dei Monti Lattari alla fine del XVII secolo basandosi sui risultati di una datazione assoluta eseguita su speleotemi tranciati rinvenuti al fondo dell'ampia frattura tensionale (Spacco della Jala) presente a monte del sinkhole stesso. I dati paleo sismici, infatti, confermano che tra il 1695 ed il 1698 l'area fu interessata da 5 terremoti con intensità tra V e VII della scala MCS (CNR/PFG, 1985). La stessa area, inoltre, secondo il BARATTA (1901) risentì anche degli effetti del terremoto della Basilicata del 1694.

In sintesi, sebbene non esistano molti dati disponibili che confermino una stretta correlazione tra la formazione di alcuni sinkhole e forti terremoti storici, non si può escludere che alcuni di essi si siano formati in periodi preistorici o lontani da aree antropizzate danneggiate richiamate nelle cronache storiche. Nello stesso tempo è anche significativa la vicinanza delle aree dei maggiori epicentri di terremoti storici rispetto alle aree in cui sono localizzati i sinkhole.

4. STATO DELLE CONOSCENZE SULLA POSSIBILE GENESI DEI SINKHOLE E PROBLEMI APERTI

Dallo studio delle numerose fenomenologie di sinkhole che è stato possibile riconoscere in Campania ne deriva che essi possono coinvolgere sia terreni granulari che litoidi e che

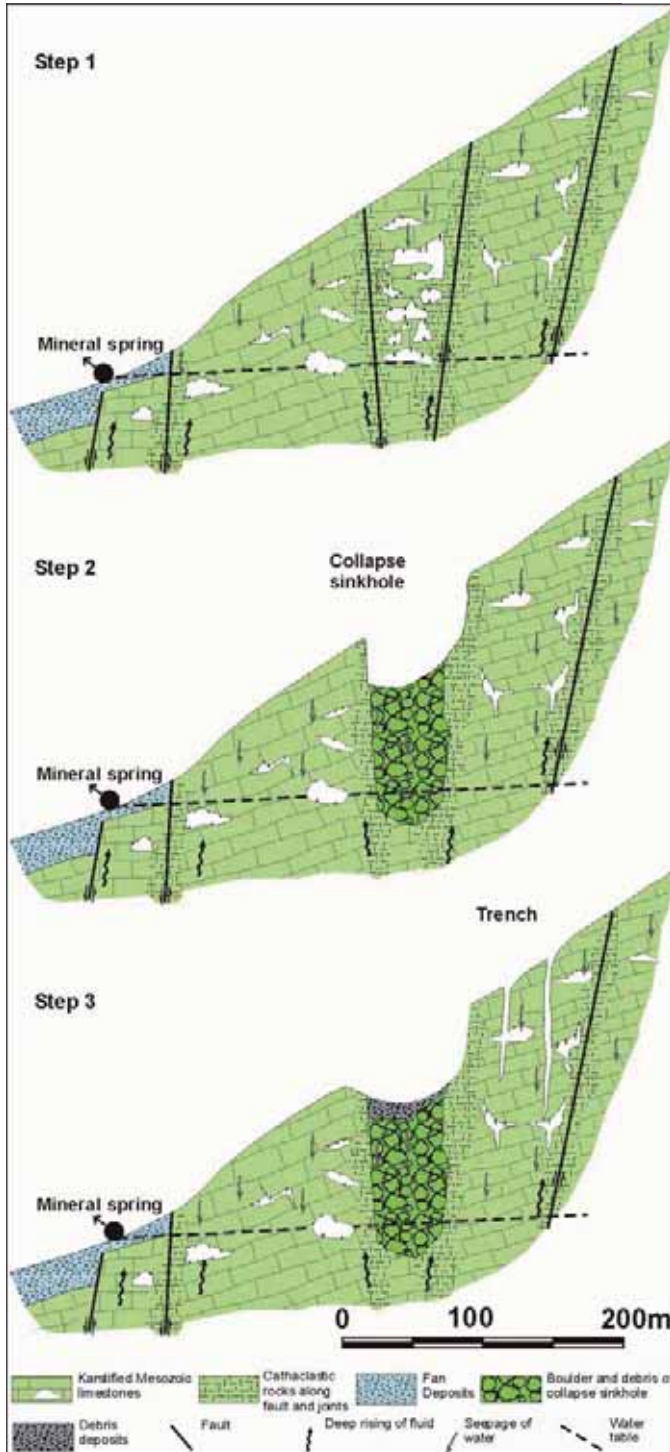


Fig. 8 - Genesis ed evoluzione dei collapse sinkhole lungo versanti carbonatici.

