

## I FENOMENI DI SPROFONDAMENTO: STATO DELLE CONOSCENZE ED ALCUNI ESEMPI IN ITALIA CENTRALE

Stefania Nisio

Dipartimento dei Servizi tecnici Nazionali - Servizio Geologico Nazionale - V. Curtatone, 3 00185 Roma

### RIASSUNTO

Nella letteratura nazionale ed internazionale sono stati da tempo codificati numerosi termini per indicare i vari tipi di cavità che si aprono nel terreno, attualmente però viene sempre più spesso utilizzato il termine *sinkhole* per definire queste forme, spesso omologhe, ma sviluppatasi attraverso processi genetici differenti. Così tale termine risulta piuttosto semplificato e generico.

Questo lavoro si propone perciò di riesaminare la terminologia con la quale sono state indicate le varie forme in relazione alla loro genesi e di proporre una definizione più precisa del termine *sinkhole*.

Nella letteratura italiana per indicare i vari tipi di cavità subcircolari furono introdotti sin dai tempi più antichi i termini di *dolina* (geneticamente distinta in diversi tipi), *spfondamento* e *camino di collasso*.

Nel primo caso il processo morfogenetico si sviluppa in rocce solubili per dissoluzione attraverso l'infiltrazione d'acqua di ruscellamento.

Nel secondo caso i fattori predisponenti sono la gravità e l'antropizzazione, nel terzo invece i fattori principali dell'evoluzione di tali forme, oltre alla dissoluzione sono costituiti dalla risalita di fluidi aggressivi e dai fenomeni di aumento e di diminuzione di pressione indotti dalle oscillazioni della tavola d'acqua al di sotto del piano campagna.

Anche nella letteratura anglosassone per le cavità carsiche era utilizzato il termine *doline* (suddiviso poi in vari tipi) equivalente alla dolina della letteratura italiana; in seguito esso è stato quasi del tutto sostituito dal termine *sinkhole*. Quest'ultimo è stato utilizzato la prima volta per indicare depressioni subcircolari dovute al crollo di piccole cavità carsiche, sinonimo quindi di dolina, successivamente è stato adottato per indicare gli sprofondamenti di qualsiasi genere.

Prendendo in considerazione i meccanismi genetici che favoriscono lo sviluppo degli sprofondamenti s.l. il termine *sinkhole* in senso stretto dovrebbe essere adottato soltanto per quelle forme in cui il processo genetico principale è la risalita dei fluidi dal basso, attraverso reticoli di fratture che mettono in comunicazione un substrato carsificato con i sedimenti superficiali, con conseguenti fenomeni di *piping* o *suffosione*. Esso sarebbe pertanto sinonimo dei termini *camino di collasso* o *voragine di terra* della letteratura italiana e di *piping sinkhole* della letteratura anglosassone.

I casi di *sinkhole* in Italia risultano concentrati nelle piane alluvionali, nelle immediate vicinanze di dorsali carbonatiche, in contesti geologico-strutturali ed idrogeologici complessi innescati da cause di diversa natura (sismi, siccità, alluvioni, emungimenti di acque etc.). La presenza di un pacco di sedimenti impermeabili o semi-permeabili, al tetto di un substrato carbonatico carsificato, un reticolo di faglie e diaclasi che mettano in comunicazione i due mezzi, sono fattori predisponenti essenziali. Inoltre la presenza di fluidi liquidi e gassosi nel sottosuolo, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S, che consentano la dissoluzione e di conseguenza il sifonamento dei materiali di copertura è stata riscontrata nella maggioranza dei casi.

### ABSTRACT

*Technical literature offers a lot of terms to indicate different types of geological cavities, but recently the term sinkhole seems to be commonly adopted to indicate underground cavities which are similar in their features but have different morphogenetic origins. That is why the term sinkhole appears to be rather generic or inadequate.*

*The aim of this work, therefore, is to propose a new terminology for every kind of cavity and to associate a more rigorous definition to each of them, according to their different morphological genesis.*

*In the Italian traditional literature the terms "dolina" (divided in various types), "spfondamento" and "camino di collasso" were adopted to indicate different kinds of sub-circular collapses.*

*According to the first term the soil dissolution is caused by the infiltration of water in soluble rocks; according to the second one gravity and anthropization are the main factors causing these collapses and according to the last one, above the soil dissolution, the predisposing factor is the pressure of the water coming back to the plane surface level.*

