

## NUOVE IPOTESI SULLA FORMAZIONE DEI PIPING SINKHOLE IN AREE ALLUVIONALI: IL CASO DELLA PIANA DI FORINO (AVELLINO, CAMPANIA)

Del Prete S.\*, Giulivo I.\*\*, Santo A.\*\*\*

\* Federazione Speleologica Campana

\*\*Geologo Dirigente Ufficio Difesa Suolo Regione Campania

\*\*\*Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Geotecnica ed Ambientale Università di Napoli "Federico II", santo@unina.it

RIASSUNTO: S. Del Prete *et al.*, *Nuove ipotesi sulla formazione dei piping sinkhole in aree alluvionali: il caso della piana di Forino (Avellino, Campania)* (IT ISSN 0394-3356, 2008).

Vengono esposti i risultati di uno studio eseguito nel bacino endoreico di Forino (AV) e proposta una nuova ipotesi sulla genesi di *piping sinkhole* in aree alluvionali.

Lo studio si è avvalso di indagini in sito che hanno permesso di ricostruire la stratigrafia di sottosuolo (primi 50 metri di profondità), caratterizzata dalla presenza di un riempimento alluvionale di natura limoso-sabbiosa, poggiante su di un substrato poco permeabile (Ignimbrite Campana e flysch miocenici). È stata quindi esclusa la presenza di calcari e di vuoti carsici per almeno i primi 50 m di profondità.

Nell'area sono stati censiti 8 sinkhole, alcuni recenti, altri più antichi e ormai completamente riempiti da materiale di riporto. Le perforazioni effettuate in alcuni di essi e l'osservazione diretta dello sprofondamento più recente (12 giugno 2005), hanno evidenziato che i vuoti si sono formati a partire da circa 25 m di profondità e che hanno interessato i terreni sabbioso-limosi alluvionali.

I sinkhole si allineano lungo la direzione di drenaggio preferenziale della falda presente nel corpo alluvionale e sono concentrati alla base del versante settentrionale di M. Romola che costituisce, quindi, il settore della piana più suscettibile a questi fenomeni.

Lo studio ha dimostrato che i vuoti si generano per fenomeni di erosione causati da una circolazione idrica sotterranea, attiva in concomitanza di periodi molto piovosi e caratterizzata, probabilmente, da moti turbolenti. Tale circolazione si instaura al contatto tra il materiale sabbioso-limoso ed i sottostanti strati poco permeabili (Ignimbrite Campana e flysch miocenici). È molto probabile che la circolazione idrica sotterranea sia alimentata anche da falde sospese ed in rete carsica presenti nei massicci carbonatici che circondano la piana.

Per quanto riguarda l'erosione dei notevoli volumi asportati (alcune migliaia di m<sup>3</sup>) è ipotizzabile che essi siano smaltiti da inghiottitoi sepolti, presenti lungo il margine orientale della conca endoreica.

I risultati di questo studio rappresentano un primo importante contributo per successive ricerche mirate all'identificazione di altri vuoti sotterranei che potrebbero essere molto prossimi alla superficie topografica e creare, quindi, situazioni di alto rischio.

ABSTRACT: S. Del Prete *et al.*, *New genetic hypothesis about piping sinkhole formation in alluvial plain: the case study of Forino (Avellino, Campania)* (IT ISSN 0394-3356, 2008).

*This paper deals with sinkholes phenomena occurred in the intramontane basin of Forino village (Campania, Southern Italy). A new genetic hypothesis about piping sinkhole formation in alluvial plain is proposed.*

*Aiming at the definition of the underground stratigraphy, some boreholes have been drilled down to the depth of 50 meters. They showed the presence of an alluvial silty and sandy body laying on a impermeable substratum made up of tuff (Campanian Ignimbrite) and Miocene flysch deposits. Therefore, in the first 50 m of the depth, the presence of calcareous bedrock and caves can be certainly excluded.*

*Eight sinkholes have been observed in the area; some of them are recent, other are older and completely filled in with reworked material. Some of the boreholes were carried out inside and around the more recent sinkhole (12 June 2005) and they showed it had started forming at about 25 m of depth, affecting sandy and silty alluvial deposits.*

*The studied sinkholes are lined up with the flow direction of the groundwater located within the alluvial body at the base of the northern slope of M. Romola. The last one is the sector more susceptible for this phenomena.*

*The collected data suggest that the sinkholes developed because the underground water circulation, probably with turbulent regime, produced erosion phenomena in the sandy-silty alluvial deposits, causing void formation. This circulation is only active during rainy day periods and is located at the contact between the impermeable substratum (top of Campanian Ignimbrite and miocene flysch) and the sandy and silty alluvial deposits. Probably this water table is also fed laterally by groundwater coming from the carbonate massifs surrounding the plain.*

*As far as the problem of volumes removed (some thousands of m<sup>3</sup>) is concerned, the presence of buried ponors, along the eastern edge of the endoreic basin, which can transfer in depth the sandy materials, is hypothesized.*

*The results of this study represents a first step for new researches aimed at recognizing the presence of other underground voids that could be very near to the topographic surface producing high risk situations.*

Parole chiave: sinkhole, suffosione profonda, polje, Campania, Appennino meridionale.

Key words: sinkhole, deep piping, polje, Campania region, southern Apennines

### 1. PREMESSA

A livello mondiale è ormai acquisito che il verificarsi di un improvviso sprofondamento (sinkhole) costituisce un grave problema nella gestione delle infrastrutture presenti sul territorio soprattutto a causa della difficile localizzazione e previsione spazio-temporale del fenomeno. Recentemente anche in Italia la comunità scientifica ha dedicato particolare attenzione allo studio

dei sinkhole, soprattutto dopo alcuni casi che hanno interessato centri abitati; le prime sintesi sono state pubblicate negli atti di alcuni convegni, dedicati a questa tematica (AA.VV., 2000; 2004).

I sinkhole di origine naturale si originano in contesti geologici ed idrogeologici piuttosto complessi; essi si aprono sia in piane alluvionali (*cover collapse sinkhole*, *deep piping sinkhole*, *subsidence sinkhole*) che su massicci carsici (*cover sinkhole*, *collapse sinkhole*, *solu-*

*tion sinkhole, subsidence sinkhole*). Generalmente la loro genesi è legata alla presenza di alcuni fattori predisponenti quali: substrato carsificabile, copertura clastica a granulometria variabile, circolazione idrica sotterranea con falde in pressione, presenza di fluidi mineralizzati, presenza di lineamenti tettonici attivi ed eventi sismici che possono concorrere con vario grado di causalità (SINCLAIR & STEWART, 1985; FACENNA *et al.*, 1993; BERTI *et al.*, 2000; CAPELLI *et al.*, 2000; 2004; CIOTOLI *et al.*, 2001; NISIO, 2003; CLOSSON, 2004; GUTIÉRREZ, 2004; FERRELLI *et al.*, 2004; NISIO *et al.*, 2004; NISIO & SCAPOLA, 2005; WALTHAM *et al.*, 2005).

In Campania sono stati circa 100 sinkhole (DEL PRETE *et al.*, 2004) che interessano diversi contesti geomorfologici e che coinvolgono differenti litologie (Fig. 1).

È stato osservato che i meccanismi d'innesco possono essere molto diversi a seconda dei casi (DEL PRETE *et al.*, 2004; DEL PRETE & SANTO, 2005; COZZOLINO *et al.*, 2007; SANTO *et al.* 2007) e non ancora del tutto chiari soprattutto per quei fenomeni che interessano le aree alluvionali.

In questa nota vengono descritti alcuni fenomeni di piping sinkhole recentemente verificatisi nel bacino alluvionale di Forino (AV). A seguito di alcuni sopralluoghi e di dati forniti dal Comune, si è potuto accertare che l'area è stata interessata più volte in passato da improvvisi sprofondamenti. Visto il crescente sviluppo urbano del centro abitato nella piana e grazie anche ad un finanziamento dell'Ufficio Difesa Suolo della Regione Campania, è stato predisposto un primo programma di