Fig. 8 - Genesis and evolution of the studied collapse sinkhole on carbonate rock.

possono interessare differenti contesti morfologici caratterizzati da specifiche condizioni e assetti geologici.

Sinkhole in terreni granulari si rilevano tipicamente nell'ambito di aree di piana, valli fluviali o conche intramontane caratterizzate da coltri di depositi alluvionali, marini, piroclastici sia in sede che rimaneggiati e depositi lacustri con spessori che possono andare da alcune decine di metri ad alcune centinaia di metri (DEL PRETE et al., 2008 a; DEL PRETE et al. 2010b). Si tratta di sequenze sedimentarie costituite da alternanze di strati a differenti permeabilità, con acquiferi multistrato in cui la circolazione idrica sotterranea, le oscillazioni del livello di falda ma soprattutto locali incrementi di carico idraulico possono instaurare fenomeni puntuali di liquefazione o di erosione (*ravelling* o *suffosion*) sotterranea con conseguenti fenomeni di collasso in superficie che coinvolgono terreni sciolti a granulometria prevalentemente limoso sabbiosa (Fig. 5). Quando i collassi sono strettamente legati a incrementi di carico idraulico con conseguente liquefazione, il fenomeno è preceduto da un improvviso rigonfiamento del terreno con espulsione di acqua e fango. In questo caso si generano delle ampie e profonde depressioni di forma da circolare a ellittiche spesso occupate da uno specchio d'acqua, e con larghezza e pareti sub verticali di poche decine di metri.

Non si può escludere che, insieme ai fattori sopra esposti, anche nei contesti di pianura l'effetto di uno *shock* sismico, comportando un incremento delle pressioni di poro con conseguenti fenomeni di liquefazione, possa rappresentare un'importante causa d'innescamento di sinkhole. Simili fenomeni, peraltro, sono confermati dalle fonti storiche nel caso della piana di Telesse (1349) nonché dagli eventi recenti connessi al sisma del 2009 nell'aquilano. In questi contesti, in ogni caso, non si ha evidenza di un ruolo diretto di un eventuale substrato carsificabile profondo nella genesi degli sprofondamenti.

Nel caso dei sinkhole in rocce litoidi i dati finora raccolti evidenziano che essi interessano prevalentemente calcari cretaci molto fratturati e carsificati che coinvolgono volumi tra i 10^4 e i 10^5 m³.

Dal punto di vista morfostrutturale la maggior parte di essi si localizza lungo versanti di faglia alla cui base ci sono evidenze di tettonica recente. I sinkhole si aprono in genere a poche centinaia di metri dalla faglia bordiera (Fig. 6).

Considerazioni di carattere paleosismologico sembrano attestare una correlazione tra aree caratterizzate da forti terremoti e aree in cui sono localizzati i sinkhole. Questo dato potrebbe giustificare l'assenza di sinkhole nel settore meridionale della Campania notoriamente caratterizzata da una bassa sismicità.

Sebbene le aree interessate da sinkhole facciano parte di massicci carbonatici in genere caratterizzati da un diffuso carsismo epigeo ed ipogeo, in vicinanza dei sinkhole non sono noti estesi sistemi carsici ipogei. Viceversa, gli ammassi si presentano notevolmente fratturati e microcarsificati o caratterizzati dalla presenza di vuoti isolati e circoscritti di dimensioni metriche (DAVIDE, 1977; RUSSO et al., 2005; COZZOLINO et al., 2007).