*In the English literature the term doline (still divided in several types) was originally adopted to indicate karst caves as an equivalent of the Italian word "dolina" but it was later replaced by the term sinkhole. At first this term simply indicated sub-circular depressions due to the landslide of small karst caves, but actually it is adopted to indicate every kind of cavity.*

*Taking into account the processes that cause the development of a sinkhole, the use of this term seems only suitable to indicate cavities caused by a piping process ("suffosione" in Italian) and therefore it should be a synonymous of the Italian term "camino di collasso" (known as piping sinkhole in the English literature).*

*The sinkholes in Italy are concentrated in alluvial flats, near carbonatic ridges, in some structural and hydrogeological contexts which were originated by different causes (earthquakes, dryness, alluviums, water wells etc.).*

*Impermeable sediments laid on the top of karst carbonatic bedrocks, faults and fractures between the two layers, are the main predisposing factors.*

*Moreover, the presence of water and gases, such as CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S, concurring to the dissolution and the piping processes, has been detected in almost all the circumstances.*

Parole chiave: Sinkhole, sprofondamenti, suffosione.

Keywords: Sinkhole, sinking, piping

## INTRODUZIONE

I fenomeni di *spfondamento* sono riconosciuti in diverse parti del mondo. Negli Stati Uniti (California, Florida) tali fenomeni sono particolarmente diffusi e costituiscono una delle maggiori calamità naturali scarsamente prevedibili e dalle quali non è facile difendersi (Sinclair & Steward, 1985; Newton, 1987; Wilson & Shock, 1996). In Florida il fenomeno è talmente frequente che il Servizio Geologico Nazionale ha predisposto siti internet, destinati alla popolazione, per denunciare in tempi reali il verificarsi di sprofondamenti tipo *sinkhole*.

Le cause naturali sono generalmente preponderanti mentre le cause antropiche sono concause o accessorie anche se nell'ultimo ventennio si è registrato un aumento dei casi in tutto il mondo in seguito probabilmente proprio all'espansione urbanistica (Sinclair, 1982; Newton, 1987; Tihansky & Galloway, 2000).

## I FENOMENI DI SPROFONDAMENTO

Recentemente per indicare gli sprofondamenti di qualsiasi genere viene utilizzato, da esperti del settore e non, il termine *sinkhole*, che ha quasi del tutto sostituito altri termini più specifici, generando una notevole confusione terminologica.

Un uso più corretto del termine *sinkhole* permetterà di individuare meglio il tipo di sprofondamento cui si vuole riferire.

Il termine *sinkhole* (che tradotto letteralmente significa "pozzo di scarico", "buco di scolo") è stato introdotto per la prima volta da Fairbridge (1968) e successivamente da Monroe (1970) per indicare una depressione di forma sub-circolare dovuta al crollo di piccole cavità carsiche sotterranee. Infatti alcuni Autori, Monroe (1970), Jennings (1985), White (1988), ed altri distinguono fenomeni di *solution sinkhole*, *collapse sinkhole* e *subsidence sinkhole* (coincidenti con i termini di *solution doline*, *collapse doline*, *subsidence doline* introdotti da Cramer, 1941 e successivamente utilizzati da Castiglioni nel 1986 in Italia e da molti altri Autori), pertanto il termine *sinkhole* sarebbe sinonimo di dolina.

Attualmente negli Stati Uniti e in Gran Bretagna il termine *sinkhole* viene usato frequentemente e definisce una qualunque cavità nel terreno di forma sub-circolare originatasi per motivi diversi.

Beck, (1984), Beck & Wilson, (1987), Berti *et al.*, (2002 a) utilizzano tale termine per indicare anche cavità, di forma non necessariamente sub-circolare, apertesi nel terreno per cause antropiche.

Anche in Italia di recente (a partire dagli anni novanta) è stato adottato il termine *sinkhole* (Faccenna *et al.*, 1993, Brunamonte *et al.*, 1994; NOLASCO, 1998; Ciotoli *et al.*, 1998 e molti altri) per indicare una cavità sub-circolare, che si apre improvvisamente nel terreno, con richiamo di materiali verso il basso.

Esso pertanto sarebbe sinonimo di sprofondamento s.l. ed è applicabile a fenomeni come le doline di crollo, gli sprofondamenti di natura antropica, i *camini di collasso* o *voragini di terra*, che si aprono nei terreni a granulometria variabile.