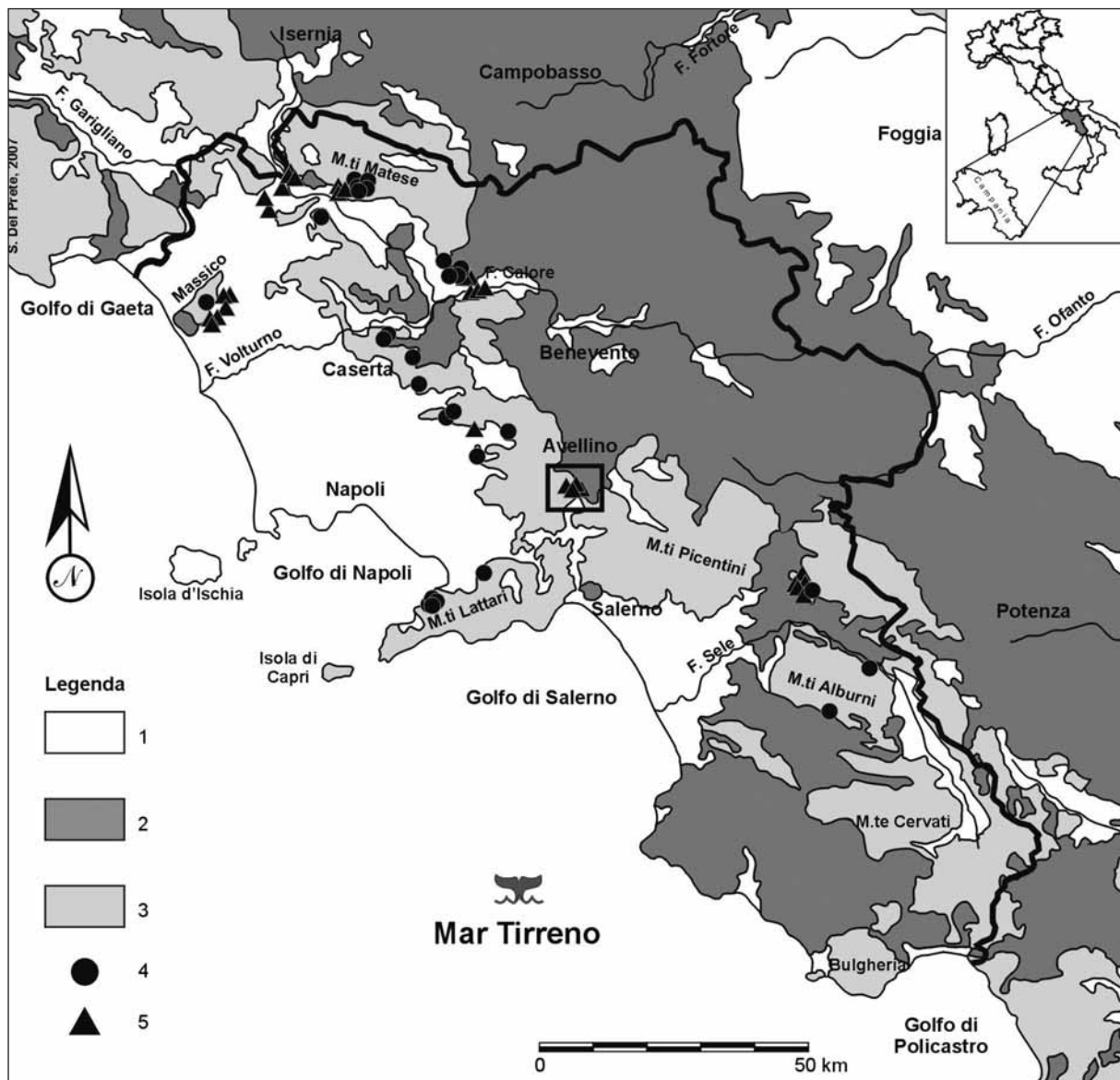


Fig. 1 - Schema geologico della Campania con l'ubicazione delle aree interessate dalla presenza di sinkhole. Legenda: 1) depositi delle piane costiere e delle conche intramontane; rocce vulcaniche s.l. (Quaternario); 2) depositi terrigeni (Mesozoico-Terziario); 3) rocce carbonatiche (Mesozoico-Terziario); 4) sinkhole su versanti carbonatici; 5) sinkhole in aree di piana alluvionale. Il riquadro indica l'area di studio.

Geological sketch map of Campania and location of sinkhole: 1) coastal plain and endoreic basins deposits; volcanic rocks s.l. (Quaternary); 2) flysch deposits (Mesozoic-Tertiary); 3) deposits of carbonatic platform (Mesozoic-Tertiary); 4) sinkhole along carbonate slope; 5) sinkhole in alluvial plain. The square is refer to the area of study.

indagini finalizzato alla comprensione della genesi dei sinkhole. Le prime indagini in sito hanno permesso di giungere ad interessanti considerazioni sulla loro possibile genesi.

## 2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO-GEOMORFOLOGICO ED IDROGEOLOGIA DELLA CONCA DI FORINO

La conca di Forino costituisce un bacino endoreico di circa 10 km<sup>2</sup> ed altitudine media di 400 m s.l.m. localizzato pochi km a sud della città di Avellino tra i

rilievi carbonatici di Pizzo D'Alvano, e dei M.ti Picentini (Fig. 2). La genesi della depressione è associata all'azione di faglie attive durante il Plio-Quaternario che hanno dislocato le dorsali calcaree 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 ad un massimo di poche centinaia di metri (Fig. 3). Il riempimento quaternario è costituito da potenti successioni fluvio-lacustri, per lo più di natura limo-argillosa, che sono ricoperte da tufi dell'Ignimbrite Campana (39.000

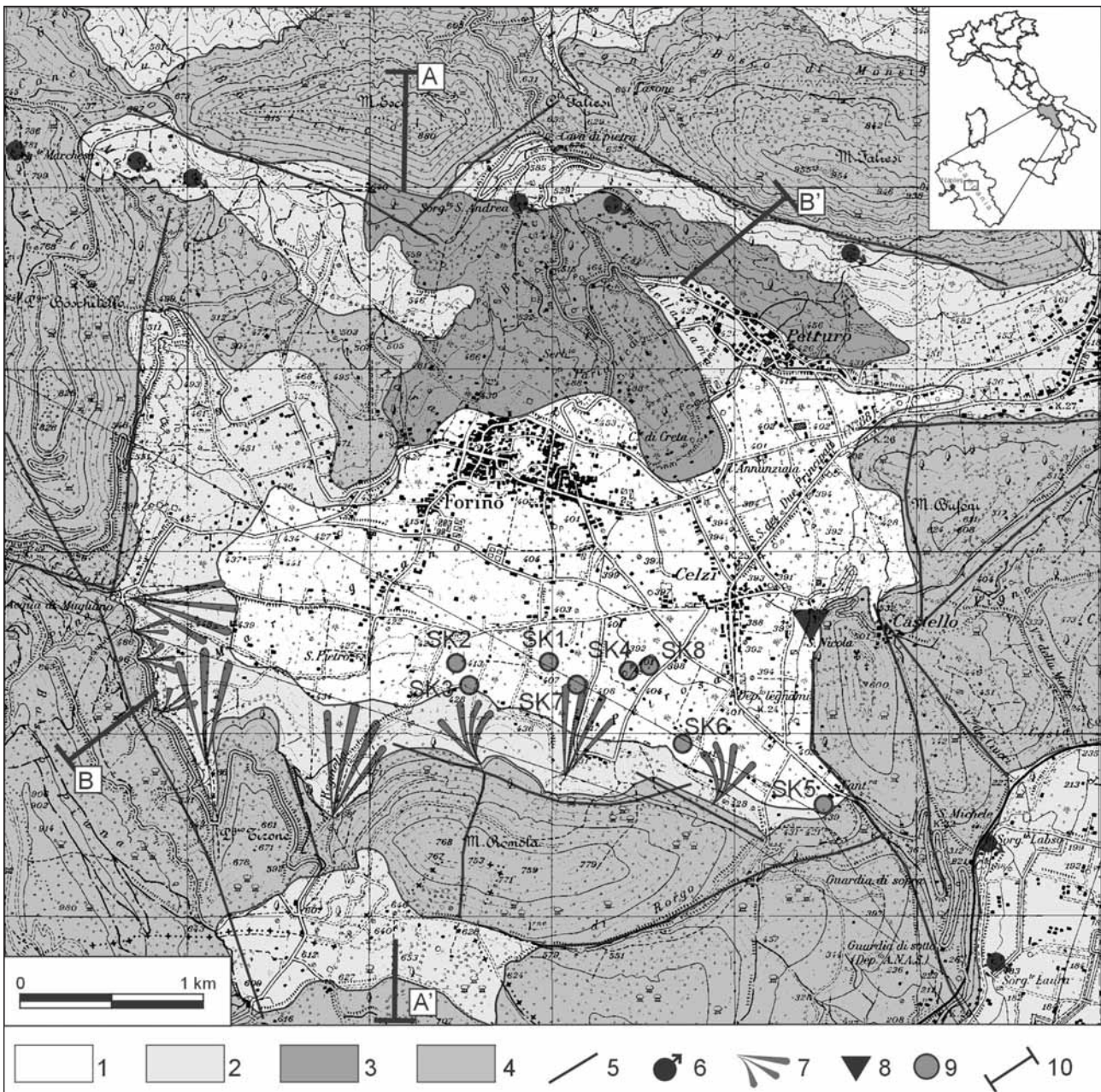


Fig. 2 - Schema geologico della piana di Forino. Legenda: 1) depositi piroclastici rimaneggiati e depositi alluvionali (Pleistocene sup.-Olocene); 2) detrito di versante (Pleistocene sup.-Olocene); 3) depositi in facies di flysch (Miocene); 4) calcari mesozoici; 5) faglia; 6) sorgente; 7) conoide alluvionale; 8) inghiottitoio; 9) sinkhole; 10) traccia di sezione di fig. 3.

Geological map of the Forino plain. Legend: 1) pyroclastic and alluvial deposits (upper Pleistocene-Holocene); 2) detrital talus (upper Pleistocene-Holocene); 3) Miocene flysch; 4) Mesozoic limestones; 5) fault; 6) spring; 7) alluvial fan; 8) ponor; 9) sinkhole; 10) geological cross section of fig. 3.

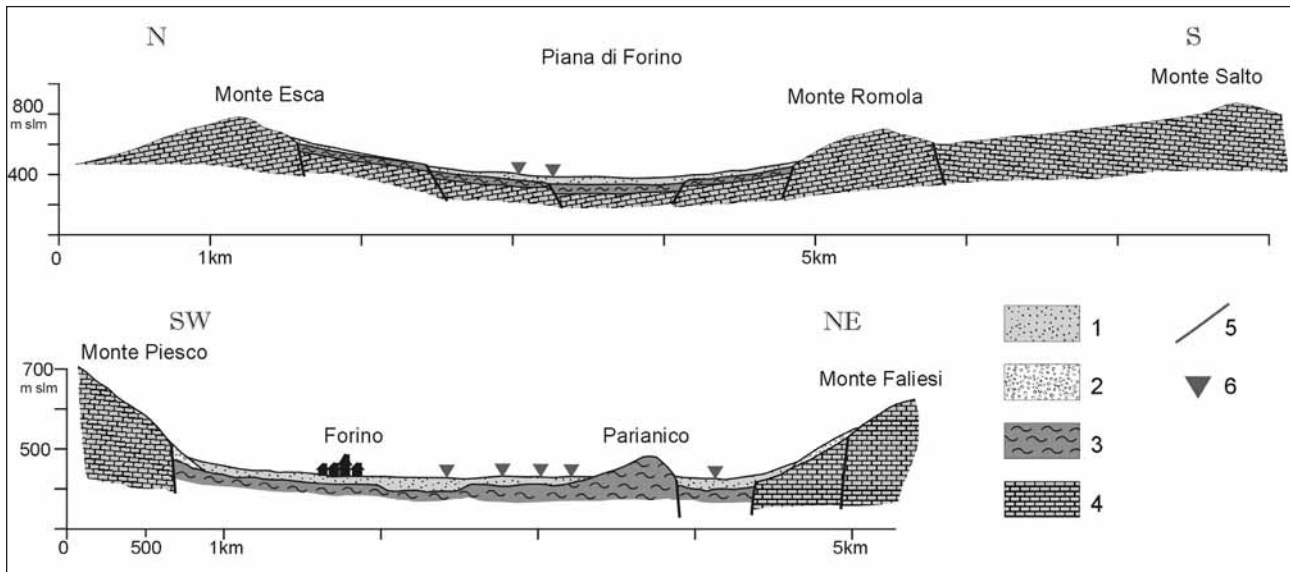


Fig. 3 - Sezioni geologiche del bacino di Forino. 1) depositi piroclastici rimaneggiati e depositi alluvionali (Pleistocene sup.-Olocene); 2) detrito di versante (Pleistocene sup.-Olocene); 3) depositi in facies di flysch (Miocene); 4) calcari mesozoici; 5) faglia; 6) sondaggi (da SANTO *et al.*, 1998 mod.).