La presenza di emergenze mineralizzate in corrispondenza di aree interessate dalla presenza di sinkhole è indicativa dell'instaurarsi di fenomeni di ipercarsismo e dello sviluppo di processi carsici ipogenici (KLIMCHOUK, 2007) che rappresentano delle condizioni predisponenti all'innescamento di sinkhole. I fenomeni ipogenici come è noto si sviluppano lungo l'interfaccia tra la zona freatica ed epifreatica e pertanto altrettanto significative sono anche le eventuali variazioni del livello di base carsico nel tempo associate alla variazione relativa di quota della falda all'interno dell'ammasso carsificabile.

Ai fenomeni di sinkhole lungo versante, infine, spesso si associa la formazione di profonde trincee generate da fenomeni di detensionamento del versante (Fig. 8) con evidenti effetti anche a livello di instabilità dei versanti e problemi in fase di progettazione e costruzione di opere di ingegneria civile.

5. CONCLUSIONI

La conoscenza dei sinkhole in Campania negli ultimi anni è andata gradualmente migliorando tanto da permettere di poter definire con buona precisione le aree maggiormente suscettibili a sprofondamenti sia nei contesti di pianura che in quelli carbonatici.

I sinkhole si sviluppano laddove sono presenti alcuni fattori geologici ed idrogeologici predisponenti. Nella aree di pianura essi coinvolgono depositi granulari (alluvionali e vulcanoclastici) di natura sabbiosa o limoso-sabbiosa, saturi per la presenza di una falda. I fattori d'innescio sono rappresentati generalmente da incrementi dei gradienti idraulici e dell'aumento di pressione di poro che possono indurre liquefazioni e conseguenti collassi. Gli incrementi di pressione idraulica, oltre che da fattori idrogeologici, possono essere indotti da shock sismici. Per tale motivo, nelle aree già interessate da sprofondamenti, è molto importante la caratterizzazione geologico-stratigrafica del sottosuolo che può mettere in evidenza anche la possibilità di meccanismi genetici molto particolari come quelli di suffocazione (DEL PRETE et al., 2008 a).

Nell'ambito dei massicci carbonatici campani, si è constatato che i sinkhole si concentrano in aree dove sono presenti falde e sorgenti minerali, prevalentemente sulfuree, molto probabilmente collegate a risalite endogene lungo faglie tardo-quadernarie attive. In questi contesti si creano situazioni di ipercarsismo, che provocano una notevole alterazione ed indebolimento dell'ammasso roccioso e conseguenti sprofondamenti che possono essere facilitati da shock sismici come, tra l'altro, ben testimoniato in alcuni casi storici.

Nel complesso, tuttavia, diversi aspetti genetici dei sinkhole non sono ancora chiari e richiederebbero maggiori studi e risorse economiche per poter effettuare indagini e per approfondire gli aspetti stratigrafici, idrogeologici e geotecnici.

È importante segnalare che negli ultimi anni diverse amministrazioni pubbliche preposte alla pianificazione territoriale stanno gradualmente iniziando a prendere sempre più coscienza del problema e ad elaborare le prime norme di salvaguardia sul problema sinkhole.

Sarebbe opportuno, tuttavia, che anche negli studi di pianificazione locale o in quelli relativi alla progettazione ed esecuzione di grandi infrastrutture, si tenesse conto della eventuale presenza dei sinkhole soprattutto in prospettiva sismica.

BIBLIOGRAFIA

- AA.VV. (2008) - *I fenomeni naturali di sinkhole nelle aree di pianura italiane*. Mem. Descrittive della Carta Geologica d'Italia, **85**, 482 pp., Roma.
- BARATTA, M. (1901) - *I terremoti d'Italia*. F.lli Bocca Editori, Torino, 950 pp.
- BIENIAWSKI, Z.T. (1979) - *The Geomechanics Classification in Rock Engineering applications*. Proc. 4th Int. Congr on Rock Mechanics, **2**, 51-58.
- BUDETTA P., NICOTERA P. & SANTO A. (1996) - *Controlli e monitoraggio di fenomeni deformativi indotti da carsismo in versanti carbonatici dell'Appennino campano*. Atti Conv. Int. "La prevenzione delle catastrofi idrogeologiche: il contributo della ricerca scientifica", C.N.R. - G.N.D.C.I., Alba 5-7 Novembre 1996, 383-395.