La dolina di crollo (Cramer, 1941, Castiglioni, 1986) indica una depressione tipica di aree carsiche,

che si forma principalmente per dissoluzione dovuta all'assorbimento nel terreno di acqua da ruscellamento (Anelli, 1959; 1965, Sweeting, 1972; Ford & Williams, 1989; Klimchouck *et al.*, 1997; Ferrarese & Sauro 2001; Macalluso *et al.*, 2002), cui si aggiunge il crollo per gravità della parte superiore della cavità.

Uno *spfondamento* in genere è una depressione di forma varia, anche se generalmente sub-circolare, formatasi rapidamente, tipica oltre che di zone carsiche, di aree di pianura, di aree in cui nel sottosuolo sono presenti altre cavità (Canuti, 1982). Lo *spfondamento catastrofico*, poiché improvviso ed arrecante danni, comprende anche quei dissesti non direttamente collegabili a fenomeni carsici, come le cavità sotterranee originate dall'attività antropica, in aree urbanizzate, da miniere, scavi, cunicoli e cavità di antiche catacombe. Gli sprofondamenti sono legati principalmente alla gravità.

I "*camini di collasso*" o "*voragini di terra*" sono ampie e profonde depressioni sub-circolari con dimensioni da pochi metri al centinaio di metri e profondità di alcune decine di metri, a pareti sub-verticali che si aprono rapidamente in terreni a granulometria variabile.

I *camini di collasso* sono in genere colmati da acque, spesso mineralizzate, formando laghetti e specchi d'acqua; sono caratterizzati da subsidenza che può localmente essere dovuta a presenza di sorgenti. Sono localizzati in genere su allineamenti tettonici lungo i quali spesso si evidenziano anomalie di fluidi liquidi e gassosi; la continua erosione delle pareti del camino provoca il progressivo colmamento della voragine, un aumento del diametro e nello stesso tempo una diminuzione della profondità dello specchio d'acqua.

La formazione dei *camini di collasso* è improvvisa ma può essere realizzata in un evento unico o in più eventi con progressivo cedimento delle pareti (Brunamonte *et al.*, 1994). Nel primo caso il substrato è interessato da un condotto unico e la cavità presenta nel tempo dimensioni più o meno stazionarie. Nel secondo caso lo sviluppo del *camini di collasso* avviene per lento dilavamento dal basso verso il tetto della cavità; la cavità stessa tende ad allargarsi notevolmente per cedimento progressivo e coinvolgimento di volumi sempre più grandi.

Si è constatato che la maggior parte di tali fenomeni è dovuta ad una serie di cause, di cui si parlerà in seguito, ma ruolo importante assumono i processi di risalita, sifonamento e *suffosione*, (*sensu* Castiglioni, 1986) (Derbyshire & Mellors, 1988; Derbyshire *et al.*, 1991; Billiard *et al.*, 1992; 1993; Muxart *et al.*, 1994).

Un processo di *suffosione*, definito da Castiglioni (1986), è un effetto meccanico dello scorrimento sub-superficiale dell'acqua nel terreno (con dimensioni granulometriche dalle argille alle ghiaie) che si realizza quando quest'ultimo è crepacciato o poroso e quando l'acqua abbondante e con pressione elevata, riesce a trovare vie di scorrimento in cui passare con velocità abbastanza sostenuta. Il passaggio dell'acqua provoca l'erosione di materiale e la formazione di canalicoli a sviluppo sub-orizzontale e di condotti tubolari lungo le linee idrauliche di flusso. Quest'ultimo fenomeno viene indicato nella letteratura anglosassone con il termine *piping*. Pertanto nel processo di formazione dei camini di collasso dovrebbe avere un ruolo importante la pressione idraulica iniziale nei condotti (Guerricchio, 1982). Sprofondamenti in cui è stata accertata la presenza di

meccanismi di questo tipo sono noti in letteratura anglosassone come *piping sinkhole*.

Secondo Forti (2002) i fenomeni di *piping* si possono verificare in un sistema carsico, solo se l'acquifero termale non è confinato ed è situato a breve distanza dalla superficie. Infatti secondo l'Autore i meccanismi di *piping* non si possono sviluppare in un sistema carsico termale posto a notevole profondità e ricoperto da rocce impermeabili proprio perché la presenza di queste ultime impedirebbe ai processi di progredire, dal basso verso l'alto, in superficie.