Cross section of the Forino plain. Legend: 1) reworked pyroclastic and alluvial deposits (upper Pleistocene-Holocene); 2) detrital talus (upper Pleistocene-Holocene); 3) Miocene flysch; 4) Mesozoic limestones; 5) fault; 6) borehole (from SANTO *et al.*, 1998, mod.).

anni; DE VIVO *et al.*, 2001) e poi da alternanze di limi e sabbie legate a piroclastiti rimaneggiate. Gli ultimi 15÷20 m del riempimento della piana sono costituiti da una maggiore presenza di depositi piroclastici da caduta provenienti dal vicino distretto vulcanico del Somma-Vesuvio.

L'assetto geomorfologico è quello tipico dei bacini endoreici nei quali le acque di ruscellamento superficiale creano frequentemente fenomeni di trasporto solido e alluvionamento favoriti anche dalla notevole estensione di depositi piroclastici sui versanti. In particolare, nel settore meridionale, alla base dei versanti del Monte Romola e del Monte Piesco, aste a regime torrentizio alimentano diversi corpi di conoide (Fig. 2).

Le acque di ruscellamento superficiale una volta raggiunta la piana, sono in gran parte incanalate verso l'inghiottitoio di Celzi (Fig. 2), tuttavia, in concomitanza di intensi eventi meteorici, l'inghiottitoio non riesce a smaltire la totalità delle acque provocando ripetuti fenomeni di ristagno che coinvolgono anche il centro urbano.

Per quanto riguarda l'assetto idrogeologico, la piana di Forino rientra nella più ampia idrostruttura dell'Unità dei Monti di Avella e Partenio, a nord, e di quella del Pizzone-Alvano, a sud (CIVITA *et al.*, 1970; CELICO, 1979) la cui falda di base drena preferenzialmente verso SW in direzione degli importanti gruppi sorgivi di Sarno e Nocera.

SANTO *et al.*, 1998, attraverso il censimento dei pozzi per uso irriguo e con profondità variabile dai 20 ai 50 m, hanno rilevato la presenza di una falda alta in quota localizzata nel riempimento alluvionale della piana con deflusso preferenziale orientato da WNW verso ENE (Fig. 4).

La falda si localizza a circa 370 m s.l.m e cioè circa 30 sotto il piano campagna. Il disegno piezometrico evidenzia un'alimentazione dai vicini massicci carbonatici ed in particolare da quelli localizzati a NW e,

subordinatamente, da quelli presenti a SW della piana (SANTO *et al.*, 1998).

Più in profondità, ad una quota di circa 250 m s.l.m., è presente la falda di base dei calcari il cui recapito è rappresentato dal gruppo sorgivo Laura e Labso (CELICO, 1979).

La conca di Forino, quindi, è caratterizzata dalla presenza di due falde la più alta delle quali si localizza nel corpo alluvionale sabbioso limoso ed è alimentata per travaso dai calcari; la più profonda si imposta nei calcari mesozoici e sarebbe separata dalla prima per l'interposizione di materiali lacustri e dei flysch miocenici.

### 3. I SINKHOLE DELLA PIANA DI FORINO

Il 12 giugno del 2005 alle ore 18.30 in Contrada Petrosa (località Celzi) nel comune di Forino (Avellino) si è aperta improvvisamente una voragine a pochi metri da una strada comunale e da alcune abitazioni rurali.

Lo sprofondamento ha coinvolto terreni prevalentemente di natura limoso-sabbiosa ed ha inghiottito alcuni alberi di nocciolo; al momento della formazione aveva un diametro di circa 12 m e profondità di circa 25 m (Fig. 5).

La zona è stata subito recintata ma nei mesi successivi, a causa di franamenti periodici del ciglio, la voragine si è ampliata fino a raggiungere un diametro di 25 m ed una profondità di circa 12 m nel marzo del 2007 (Fig. 6).

Il primo passo dello studio è stato quello di effettuare un accurato censimento dei sinkhole presenti nella piana; ciò è stato possibile attraverso testimonianze locali ed un'attenta analisi delle morfologie del terreno e della cartografia storica. Nonostante molti di essi siano stati ricolmati ed obliterati, ne sono stati censiti con certezza 8 (Fig. 2), due dei quali si sono verificati

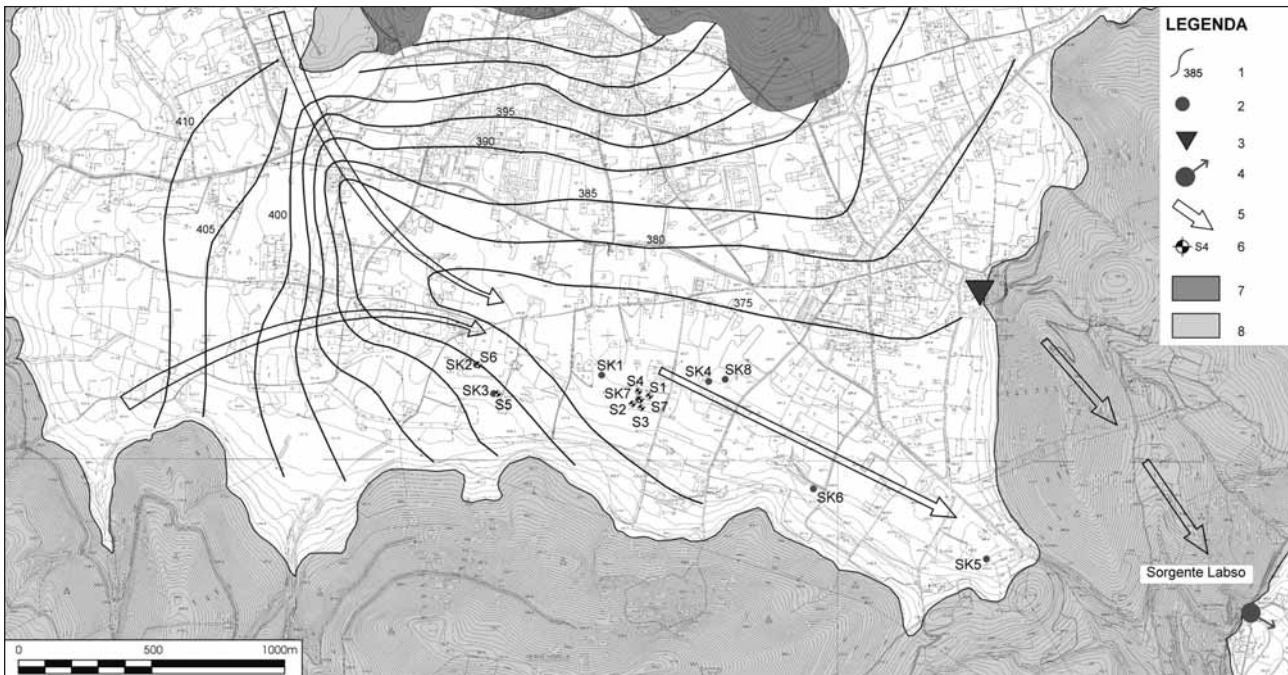


Fig. 4 - Isopiezometriche della falda della piana di Forino (da SANTO *et al.*, 1998 mod.). Legenda: 1) curva isopiezometrica e relativa quota s.l.m.; 2) sinkhole; 3) inghiottitoio; 4) sorgente; 5) direzione di drenaggio sotterraneo; 6) sondaggio; 7) flysch miocenici; 8) calcari mesozoici.

*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.*

nel marzo e nel giugno 2005.

I sinkhole sono ubicati tutti alle falde del rilievo di M. Romola (Fig. 2) e di questi 5 sono ancora ben preservati, mentre gli altri 3 sono appena accennati da blande concavità del terreno.

Tra i sinkhole riportati in Fig. 2, quelli codificati con la sigla SK3, SK4 e SK5 si presentano come depressioni circolari del diametro di 20÷30 m talora bordate da pareti subverticali ancora ben preservate alte fino a 3÷4 m.

Particolarmente interessante sono le evidenze del sinkhole SK5 ubicato nell'estremo settore sud orientale della conca di Forino (Fig. 7). Sul suo fondo sono state osservate chiare evidenze di riattivazioni recenti per la presenza di radici tranciate dai movimenti di subsidenza e, lungo i suoi bordi, sono evidenti fratture concentriche con piccole scarpate che, per richiamo verso il centro, individuano più ordini di superfici terrazzate associate all'ampliamento del sinkhole.

Per alcuni sinkhole la memoria storica è ancora



Fig. 5 - Il sinkhole di Contrada Petrosa pochi giorni dopo la sua formazione (25 giugno 2005; diametro circa 12m e profondità di circa 25m).