- CELICO, P., 1983: *Idrogeologia dei massicci carbonatici, delle piane quaternarie e delle aree vulcaniche dell'Italia centro-meridionale (Marche e Lazio meridionali, Abruzzo, Molise e Campania)*.- Quad. per la Cassa del Mezzogiorno, 4/2, Prog. Spec. per gli schemi idrici nel Mezzogiorno, Idrogeologia dell'Italia centro meridionale, p. 225.
- CNR/PROGETTO FINALIZZATO GEODINAMICA (1985) - *Catalogo dei terremoti italiani dall'anno 1000 al 1980*. Quaderni de "La Ricerca Scientifica", **114**, 2B, 239 pp.
- CORNIELLO A. & DE RISO R. (1986) - *Idrogeologia e Idrochimica delle sorgenti dell'Agro Telesino*. Geol. Appl. e Idrogeol., **21**, 53-84.
- CORNIELLO A. & SANTO A. (1995) - *I dissesti della Basilica Benedettina (XI secolo) di Sant'Angelo in Formis (Capua) ed il complesso assetto geologico dell'area*. Geol. Appl. e Idrog., **30**, 125-137.
- COZZOLINO L., PIANESE N., SANTANGELO N., DI CRESCENZO G. & SANTO A. (2007) - *Sinkhole di origine carsica nell'area dei Monti Lattari*. Atti I Convegno Regionale di Speleologia "Campania Speleologica", 1-3 giugno 2007, Oliveto Citra (SA), Federazione Speleologica Campana ed., 85-101.
- DAVIDE B. (1977) - *Descrizione di un particolare aspetto speleogenetico in calcari mesozoici a forte tettonicizzazione (la grotta nuova di Fellino, 866 Cp)*. Atti del Circolo Culturale "B. G. Duns Scoto" di Roccarainola, dicembre 1977, 33-40.
- DEL PRETE S., DE RISO R. & SANTO A. (2004) - *Primo contributo sui sinkhole di origine naturale in Campania*. Atti Conv. "Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkhole e ruolo delle Amministrazioni statali e locali nel governo del territorio", 20-21 maggio 2004, APAT, Roma, 361-376.
- DEL PRETE S., GIULIVO I. & SANTO A. (2008a) - *Nuove ipotesi sulla formazione dei piping sinkhole in aree alluvionali: il caso della Piana di Forino (Avellino, Campania)*. Il Quaternario, **21**, 395-408.
- DEL PRETE S., GUARINO P.M., NISIO S. & SANTO A. (2008b) - *I sinkhole in Campania*. Mem. Descr. della Carta Geologica d'Italia, LXXXV, 149-211.
- DEL PRETE S., DI CRESCENZO G., SANTANGELO N. & SANTO A. (2010a) - *Karst sinkholes in Campania (southern Italy): geo-structural analysis, predisposing factors and genetic hypothesis*. EGU general Assembly 2008, Zeitschrift für Geomorphologie N.T., **54**, 2, 259-284, Berlin Stuttgart.
- DEL PRETE S., IOVINE G., PARISE M. & SANTO A. (2010b) - *Type and distribution of sinkholes in the plain areas of Southern Italy*. In stampa su Geodinamica Acta, special issue EGU2009 - Vienna, Karst Systems & Karst Hazards.
- GASPARINI P. (1965) - *Contributo allo studio di alcune forme crateriche in prossimità del Monte Massico (Caserta) mediante misure di gravità*. Ann. Oss. Ves, sr. 6, **7**, 23-43.
- GASPARINI P. (1966) - *Indagini gravimetriche su alcune forme crateriche della Campania settentrionale*. Atti Acc. Pontaniana, n. sr., **15**, 53-55.
- GUSSONE G. & TENORE M. (1835) - *Osservazioni fisiche e geognostiche fatte in un viaggio per diversi luoghi delle province di Terra di Lavoro e di Abruzzo nella estate del 1834 (laghetto delle Correie)*. Ann. Civili del Regno delle Due Sicilie, 9 (17), Napoli.
- KLIMCHOUK A. (2007) - *Hypogene speleogenesis*. Nat. Cave & Karst Inst. Sec. Publ. n.1, 108 p.
- NISIO S. (2003) - *I fenomeni di sprofondamento: stato delle conoscenze ed alcuni esempi in Italia centrale*. Italian Journal of Quaternary Sciences, **16**, 1, 121-132.