I fenomeni registrati nell'Appennino ed in altre parti del mondo mostrano che i fenomeni di *sinkholes*, dovuti a fenomeni di risalita di fluidi dal basso, si sono formati nella maggior parte dei casi proprio in acquiferi imprigionati, con substrato posto a notevole profondità, sormontato da depositi costituiti da materiali a granulometria variabile, ma generalmente da limi, a scarso stato di consistenza, in presenza di faglie o fratture (Littlefield *et al.*, 1984; Derbyshire & Mellors, 1988; Derbyshire *et al.*, 1991; Billiard *et al.*, 1992; 1993; Faccenna, 1993; Muxart *et al.*, 1994; Ciotoli *et al.*, 2000; Berti *et al.*, 2002 a, b; Di Filippo *et al.*, 2002). Pertanto sembrerebbe che proprio la presenza di faglie e diaclasi, che mettano in comunicazione i due mezzi, (permeabile di base ed impermeabile al tetto) sia la spiegazione dell'insorgere di *sinkhole* in acquiferi imprigionati.

I meccanismi di *piping* e *suffosione* sub-superficiale potrebbero essere catturati dal basso sulla direttrice a sviluppo verticale verso l'alto delle cavità carsiche, proprio per la presenza di faglie e diaclasi all'interno dei terreni di copertura posti al di sopra del bedrock carbonatico.

In conclusione viene riportata la terminologia con la quale vengono indicati i diversi tipi di cavità che si aprono nel terreno.

**Sprofondamento:** è una cavità di forma varia, anche se generalmente sub-circolare, formata rapidamente, tipica di zone carsiche, di aree di pianura, di aree urbane, di aree il cui sottosuolo presenti altre cavità anche di origine antropica;

**Sprofondamento catastrofico:** Sprofondamento rapido ed improvviso arrecante danni a persone o cose;

**Sprofondamento di origine antropica** (che potremmo definire *anthropogenic sinkhole*): è il collasso di una volta in cavità di origine antropica;

**"dolina di soluzione normale"** (coincidente con il termine anglosassone di *"solution sinkhole"* e *"solution doline"*): conca chiusa originata per dissoluzione della roccia da parte dell'acqua di ruscellamento superficiale (Castiglioni, 1986);

**"dolina alluvionale"** (coincidente con il termine anglosassone di *"subsidence sinkhole"* o potrebbe meglio definirsi *"cover sinkhole"*): conca chiusa che si forma su materiali di copertura in genere, e/o alluvionali, in seguito all'originarsi, in rocce solubili sottostanti, di cavità carsiche per dissoluzione sub-superficiale o di crollo (Castiglioni, 1986);

**"dolina di crollo"** (coincidente con il termine anglosassone di *"collapse sinkhole"* e *"collapse doline"*): cavità con forma a pozzo nei calcari e in rocce solubili formatesi per il crollo del soffitto di grotte (Cramer, 1941; Castiglioni, 1986);

**"dolina di subsidenza in roccia"** (coincidente con il

termine anglosassone di *"rock subsidence sinkhole"* o *"subsidence doline"*): cavità formatesi su rocce coerenti e permeabili ma non solubili, poggiate su rocce solubili per crollo di volta (Castiglioni, 1986);

***sinkhole*** in senso stretto, o ***camino di collasso*** (coincidente con il termine anglosassone di *piping sinkhole*): cavità sub-circolare che si apre improvvisamente in terreni di varia granulometria, per meccanismi prevalenti di risalita delle acque e dei gas, di sifonamento di *suffosione* e di successivo collasso.

In definitiva per una più corretta terminologia il termine *sinkhole* s.s. dovrebbe essere applicato esclusivamente a quelle cavità che si formano a seguito di processi non solamente carsici ma anche di risalita delle acque ed erosione e sifonamento dei materiali di copertura; termine equivalente così ai camini di collasso e alle voragini di terra della letteratura italiana e ai *piping sinkholes* della letteratura anglosassone.

In alternativa sarebbe necessario aggiungere un attributo accanto al termine *sinkhole* per indicarne la genesi e per evitare di creare confusione circa il fenomeno cui si vuole riferire (*piping, collapse, solution, subsidence, anthropic o anthropogenic, cover*).

Per quanto riguarda gli sprofondamenti dovuti al carsismo è preferibile utilizzare il termine già esistente *dolina di crollo* (equivalente a *collapse doline* o *collapse sinkhole* della letteratura anglosassone), mentre per i collassi dovuti all'antropizzazione (crolli di grotte, cunicoli, miniere etc.) dove solo casualmente si formano cavità subcircolari, si può adottare il termine generico di sprofondamento antropico (o *anthropogenic collapse*).