*The Contrada Petrosa sinkhole few days later its formation (2005, June 25; diameter 12m; depth 25mt).*

viva nella popolazione più anziana, come dimostra l'attribuzione di toponimi come nel caso della "Fossa Donna Teresa" (cfr SK3 in Fig. 2) che è ubicata al margine di un conoide alluvionale. Secondo alcune fonti locali la sua formazione risalirebbe ad almeno 80 anni fa e sul suo fondo si tramanda della presenza di un piccolo stagno ove i locali si recavano a fare il bagno.

Poche centinaia di metri a nord di questo sinkhole, sono presenti alcune (almeno 3) blande depressioni chiuse. Le fonti locali, tuttavia, tramandano a memoria d'uomo, solo di un fenomeno in località "Fossa di Zarra" (SK2 in Fig. 2). Nella stessa zona, tuttavia, testimonianze locali riportano che durante una trivellazione per ricerca d'acqua alcune aste sono sprofondate e

andate perse per il rinvenimento di un vuoto associato ad una cavità.

Anche in corrispondenza del sinkhole SK1 è ancora riconoscibile una blanda depressione circolare chiusa nel terreno che, secondo fonti locali, sarebbe da riferire al "relitto" di un fenomeno di sprofondamento risalente ad oltre 80 anni fa.

Gli eventi recenti, infine, sono quelli che riguardano il sinkhole SK6, risalente al marzo 2005, e l'SK7 del giugno 2005 in Contrada Petrosa.

Il primo si presenta come una forma avente un diametro di circa 15 m ed una profondità di circa 3 m (Fig. 8). Lungo il bordo sono presenti fratture concentriche, mentre il fondo si presenta molto irregolare con



Fig. 6 - 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 Agnano rimaneggiate in ambiente alluvionale; E) cineriti (limi sabbiosi) pedogenizzate con locali livelli di sabbie fini.

*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 paleosol levels; D) grey pumices and scoria of Agnano eruption reworked in alluvial environment; E) weathered ash levels with thin sandy layers.*



Fig. 7 - Panoramica del sinkhole SK5 ubicato sullo stralcio di Fig. 2. Sono ben evidenti (linea a punti) più ordini di superfici di collasso. *View of sinkhole SK5 (cfr. Fig. 2). It is evident the presence (white dot line) of different collapse surfaces.*



Fig. 8 - Il sinkhole SK6 ( marzo 2005) dopo due anni (marzo2007).  
View of 2005 March sinkhole SK6 two years later (March 2007).

alberi sradicati.

Il fenomeno più recente, invece, si è verificato intorno alle 18.30 del 12 giugno 2005. Esso presentava un diametro circolare iniziale di 12 m ed una profondità di almeno 25 m per un volume complessivo di circa 2500 m<sup>3</sup> (Fig. 5). È da segnalare che al momento dello sprofondamento non si sono avute risalite di acqua, sebbene alcuni testimoni locali, hanno dichiarato di aver sentito passaggio di acqua in profondità.

#### 4. PIANO DI INDAGINI E STRATIGRAFIA DEI SINKHOLE

Per poter comprendere l'assetto geologico stratigrafico di dettaglio dei terreni nel quale si è generato lo sprofondamento di Contrada Petrosa (cfr. SK7), sono state eseguite alcune perforazioni a carotaggio continuo, tutte condizionate a piezometro, al fine di poter monitorare le oscillazioni della falda.

In un primo momento sono stati eseguiti 4 sondaggi lungo il perimetro dello sprofondamento del giugno 2005 (sondaggi S1, S2, S3, S4 in Fig. 9); successivamente, dopo aver riempito il sinkhole con terreno vegetale esso è stato riperforato nel suo centro (sondaggio S7 in Fig. 9). Altri 2 sondaggi sono stati eseguiti all'interno dei sinkhole SK2 e SK3 che risultano ormai quasi completamente interrati.

Di seguito sono riportate le stratigrafie dei sondaggi eseguiti:

Il *Sondaggio S1* è stato eseguito 22 m a NE del sinkhole di Contrada Petrosa ed ha raggiunto una profondità di 38 m. A partire dal piano campagna è stato incontrato uno spessore di circa 10 m di depositi piroclastici da caduta ascrivibili ad eruzioni del Somma

Vesuvio (eruzioni di Mercato risalente a 8000 anni fa, ROLANDI *et al.*, 1993, probabilmente di Agnano risalente a 10.550 anni fa; Di Vito *et al.*, 1999) in alternanza con livelli cineritici pedogenizzati, livelli sabbiosi e paleosuoli che poggiano su circa 12 m di alternanze di piroclastiti rimaneggiate in ambiente alluvionale e di fall pomiceo-cineritici ascrivibili, probabilmente, alle eruzioni di Sarno (17.000 anni fa; ROLANDI, 1997). Nella parte bassa di questo intervallo, tra i 19 e 22 m, sono presenti sabbie alluvionali fini. La prima decina di metri della stratigrafia appena descritta ha trovato anche riscontro con quella affiorante lungo le pareti del sinkhole SK7 (Fig. 6).

Un paleosuolo divide nettamente i depositi alluvionali dalla sottostante Ignimbrite Campana (39.000 anni) che è stata carotata per uno spessore di circa 10m e si presenta lapideo di colore giallo.

Il tufo, infine, poggia su flysch arenacei del substrato miocenico.

Il *Sondaggio S2* è stato eseguito circa 25 m a SW rispetto al centro dello sprofondamento di Contrada Petrosa ed ha raggiunto una profondità di 52 m.

In sintesi la perforazione ha incontrato per i primi 6 m livelli vulcanici cineritici, spesso pedogenizzati ed alternati a livelli pomicei rimaneggiati; a seguire, sino a circa 23 m di profondità, sono state incontrate prevalentemente sabbie e limi sabbiosi di natura piroclastica ma spesso rimaneggiati in ambiente alluvionale. Da 23 m sino a circa 40 m si ritrovano depositi cineritici e tufacei dell'Ignimbrite Campana che poggiano sul substrato arenaceo, carotato per 12 m sino alla profondità di 52 m dal piano campagna.

Il *Sondaggio S3* è ubicato circa 50 m a sud dello sprofondamento di Contrada Petrosa e si è spinto fino alla profondità di 30 m.

Per i primi 18 m sono state incontrate alternanze

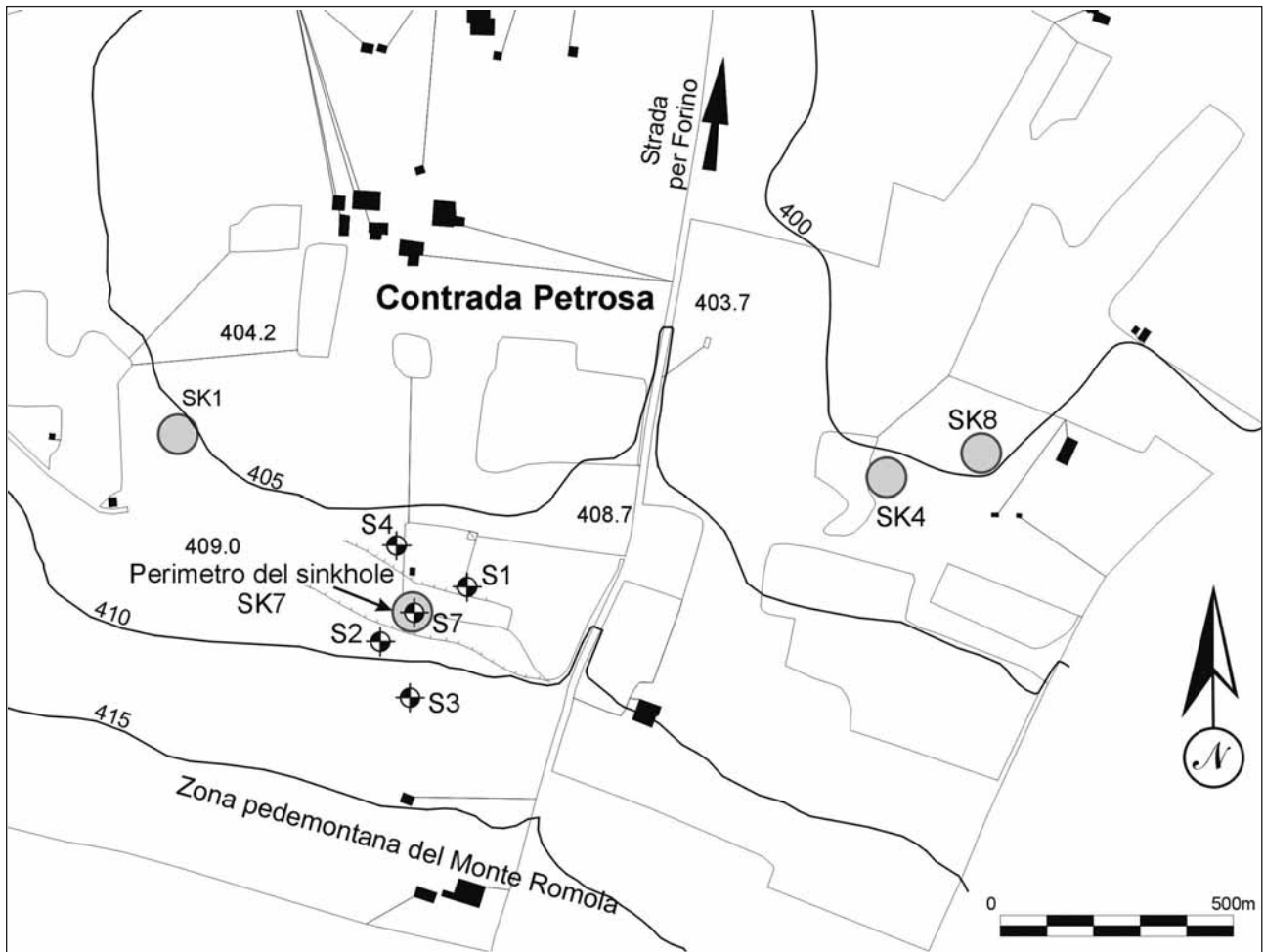


Fig. 9 - Dettaglio topografico dell'area di Contrada Petrosa con l'ubicazione dei sinkhole SK1, SK4, SK7, SK8 e delle perforazioni (S1, S2, S3, S4, S7).