- NISIO S. & SALVATI R. (2004) - *Fenomeni di sprofondamento catastrofico. Proposta di classificazione applicata alla casistica italiana*. Atti Conv. "Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkhole e ruolo delle Amministrazioni statali e locali nel governo del territorio", 20-21 maggio 2004, APAT, Roma, 573-583.
- NISIO S., GRACIOTTI R. & VITA L. (2004) - *I fenomeni di sinkhole in Italia: terminologia, meccanismi genetici e problematiche aperte*. Atti Conv. "Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkhole e ruolo delle Amministrazioni statali e locali nel governo del territorio", 20-21 maggio 2004, APAT, Roma, 557-571.
- PORFIDO S., ESPOSITO E., VITTORI E., TRANFAGLIA G., MICHETTI A. M., BLUMETTI M., FERRELLI L., GUERRIERI L. & SERVA L. (2002) - *Areal distribution of round effects induced by strong earthquakes in southern Apennines (Italy)*. Survey Geophysics, **23**, 529-562, Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- RICCARDI L. (1927) - *Telesia - Ricordi e Speranze*. Tip. Nazzareno Borrelli, Benevento 1927.
- ROSSI D. (1857) - *Sulle acque minerali di Telese e sullo Stabilimento dei Bagni quivi costruito*. Annali Civili del Regno delle due Sicilie, Napoli, 61 (121), sett/ott 1857.
- RUSSO N., DEL PRETE S., GIULIVO I. & SANTO A., editors (2005) - *Grotte e speleologia della Campania*. Federazione Speleologica Campana, Sellino ed., 624 pp., 1 DVD-Rom, 9 tav. f.t.
- SANTO A. & TUCCIMEI P. (1997) - *Ricostruzione di eventi deformativi di versante tardo-quadernari ed olocenici attraverso studi geomorfologici e datazioni radiometriche Th/U: l'esempio dell'area di Vico Equense (Campania)*. Il Quaternario, **10**, 2, 477-484.
- SANTO A., DEL PRETE S., DI CRESCENZO G. & ROTELLA M. (2007) - *Karst processes and slope instability: some investigations in the carbonate Apennine of Campania (southern Italy)*. Parise & Gunn (eds): Natural and Anthropogenic Hazards in Karst Areas: Recognition, Analysis and Mitigation. Geological Soc. London, Special Pub, **279**, 59-72.
- SCACCHI A. (1885) - *La regione vulcanica fluorifera della Campania*. Atti Acc. Sc. Fis. E Mat., serie 2, 2, Napoli.
- SCHERILLO A. (1965) - *Latino e vulcanologia "... apud agrum calenum flamma eructata ..."*. Atti Acc. Pontaniana, n. sr., **14**, 97-100.
- SCHERILLO A., FRANCO E., DI GIROLAMO P., STANZIONE D. & VALLANTE G. (1965) - *Forme crateriche tra Mondragone e Vairano*. Per. di Min., **34** (2-3), 497-513.
- SCHERILLO A., FRANCO E., DI GIROLAMO P. & STANZIONE D. (1966) - *Guida alle forme crateriche della Campania settentrionale*. Atti Acc. Pontaniana, n. sr., **15**, 49-52.
- SCHERILLO A., FRANCO E., DI GIROLAMO P. & STANZIONE D. (1968) - *Precisazione sulle forme crateriche dell'Agro Falerno*. Atti Acc. Pontaniana, n. sr., **17**, 261-278.
- WALTHAM T., BELL F. & CULSHAW M. (2005) - *Sinkholes and subsidence*. Springer, 382 pp.