## LE CAUSE

I *sinkholes* s.s. (o *piping sinkhole*) si formano per cause predisponenti ed innescanti. Si originano in contesti di complesse situazioni geologico-strutturali ed idrogeologiche del territorio che ne costituiscono il substrato essenziale. Vengono innescati per motivi di diversa natura quali un sisma, un periodo di siccità, o una alluvione (ciò che può provocare una variazione rapida del livello piezometrico), l'emungimento di grandi quantitativi di acqua dal sottosuolo.

Definire quale sia la causa principale è difficile poiché esse sono molteplici e generalmente concomitanti; queste possono così essere riassunte:

- 1) Un substrato carbonatico o costituito da roccia solubile (calcari, dolomie, evaporiti o rocce solfatiche) sottoposto a fenomeni carsici; la presenza di una morfologia del *bedrock* accidentata, sia a piccola scala che a grande scala, con macroforme carsiche (*doline, uvala, crepacci* e grotte) e con cavità carsiche presenti al tetto del substrato (interfaccia suolo/roccia) risultato di processi corrosivi e pedogenetici;
- 2) La presenza di un pacco di sedimenti impermeabili o semi-permeabili al tetto del substrato, costituito da limi, argille, sabbie a differente granulometria, omogenee o eterogenee;
- 3) Scarse caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali costituenti il manto superiore (consolidazione, addensamento, resistenza);
- 4) Presenza di un reticolo di fratture o faglie che permettano una maggiore circolazione idrica e una



- notevole erosione meccanica;
- 5) Presenza di abbondanti acque di circolazione sotterranea;
  - 6) Presenza di gas nel sottosuolo, generalmente CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S, che consentano la dissoluzione dei materiali di copertura e la risalita delle acque (Faccenna *et al.*, 1993; Ciotoli *et al.*, 1998);
  - 7) Intensità elevata delle precipitazioni piovose e alternanza di periodi secchi e piovosi, risultano particolarmente favorevoli alla formazione delle oscillazioni della tavola d'acqua;
  - 8) Le attività antropiche: attività estrattive, emungimenti di acqua; il forte emungimento per uso irriguo ed idropotabile fa sì che si sviluppino, in prossimità dei pozzi, coni di depressione tali da far aumentare notevolmente la velocità dei flussi idrici e quindi l'asportazione delle particelle dei sedimenti e subsidenza delle coperture alluvionali;
  - 9) Le eventuali escursioni termiche; in zone poste a quote elevate e soprattutto alle alte latitudini (Nord

- Europa), i passaggi al di sopra e al di sotto dello zero possono originare cunei e lenti di ghiaccio che tendono ad allargare le cavità nel terreno;
- 10) La scarsa presenza di un manto vegetale che possa esercitare un effetto limitante nei confronti della mobilitazione dei terreni;
  - 11) Le scosse sismiche.

## DOVE SI VERIFICANO

I *sinkholes* si originano su pianure alluvionali, pianure costiere, conche intermontane, generalmente di origine tettonica in corrispondenza di successioni carbonatiche massicce carsificate, sedi di falde acquifere di grande potenza, a cui si sovrappongono depositi fluvio-lacustri, lagunari, vulcanici o marini di potenza variabile (Newton, 1984).

Se ne presentano di seguito alcuni esempi nell'Appennino Centrale (Fig 1).