*Contrada Petrosa topographic map with sinkhole (SK1; SK4; SK7 SK8) and borehole (S1, S2; S3, S4 e S7) locations.*

di cineriti pedogenizzate, livelli pomicei e livelli sabbiosi, per lo più riferibili al rimaneggiamento di fall pomicei in ambiente di conoide alluvionale.

Da 18 m a 21 m sono stati carotati i depositi cineritici e tufacei dell'Ignimbrite Campana ed, infine, sino a 30 m il substrato flyschoidale in facies arenacea.

Il *Sondaggio S4* è localizzato circa 35 m a nord dello sprofondamento di Contrada Petrosa ed ha raggiunto la profondità di 25 m.

Per i primi 24 m sono state incontrate alternanze di cineriti pomicee, sabbie e sabbie limose, talora legate a prodotti da caduta in posto, e talora rimaneggiate in ambiente alluvionale.

Tra 24 m e 25 m di profondità è stata rilevata una cinerite in posto contenente molte pomici idiomorfe molto probabilmente da correlare alla parte alta dell'Ignimbrite Campana.

Il *Sondaggio S5* è stato realizzato nella zona centrale del sinkhole SK3 (cfr. Fig. 2) ubicato a circa 500 m ad ovest dallo sprofondamento di Contrada Petrosa ed ha raggiunto i 30 m di profondità.

Dal piano campagna sino a circa 21 m di profondità sono stati riscontrati terreni di riempimento del sinkhole di natura limoso-argillosa privi di strutture sedimentarie e ricchi in frustoli carboniosi.

Da 21 m sino a 30 m sono state riscontrate prevalentemente sabbie piroclastiche rimaneggiate in ambiente di conoide alluvionale.

Il *Sondaggio S6* è stato effettuato al centro del sinkhole SK2 (cfr. Fig. 2) ubicato circa 600 m ad ovest dello sprofondamento di Contrada Petrosa, ed anch'esso è stato spinto fino a 30 m di profondità. Sino a 20 m di profondità sono stati rinvenuti terreni di riporto privi di strutture sedimentarie spesso con notevole presenza di sostanza organica.

Da 20 a 30 m sono stati riscontrati terreni in posto prevalentemente sabbiosi e limoso-sabbiosi legati a depositi piroclastici rimaneggiate in ambiente alluvionale.

Il *Sondaggio S7* è stato eseguito al centro dello sprofondamento di Contrada Petrosa fino ad una profondità di 51 m dopo aver completamente riempito il sinkhole con circa 3000 m<sup>3</sup> di terreno vegetale prelevato da altri scavi realizzati nella piana di Forino. Il sondaggio, per i primi 15 m eseguito a distruzione, dai 15 a 25 m ha incontrato alternanze di sabbie piroclastiche rimaneggiate crollate dalle pareti del sinkhole. Tra 25 e 27 m è stato ritrovato un livello più ricco in sostanza organica nel quale è stato carotato un tronco di nocciolo non carbonizzato a nostro avviso sicuramente legato allo sprofondamento del giugno 2005.



Seguono sino a circa 28,50 altri intervalli cineritici pedogenizzati molto probabilmente ancora legati allo sprofondamento del 12 giugno. Da 28,50 m a 33 m sono state incontrate sabbie e limi sabbiosi in posto di ambiente alluvionale. Da 33 a 50 m è stata perforata l'Ignimbrite Campana che poggia direttamente sul substrato in facies di flysch carotato per circa 1 m.

## 5. INTERPRETAZIONE DEI DATI E IPOTESI GENETICHE DEI SINKHOLE

I sondaggi effettuati sui 4 lati dello sprofondamento di Contrada Petrosa (S1, S2, S3, S4) e quello al centro del sinkhole (S7) insieme ai dati derivanti dalle due perforazioni eseguite in due sinkhole antichi (S5, S6), permettono di proporre un primo chiaro modello stratigrafico del settore del territorio di Forino interessato dagli sprofondamenti e di avanzare alcune preliminari considerazioni sulla loro genesi.

In tutti i sondaggi è stata osservata la presenza per i primi metri di depositi vulcanoclastici da caduta di natura sabbioso-limoso che passano in profondità, sino a circa 25m, a sabbie e limi di ambiente alluvionale.

Nei sondaggi eseguiti in vicinanza dello sprofondamento della Petrosa (Fig. 10) è stata intercettata l'im-

portante eruzione vulcanica dell'Ignimbrite Campana che si presenta con cineriti e tufi lapidei prevalentemente nella facies gialla con spessore variabile da pochi metri a circa 17 m. In 4 di questi sondaggi è stato intercettato anche il substrato pre-quadernario rappresentato da depositi miocenici di natura arenacea. Nessuna delle perforazioni, inoltre, ha intercettato il substrato calcareo.

Nei due sondaggi eseguiti nei sinkhole antichi di Zarra e Donna Teresa (S6 ed S5; cfr. Figg. 2 e 4), sono stati rinvenuti 20 m di terreni di riporto, che poggiano su sabbie e limi alluvionali in posto.

I dati stratigrafici ci permettono quindi di escludere la presenza di un vuoto carsico almeno per i primi 52 m di profondità.

Semberebbe che i vuoti ipogei necessari per giustificare le volumetrie delle voragini, si siano formati nei sedimenti sabbioso-limosi posti al top dell'Ignimbrite Campana come testimoniato anche dal ritrovamento di un tronco di nocciolo durante la perforazione del sondaggio S7 riscontrato a 26 m di profondità e pochi metri al disopra del substrato in posto.

Le sezioni geologiche realizzate nell'area di Contrada Petrosa (Fig. 10), permettono di ricostruire la successione degli eventi sedimentari; esse infatti evidenziano chiaramente (Fig. 10 e 11) un substrato arti-

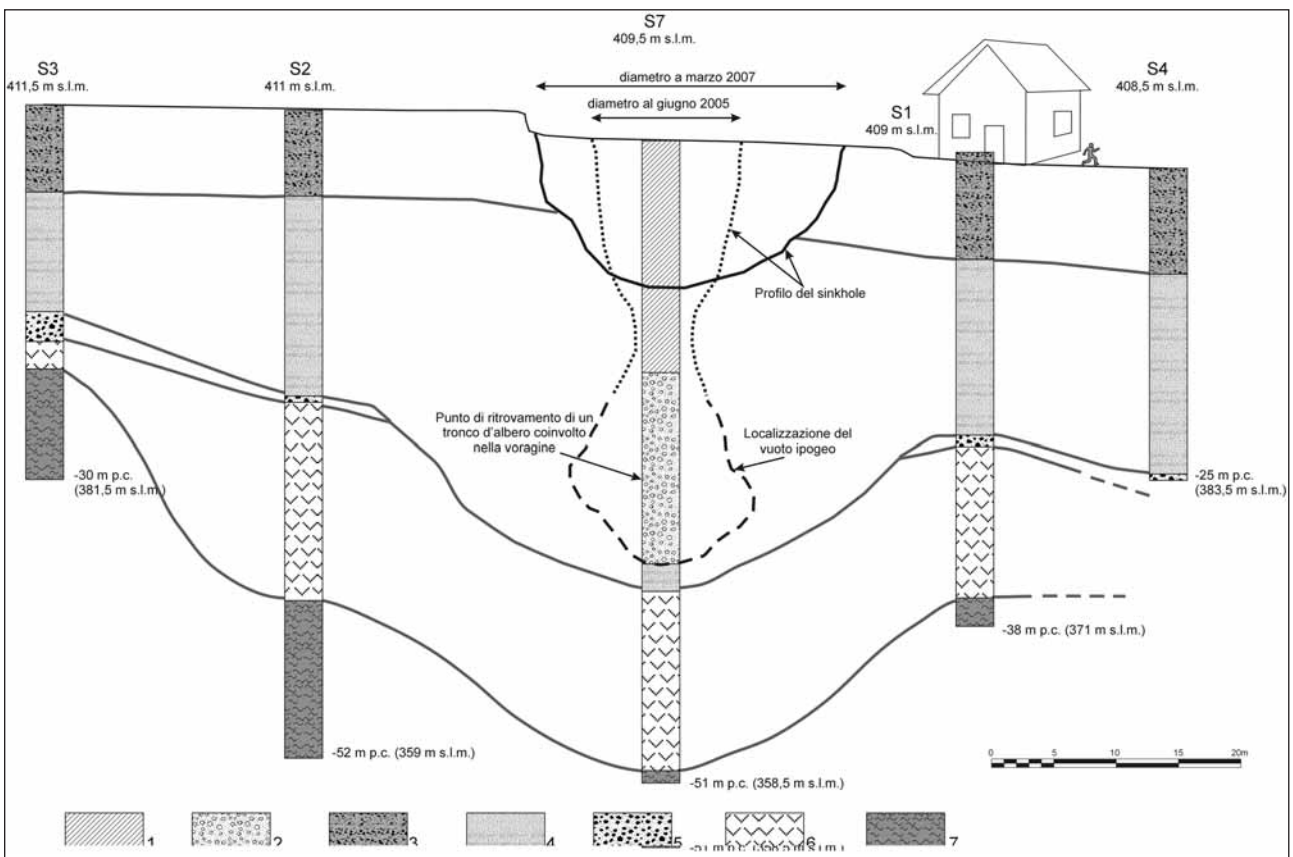


Fig. 10 - Ricostruzione stratigrafica del sito del sinkhole SK7 in Contrada Petrosa. 1) Materiale di riempimento del sinkhole; 2) materiale da crollo del sinkhole; 3) Alternanza di livelli cineritico-pomici rimaneggiati e livelli pomiceo-scoriacei da caduta; 4) piroclastiti sabbioso limose rimaneggiate, alternate a livelli cineritico pomiceo pedogenizzati; 5) cappellaccio dell'Ignimbrite Campana; 6) Ignimbrite Campana; 7) flysch miocenici.

Stratigraphic cross section of SK7 sinkhole at Contrada Petrosa site. 1) sinkhole artificial filling deposits; 2) rock fall deposits; 3) reworked ash and pumice levels alternated with fall deposits; 4) reworked sandy and silty pyroclastic deposits alternated with pumice and ash levels; 5) cap rock of Campanian Ignimbrite; 6) Campanian Ignimbrite; 7) flysch.

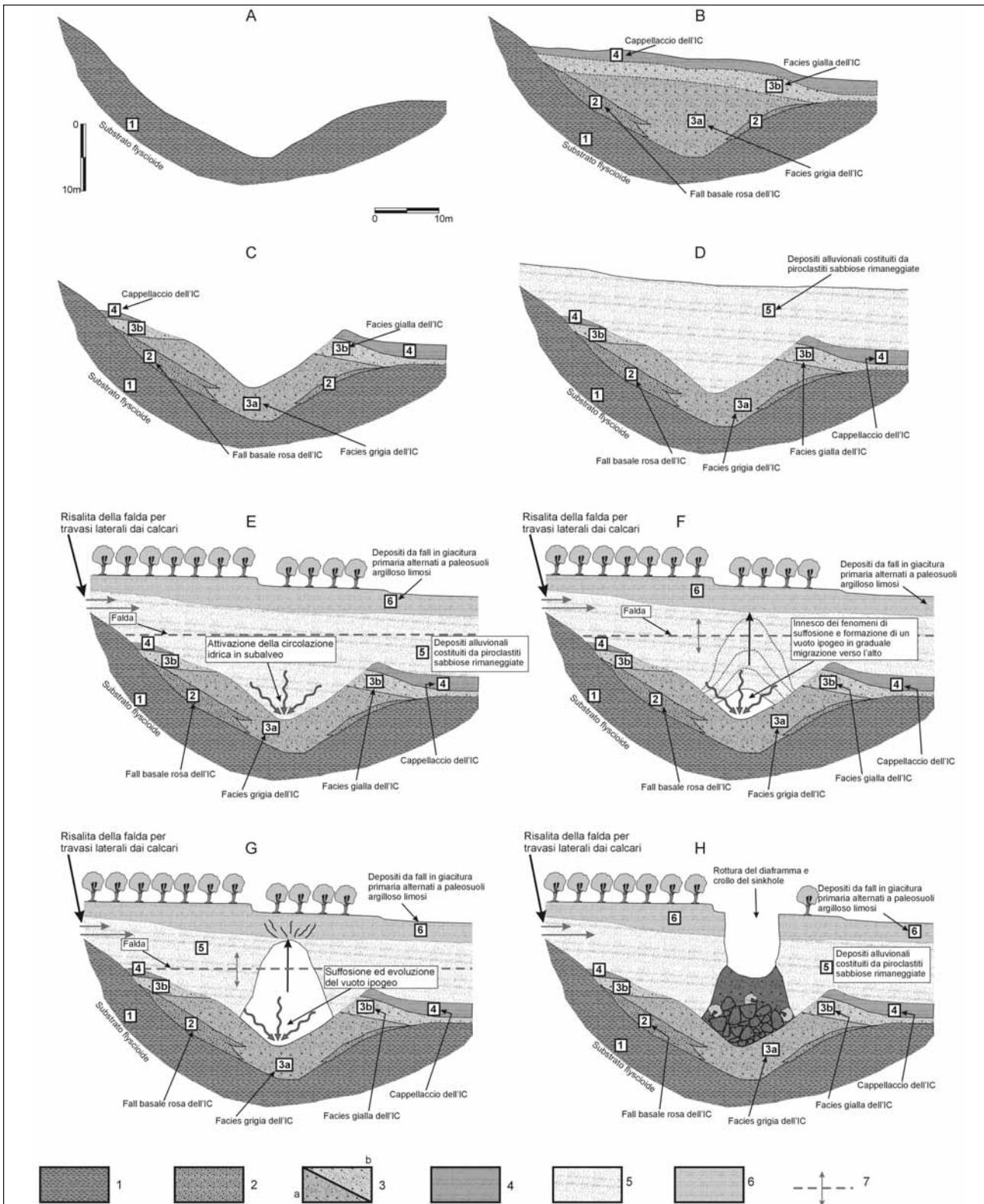


Fig. 11 - Evoluzione geomorfologica del sinkhole SK7 di Contrada Petrosa. A) paleo-incisione nel substrato terrigeno (circa 40.000 anni fa); B) deposizione dell'Ignimbrite Campana (circa 39.000 anni fa); C) erosione dell'Ignimbrite Campana operata dal nuovo reticolo idrografico (circa 20.000 anni fa); D) fase di riempimento della paleo-incisione (tra 20.000 e 10.000 anni fa circa); E) ulteriore fase di aggradazione della piana per caduta di depositi piroclastici che seppellisce definitivamente la paleo-valle. In profondità si creano le condizioni per la circolazione idrica nell'acquifero piroclastico-alluvionale con un deflusso preferenziale che segue la paleo-incisione sepolta (post 10.000 anni fa); F) la circolazione idrica sotterranea innesca un lento processo di erosione sotterranea che porta alla formazione di vuoti; G) la lenta evoluzione del vuoto verso l'alto (H) origina un sinkhole.

*Geomorphological evolution of Contrada Petrosa sinkhole (SK7). A) Paleogully on flysch bedrock (about 40.000 y. b.p.); B) deposition of the Campanian Ignimbrite (about 39.000 y. b.p.); C) erosion of the Campanian Ignimbrite and genesis of a new gully (about 20.000 y. b.p.); D) phase of valley filling (between 20.000 and 10.000 y. b.p.); E) plain aggradation by means of pyroclastic fall deposits. The ancient valley, cut in the Campanian Ignimbrite formation and filled in with reworked pyroclastic deposits, is now definitely buried (post 10.000 y. b.p.); F) groundwater circulation inside the alluvial-pyroclastic aquifer has a flow direction oriented like the buried paleo-gully and causes a slow erosion (suffosion) producing void formations; G) The upward void migration (H) causes the sinkhole.*

colato e caratterizzato dalla presenza di una paleoincisione sepolta impostata nel substrato miocenico (Fig. 11a). Questa vallecchia sarebbe stata ricolmata durante la deposizione dell'Ignimbrite Campana (circa 39.000 anni fa; Fig. 11b) e nuovamente reïncisa dai successivi fenomeni di erosione lineare (Fig. 11c). Questo dato trova conferma nell'assenza, nel sondaggio S7, dei livelli pi alti dell'Ignimbrite Campana (Cappellaccio) presente invece nei settori laterali (sondaggi S1, S2, S3 e S4; cfr. Fig. 10).

Tra 20.000 e 10.000 anni fa si verifica una prima fase di riempimento della paleoincisione per l'apporto di depositi alluvionali nella piana costituiti da piroclastiti rimaneggiate di natura sabbioso-limosa e dilavate dai versanti (eruzione di "Sarno"; Fig. 11d). Pi recentemente, negli ultimi 10.000 anni, si hanno altri apporti di materiali piroclastici, talora in giacitura primaria, di origine flegreo-vesuviana (eruzioni di "Ottaviano-Mercato" e di "Avellino") alternati a paleosuoli e a livelli alluvionali limoso-sabbiosi (Fig. 11e). Contemporaneamente al riempimento della piana, si instaurarono le condizioni per la formazione di una falda superficiale nell'acquifero piroclastico alluvionale alimentata anche da travasi laterali provenienti dai vicini massicci carbonatici. Questa circolazione idrica sotterranea trova nelle paleoincisioni sepolte e colmate da corpi sabbiosi, delle vie preferenziali di deflusso. Essa è particolarmente attiva in concomitanza di inverni molto piovosi, e si instaura nel riempimento alluvionale al contatto con substrato impermeabile (Ignimbrite Campana e flysch miocenici). La direzione di drenaggio è orientata parallelamente al versante di M. Romola da WNW verso ESE come evidenziato in SANTO *et al.*, 1998 (cfr. Fig. 4).

È probabile che in queste condizioni, analogamente a quanto riportato in letteratura per altri contesti (ARKIN & GILAT, 2000), il notevole carico idraulico della falda collegato ad inverni molto piovosi possa creare

locali situazioni di erosione sotterranea (soffusione profonda) nei livelli limoso-sabbiosi (Fig. 11f e 11g). Non è un caso che i sinkhole censiti si allineano nella direzione di drenaggio preferenziale della falda.

A tale proposito durante la campagna di indagini tutte le perforazioni sono state condizionate con piezometro a tubo aperto per la misurazione della falda. Le misure eseguite dal Maggio 2007 a Giugno 2008 non hanno rilevato la presenza della falda nel corpo alluvionale e nel substrato. La presenza di acqua talora rilevata ai piezometri è da imputare a ristagni a fondo foro come evidenziato anche dall'assenza di variazioni significative del livello idrico.

Va ricordato comunque che l'anno 2007 è stato particolarmente siccitoso mentre il livello della falda doveva essere sicuramente pi alto nell'inverno 2004-2005 quando ci si sono avuti gli sprofondamenti.

A tal proposito, in Fig. 12 si riportano le piogge cumulate del periodo della ricarica dell'inverno 2004-2005. Si pu notare come questo periodo risulta eccezionalmente piovoso se confrontato alla media calcolata tra il periodo 1974-2005.

È molto probabile quindi che in concomitanza degli sprofondamenti la falda abbia subito un notevole innalzamento che purtroppo non è stato possibile quantificare per mancanza di indagini e misurazioni nel corso del 2005. Si ricorda comunque che testimonianze di locali riportano di risalite di acqua almeno per i sinkhole pi antichi.