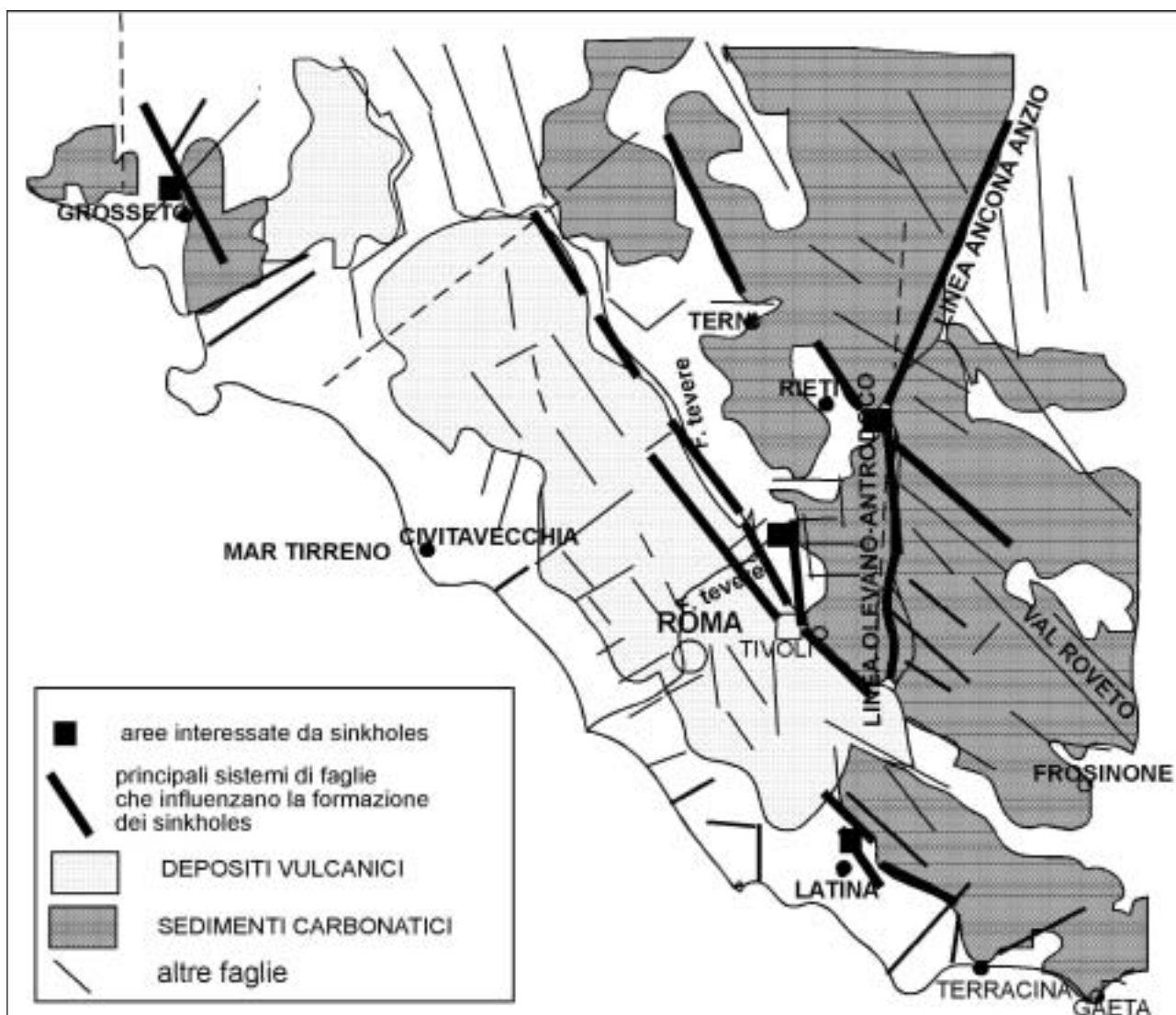


Fig 1 - Le aree interessate da fenomeni di sinkhole  
The areas interested from phenomena of sinkhole

## ESEMPI NEL LAZIO

### 1) La Piana di S. Vittorino, (RI)

#### *Caratteri generali*

La Piana di S. Vittorino, attraversata dal F. Velino, costituisce una depressione tettonica bordata da faglie che ne hanno favorito una particolare conformazione triangolare, con apice rivolto a sud (Fig. 2).

Essa è caratterizzata da un notevole sviluppo di forme di collasso, presenti anche sui versanti circostanti; secondo la letteratura anglosassone sarebbe definita una *sinkholes plain*.

Poiché i fenomeni di sprofondamento hanno provocato e provocano tutt'ora notevoli danni alle strutture antropiche dell'area, questa è stata oggetto di studi specifici sin dai tempi più antichi (Tenore 1872; Verri 1886) che sono stati ulteriormente approfonditi di recente (Nolasco, 1986; 1998; Faccenna *et al.*, 1993; Ciotoli *et al.*, 1998, 2000, Bigi *et al.*, 1999; Centamore & Nisio, 2002 a, b, 2003; Bersani & Castellano 2002).

La piana è stata colmata da depositi fluvio-lacustri del Pleistocene superiore-Olocene, a differente granulometria, per la maggior parte costituiti da limi (60%), argille (20%), sabbie (10%), localmente si rivengono lenti di ghiaie, e travertini (per lo più sabbiosi), con spessori che variano aumentando verso il centro della piana fino ad un massimo di circa 130 -170 m; lungo i versanti della piana sono presenti lembi di travertini, di depositi terrazzati e di conoide, del Pleistocene medio.

I depositi continentali che colmano la depressione tettonica di S. Vittorino ricoprono blocchi delle successioni affioranti a M.te Paterno fagliati e dislocati verso il basso (Centamore *et al.*, 2003).