L'assenza della falda fino ad una profondit di oltre 50 m dal p.c. evidenziata dalle ripetute misurazioni ai piezometri (intervallo maggio 2007-giugno 2008) evidenzerebbe comunque l'eccezionalità dell'inverno 2005 nel quale la circolazione idrica sotterranea doveva essere molto pi attiva e sicuramente con una piezometrica pi alta rispetto ai valori normali.

Le prime ipotesi sulla formazione dei sinkhole

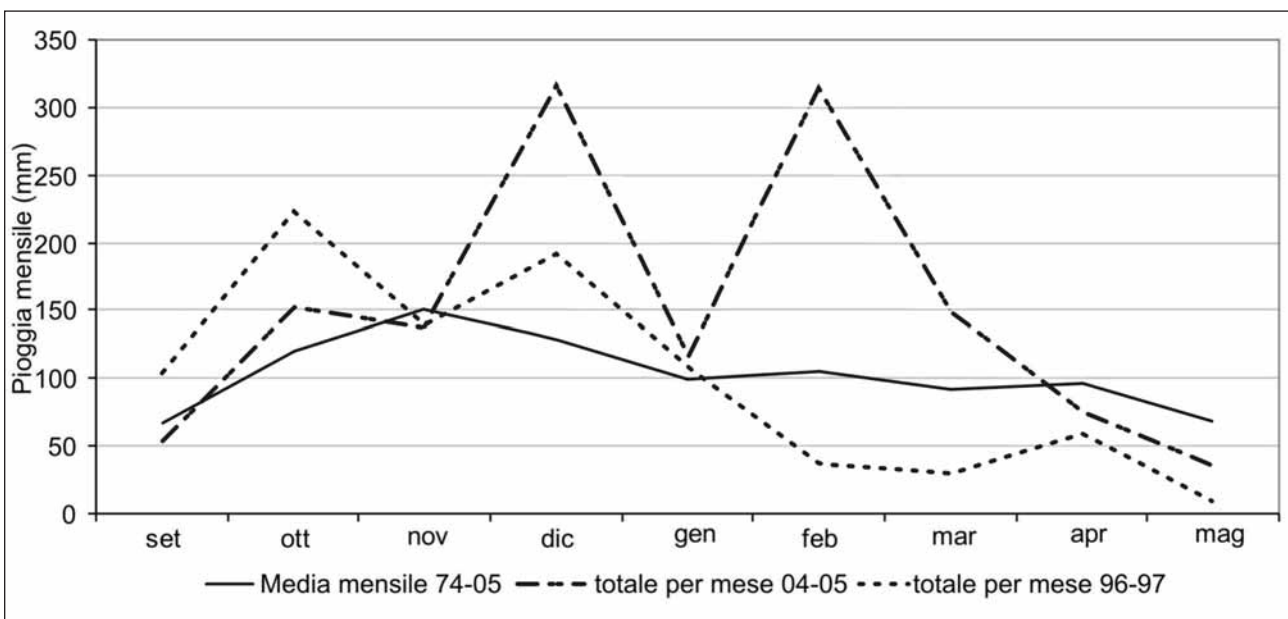


Fig. 12 - Precipitazioni medie mensili per il periodo 1974-2005 confrontate con le precipitazioni totali mensili relative agli anni 1996-1997 e 2004-2005 (stazione pluviometrica del Genio Civile-Avellino; da Di Crescenzo *et al.*, 2008).

Mean monthly rainfall referred to 1974-2005 compared with the total monthly rainfall calculated over the period 1996-1997 and 2004-2005 (Genio Civile-Avellino rain gauges; from Di Crescenzo *et al.*, 2008).

lascerebbero pensare ad una lenta e graduale erosione nel tempo dei livelli sabbiosi per effetto di una circolazione idrica sotterranea caratterizzata da velocità abbastanza sostenuta e, localmente, con moto turbolento, attiva solo in periodi particolarmente piovosi. La lenta e graduale erosione sotterranea del livello sabbioso potrebbe aver creato una protocavità che si sarebbe evoluta sia lateralmente che verso l'alto fino a raggiungere dimensioni tali da non riuscire a sostenere la volta per gli sforzi di taglio indotti dal carico dei terreni sovrastanti che sono così collassati (Fig. 11g e 11h).

Sulla base di questa ipotesi genetica, rimarrebbe tuttavia da chiarire l'eventuale recapito finale del materiale eroso. Una ipotesi, tutta da dimostrare, potrebbe essere quella della presenza di un paleo inghiottitoio sepolto presumibilmente localizzato in corrispondenza del sinkhole SK5 ubicato in prossimità dei calcari del bordo sud orientale della conca endoreica dove già esistono in superficie analoghe morfologie carsiche (Fig. 13). L'inghiottitoio sepolto potrebbe contribuire allo "smaltimento" del carico solido eroso per fenomeni di deep piping nelle aree più a monte.

## 6. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Il problema della genesi dei sinkhole in aree alluvionali è ancora molto discusso. Secondo diversi Autori (THARP, 1997, 1999; NISIO, 2003; NISIO & SALVATI, 2004) i fenomeni di piping sinkhole, in aree alluvionali sarebbero generalmente da ricondurre alla presenza di cavità in rocce solubili all'interno di un substrato carsificabile che richiamerebbe il materiale di copertura fino ad avere un collasso improvviso in superficie. Il "motore" di questo processo viene spesso individuato nell'azione di flussi verticali risalenti lungo zone fratturate o piani di faglia.

Altri Autori, invece, pongono modelli diversi che escludono la presenza di un substrato carsificabile (HOFFMAN *et al.*, 1998; ARKIN & GILAT, 2000; TOMLINSON & VAID, 2000) dimostrando che i vuoti responsabili del col-

lasso si possono formare anche in terreni granulari per fenomeni di suffosione profonda. Tale processo consiste nell'erosione meccanica di un terreno poroso per effetto dello scorrimento (subsuperficiale secondo la definizione originaria di Castiglioni, 1986) dell'acqua in pressione che trova delle vie di scorrimento in cui passare con elevata velocità e moto turbolento. Questo passaggio, provocando l'erosione del terreno, dà origine a canalicoli a sviluppo sub-orizzontale, condotti tubolari o cavità lungo le linee di flusso.

Analoghi fenomeni sono segnalati anche lungo il perimetro del Mar Morto e nella piana del fiume Santa Cruz a Tucson in Arizona (HOFFMAN *et al.*, 1998; ARKIN & GILAT, 2000) dove la variazione da flussi laminari a turbolenti in zone discrete lungo il percorso delle linee di flusso in subalveo, causa il dilavamento dei materiali a granulometria sottile e la formazione di vuoti sotterranei.

Nel caso dei sinkhole di Forino le indagini svolte confermano che i vuoti responsabili dei collassi si sono formati nei depositi di copertura limo-sabbiosi per fenomeni di suffosione profonda a profondità variabili tra i 20 ed i 25m ed in assenza di un bedrock carsificabile.

I vuoti si creerebbero lentamente a causa dell'erosione meccanica operata da flussi turbolenti che asporterebbero i terreni a granulometria più sottile in particolari condizioni di notevole ricarica della falda. Il fenomeno si instaura all'interfaccia tra terreni meno permeabili (flysch e tufi) ed i soprastanti terreni alluvionali sabbioso-limosi (Fig. 13). Successivamente il vuoto migrirebbe lentamente verso l'alto fino ad intercettare la superficie topografica e generare il collasso finale (Fig. 11 e 13).

Si esclude quindi l'ipotesi della presenza e dell'influenza di eventuali cavità nel substrato carbonatico e anche quella di flussi profondi risalenti lungo faglie di cui, peraltro, non c'è nessuna evidenza superficiale.

Il contributo dei calcari e del carsismo in generale, sarebbe fondamentale invece per la veloce ricarica e l'aumento del carico idraulico nella falda multistrato dell'acquifero alluvionale (Fig. 13).

Il substrato carsificato, inoltre, potrebbe spiegare

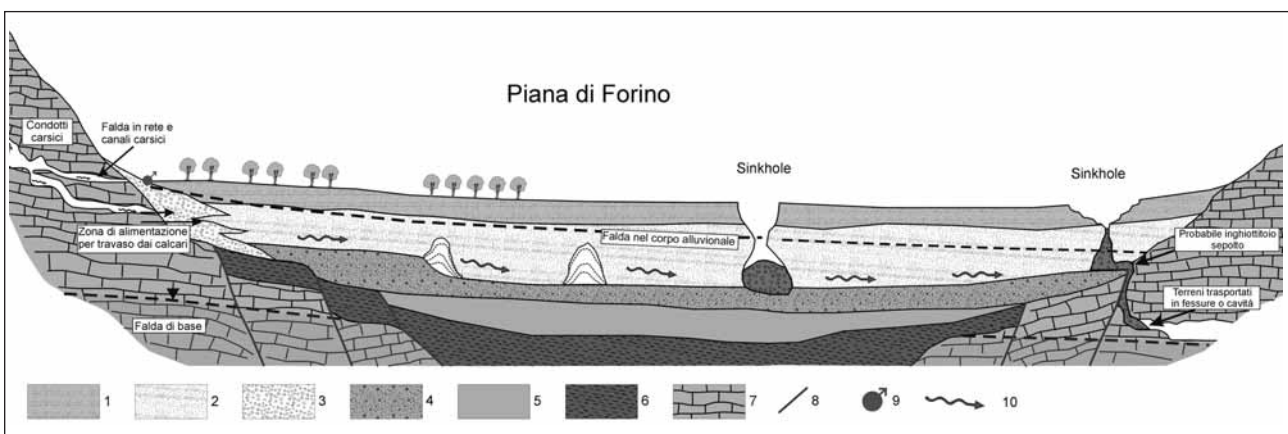


Fig. 13 - Rappresentazione schematica della formazione dei sinkhole nella piana di Forino. 1) Depositi piroclastici da fall alternati a paleosuoli e livelli alluvionali; 2) piroclastiti rimaneggiate in ambiente alluvionale; 3) Ignimbrite Campana; 4) detritico di versante; 5) depositi limoso-sabbiosi pre-Ignimbrite Campana; 6) flysch miocenici; 7) substrato carbonatico mesozoico; 8) faglia; 9) sorgente; 10) circolazione idrica sotterranea nell'acquifero alluvionale.

*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) spring; 10) underground water circulation inside alluvial aquifer.*

la scomparsa dei notevoli volumi di terreni asportati (poche migliaia di m<sup>3</sup>). Infatti, lungo il bordo sud orientale della conca e laddove i calcari vengono a contatto diretto con l'acquifero piroclastico alluvionale, si potrebbe avere lo smaltimento di parte delle acque dell'acquifero alluvionale e del trasporto solido verso la falda profonda attraverso inghiottitoi sepolti (Fig. 13).

Per quanto detto precedentemente non si esclude che nel sottosuolo della piana di Forino siano presenti altri vuoti, non ancora noti perché profondi o perché non hanno ancora raggiunto la superficie topografica.

In prima approssimazione, sulla scorta del censimento dei sinkhole effettuato e dell'assetto stratigrafico ed idrogeologico della piana di Forino, la fascia di territorio che è da ritenere più suscettibile all'innescò di nuovi sprofondamenti si allinea in corrispondenza della zona di drenaggio preferenziale della falda dell'acquifero piroclastico alluvionale.

Tuttavia una zonazione più precisa su un territorio così vasto non potrà che essere realizzata a valle di ulteriori indagini e soprattutto attraverso la definizione dello schema idrogeologico locale ed il monitoraggio della falda nell'acquifero alluvionale.

È da sottolineare, infine, che il modello qui proposto rappresenta solo uno dei possibili meccanismi di innescò di sinkhole in aree alluvionali, in altri contesti ed in condizioni stratigrafiche ed idrogeologiche diverse non si escludono effetti della carsificazione in rocce solubili e, soprattutto, fenomeni di improvvisa liquefazione di corpi limoso-sabbiosi saturi il cui studio non può prescindere da un approccio anche di tipo geotecnico.

## BIBLIOGRAFIA

- AA.VV. (2000) - *Le voragini catastrofiche - un nuovo problema per la Toscana*. Atti del Convegno organizzato dalla Regione Toscana, Provincia e Comune di Grosseto, Grosseto, 31 marzo 2000, 256 pp.
- AA.VV. (2004) - *Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio*. Atti del Convegno organizzato dall'APAT, Roma, 20-21 maggio 2004, 709 pp.
- ARKIN Y., GILAT A. (2000) - *Dead Sea sinkholes - an ever-developing hazard*. *Environmental Geology*, **39** (7), pp. 711-722.
- BERTI G., CANUTI P., CASAGLI N., PRANZINI G., MICHELI L. (2000) - *Risultati preliminari delle indagini sullo sprofondamento in loc. Bottegone (Grosseto)*. Atti del Convegno "Le voragini catastrofiche - un nuovo problema per la Toscana", 31 marzo 2000, Regione Toscana, Provincia e Comune di Grosseto, Grosseto, pp. 242-256.
- CAPELLI G., PETITTA M., SALVATI R. (2000) - *Relationships between catastrophic subsidence hazards and groundwater in the Velino Valley (Central Italy)*. Proc. VI Int. Symp. on Land Subsidence SISOLS 2000, RAVENNA, ITALY, PP. 123-136.
- CAPELLI G., DELITALA M. C., PRIMAVERA P., SALVATI R., TADDEUCCI A., TUCCIMEI P. (2004) - *Lo studio degli "Spring-sinkhole" del gruppo dei laghi del Vescovo (Pianura Pontina) attraverso l'uso del "Radon budget"*. 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, pp. 189-199.
- CASTIGLIONI G.B. (1986) - *Geomorfologia*. UTET, 436 pp.
- CELICO P. (1979) - *Schema idrogeologico dell'Appennino carbonatico centro-meridionale*. Mem. e Note Ist. di Geol. Appl. Univ. di Napoli, **14**, 1978-1979, 97 pp.
- CIOTOLI G., DI FILIPPO M., NISIO S., ROMAGNOLI C. (2001) - *La Piana di S. Vittorino: dati preliminari sugli studi geologici, strutturali, geomorfologici, geofisici e biochimici* Mem. Soc. Geol. It, **56**, pp. 297-308.
- CIVITA M., DE RISO R., NICOTERA P. (1970) - *Sulla struttura idrogeologica alimentante le sorgenti del Fiume Sarno e le falde pedemontane profonde della parte sud-orientale della Conca Campana*. Conv. Int. sulle Acque Sotterranee, Palermo, 6-8 dicembre 1970, 24 pp.
- CLOSSON D. (2004) - *Structural control of sinkholes and subsidence hazards along the Jordanian Dead Sea coast*. *Environmental Geology*, **47**, pp. 290-301.
- COZZOLINO L., PIANESE N., SANTANGELO N., SANTO A. (2007) - *Sinkhole di origine carsica nell'area dei Monti Lattari*. Atti I Conv. Regionale di Speleologia "Campania Speleologica", 1-3 giugno 2007, Oliveto Citra (SA), Federazione Speleologica Campana, pp. 85-101.
- DE VIVO B., ROLANDI G., GANS P. B., CALVERT A., BOHRSON W. A., SPERA F. J., BELKIN H. E. (2001) - *New constraints on the pyroclastic eruptive history of Campanian volcanic Plain (Italy)*. *Mineralogy and Petrology*, **73**, pp. 47-65.
- DI CRESCENZO G., ROTELLA M., SANTO A. (2007) - *Le frane da scorrimento-colata rapida in terreni piroclastici dei contesti in flysch dell'entroterra campano*. Convegno dei giovani Ricercatori di Geologia Applicata. *Giornale di Geologia Applicata, Rivista AIGA*, in stampa.
- DI VITO M.A., ISAIA R., ORSI G., SOUTHON J., DE VITA S., D'ANTONIO M., PAPPALARDO L., PIOCHI M. (1999) - *Volcanism and deformation since 12,000 years at the Campi Flegrei caldera (Italy)*. In: Orsi G., Civetta L., Valentie G. A., (Eds.), *Volcanism in the Campi Flegrei*. *Jour. of Volc and Geoth Res*, **91**, pp. 221-246.
- 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, pp. 361-376.
- DEL PRETE S., SANTO A. (2005) - *I sinkhole di origine carsica in Campania*. In Russo N., Del Prete S., Giulivo I., Santo A. editors: *Grotte e speleologia della Campania*. Sellino ed., pp. 36-37.
- FACENNA C., FLORINDO F., FUNICELLO R., LOMBARDI S. (1993) - *Tectonic setting and sinkhole features: case histories from western central Italy*. *Quaternary Proceeding*, **3**, pp. 47-56.
- FERRELLI L., GUERRIERI L., NISIO S., VITA L., VITTORI E. (2004) - *Relations among seismogenetic structures, earthquakes and sinkhole phenomena: a*

- methodological approach in the Appennines (Italy)*. 32 Int. Geol. Congr., Firenze 20-28 Agosto 2004.
- GUTIÉRREZ F. (2004) - *El riesgo de dolinas de subsidencia en terrenos evaporíticos. Investigación y mitigación*. 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, pp. 453-466.
- HOFFMAN J.P., POOL D.R., KOWIECZKI A.D., CARPENTER M.C. (1998) - *Causes of sinks near Tucson Arizona, USA*. Hydro Jour., 6, pp. 349-364.
- NISIO S. (2003) - *I fenomeni di sprofondamento: stato delle conoscenze ed alcuni esempi in Italia centrale*. Il Quaternario, 16 (1), pp. 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, pp. 573-583.
- NISIO S., SCAPOLA F. (2005) - *Individuazione di aree a rischio sinkhole: nuovi casi di studio nel Lazio meridionale*. Il Quaternario, 18 (2), pp. 223-239.
- 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, pp. 557-571.
- ROLANDI G., MARAFFI S., PETROSINO P. & LIRER L. (1993) - *The Ottaviano eruption of Somma-Vesuvius (8000 y b.p.): a magmatic alternating fall and flow-forming eruption*. Journ. Volcan. and Geoth. Reser., 58, 43-65.
- ROLANDI G. (1997) - *The eruptive history of Somma-Vesuvius volcanism and Archeology in mediterranean area*. Ed. De Vivo & Cortini.
- SANTO A., LIGUORI M., AQUINO S., GALASSO M. (1998) - *Problemi di geologia ambientale nei polje appenninici: l'esempio della Piana di Forino (Campania)*. Il Quaternario, 11(2), pp. 233-245.
- 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)*. General Assembly of European Geosciences Assembly, Vienna 24-29 aprile 2005, Geological Society, London, Special Publications from Parise, M. & Gunn, J. (eds) Natural and Anthropogenic Hazards in Karst: Recognition, Analysis and Mitigation, 279, pp. 59-72.
- SINCLAIR W.C., STEWART J.W. (1985) - *Sinkhole type, development and distribution in Florida*. US Geological Survey, Florida Department of Natural Resources, Bureau of Geology Map Series, MS-110, 1 plate.
- THARP T.M. (1997) - *Mechanism of formation of cover collapse sinkhole*. Proc. 6<sup>th</sup> Multidisciplinary conference of sinkhole and the engineering and Environmental Impact of Karst, pp. 29-36, Balkema, Rotterdam
- THARP T.M. (1999) - *Mechanism of upward propagation of cover collapse sinkhole*. Engineering Geology, 52, pp. 23-33.
- TOMLINSON S.S., VAID Y.P. (2000) - *Seepage forces and confining pressure effects on piping erosion*. Canadian Geotechnical Jour., 37, pp. 1-13.
- WALTHAM T., BELL F., CULSHAW M. (2005) - *Sinkholes and subsidence*. Springer, 382 pp.

Ms. ricevuto il 12 marzo 2008  
 Testo definitivo ricevuto il 17 giugno 2008

Ms. received: March 12, 2008  
 Final text received: June 17, 2008