Questi blocchi sono costituiti prevalentemente da formazioni carbonatiche, sulle quali prima della fase tettonica distensiva che ha favorito la formazione della depressione, si sarebbero sviluppate forme carsiche, presenti tra l'altro sul versante di M.te Paterno.

Sulla destra idrografica del fiume si elevano i M.<sup>ti</sup> Reatini, mentre sulla sinistra sono presenti il rilievo carbonatico di M.<sup>te</sup> Nuria e la dorsale di Calcariola (Fig. 2).

La dorsale dei Monti Reatini, a N, è caratterizzata dalla sovrapposizione di una successione carbonatica pelagica (dell'*Unità dei M.<sup>ti</sup> Reatini*) su una successione carbonatica di piattaforma e silico-clastica dell'*Unità M.<sup>te</sup> Nuria* (Centamore & Nisio, a, b, 2003).

Il gruppo montuoso del M.<sup>te</sup> Nuria, a SE, è costituito da una potente successione carbonatica di piattaforma (piattaforma laziale-abruzzese) con quote che arrivano fino a 1850 m.

La dorsale di Calcariola è costituita prevalentemente dai depositi fluvio-lacustri del bacino di Rieti che ricoprono un substrato costituito da arenarie (appartenti all'*Unità del Salto*; Centamore & Nisio, 1999; 2002 a, b; 2003 Centamore *et al.*, 1999) e da termini carbonatici (dell'*Unità M.<sup>te</sup> Navegna* e dell'*Unità M.<sup>ti</sup> Reatini*).

La piana è bordata da elementi tettonici distensivi e/o transtensivi che ne hanno condizionato la morfologia (da cui la caratteristica forma triangolare, Centamore & Nisio, 1999; 2002 a, 2003; Centamore *et al.*, in stampa; Dramis & Nisio, in stampa).

Il più importante di questi elementi è la faglia *Fiamignano-Micciani*, una dislocazione di importanza regionale a direzione NW-SE ed immergente verso SW che si segue per chilometri (Fig. 2), al di fuori della

Piana, pur essendo interrotta e spostata da faglie trasversali e oblique. La faglia mette a contatto le formazioni carbonatiche di M.<sup>te</sup> Nuria con quelle prevalentemente torbiditiche della depressione del Salto; attraversa tutta la Valle del F. Velino e continua più a Nord, bordando il versante occidentale del gruppo montuoso del Terminillo.

Il segmento che attraversa la Piana di S. Vittorino non è facilmente individuabile sul terreno, anche a causa dei continui e radicali interventi antropici, che dalla fine dell'ottocento hanno modificato drasticamente l'antico paesaggio lacustre; esso sembra coincidere con un allineamento Micciani - S. Vittorino (Faccenna *et al.*, 1993; Ciotoli *et al.*, 1998; 2000; Centamore & Nisio, 2000).

Dal punto di vista idrogeologico la Piana di San Vittorino costituisce il luogo di recapito della circolazione idrica dei versanti limitrofi (Boni *et al.*, 1995, e da Dall'aglio & Campanile, 1996, Ciotoli *et al.*, 1998; 2000, Colombi *et al.*, 1999; Capelli *et al.*, 2000) e, soprattutto, del sistema idrogeologico dei Monti Giano, Nuria e Velino. In questa zona le sorgenti presenti sono distribuite ai margini settentrionale e meridionale della pianura, hanno un carattere prevalentemente puntuale (con un'unica emergenza) e sono tra loro associate a costituire fronti di deflusso emergenti per trabocco della falda idrica indotto dalla coltre satura dei sedimenti alluvionali. Le portate emergenti sui lati opposti della piana sono molto differenti tra loro: circa 2000 l/s per il bordo settentrionale rispetto ai circa 18000 l/s complessivi di quello meridionale (Sorgenti del Peschiera).

Alcune sorgenti puntuali sono poi presenti anche all'interno della piana con portate modeste (stimate tra 0.1 ÷ 2 l/s), poste in corrispondenza dei *sinkholes*.

#### *I sinkholes della Piana*

La piana di S. Vittorino, oggetto sin dalla fine del secolo scorso di una serie di interventi antropici che ne hanno modificato notevolmente il paesaggio, è caratterizzata dalla presenza di almeno 29 cavità sub-circolari (*camini di collasso* o *sinkholes*) che ospitano laghetti e piccole pozze, di sorgenti mineralizzate, in concentrazioni anomale dei fluidi gassosi, di altri numerosi piccoli sprofondamenti localizzati, ed emergenze di acqua dolce (Fig 2).

Il primo sprofondamento di cui si ha menzione è quello che riguarda la Chiesa di S. Vittorino (edificata nel 1614), avvenuto nel 1703, in seguito ad una scossa sismica, che ha dato origine ad una cavità di circa 20 m di diametro e 2 m di profondità.

Si contano altri 5 sprofondamenti avvenuti nei secoli scorsi (tra il 1700 e il 1850; gli Atlanti del 1808 ne mostrano solo due; Bersani & Castellano, 2002) di cui non si hanno informazioni certe. Alcuni di essi sono stati riattivati nei primi decenni di questo secolo (nel 1915 e 1951; Riccardi, 1951; Mori, 1983;) le cavità hanno dimensioni variabili con diametri di 204, 130, 80, 50 e 15 m (tra cui il Lago di Paterno, il Pozzo di mezzo, il Pozzo burino) e profondità che variano da un massimo di 45 m a pochi metri (Capelli & Petitta, 1998; Capelli *et al.*, 2000).

Nel 1893 si aprirono improvvisamente altre 5 cavità con diametri da 100 a 8 m e profondità da 10 a 15 m e tra il 1900 e il 1903 ancora 5 con dimensioni di pochi metri.



Altre attivazioni, neoformazioni o allargamenti, si sono avute in occasioni di sismi (Michetti *et al.*, 1994), come avvenne durante il sisma del 1915, (Pozzo Gustavo, in seguito al terremoto di Avezzano).

Nel 1986 in seguito ad alluvioni si aprono 3 voragini in località Sciamargutta (Nolasco, 1986; Catenacci, 1992) con diametri da 5 a 60 m e profondità di una decina di metri.

L'ultimo *sinkhole*, che si è formato nel 1993 presenta solo pochi metri di diametro.

I *sinkholes* sono concentrati nella zona settentrionale della piana, tra S. Vittorino e Vasche, e sono allineati secondo direzioni NE-SW tra Vasche e Case Paterno, E-W tra le Terme di Cotilila e S. Vittorino e NW-SE, nella fascia tra le sorgenti del Peschiera-Micciani e Terme di Cotilia S. Vittorino, in parte coincidente con il prolungamento settentrionale della *faglia Fiamignano-Micciani*, ad Ovest della quale non si evidenziano più i fenomeni di sprofondamento (Faccenna *et al.*, 1993; Nolasco, 1998; Centamore *et al.*, 1999; Ciotoli *et al.*, 2000, Centamore & Nisio, 2002, a, b, 2003; Nisio, in stampa). Le acque mineralizzate sono rappresentate principalmente da acque solfuree e da acque ferruginose; le emergenze sono concentrate prevalentemente ai piedi del versante di M.<sup>te</sup> Paterno, tra S. Vittorino e Vasche, ma si rinvencono localizzate anche in sinistra del F. Velino lungo l'allineamento NW-SE

Piedimozza-Cerquara.

In particolare le acque ferruginose emergono in alcuni laghetti a SE di S. Vittorino, lungo l'allineamento corrispondente al prolungamento settentrionale della *faglia Fiamignano-Micciani*, mentre le sorgenti solfuree sono allineate con direzioni circa E-W, tra S. Vittorino e Vasche, e NW-SE, tra Pendenza e S. Vittorino e tra Piedimozza e Cerquara, (Faccenna *et al.*, 1993; Nolasco, 1998; Ciotoli *et al.*, 2000).

Per quanto riguarda i fluidi gassosi le anomalie di elio sono concentrate lungo un allineamento E-W tra S. Vittorino e le Terme di Cotilia, e lungo due allineamenti NW-SE, tra le sorgenti del Peschiera e S. Vittorino. Quelle del radon si concentrano invece per la maggior parte nel settore nord-occidentale della piana e in misura minore lungo gli allineamenti Micciani-S. Vittorino a direzione NW-SE, e con direzioni NE-SW tra Vasche-Case di Paterno, e parallelamente al versante nord-occidentale del rilievo carbonatico di Pendenza-Colle Impicciavera, (Ciotoli *et al.*, 2000).

Il lato settentrionale e quello sud-orientale della piana sono caratterizzati inoltre dall'emergenza di alcune sorgenti di acqua dolce.

Negli sprofondamenti presenti nell'area in esame si possono distinguere doline di crollo localmente chiamate canetre, impostate esclusivamente sui versanti di M.te Paterno e *sinkholes* localizzati nelle coperture con-

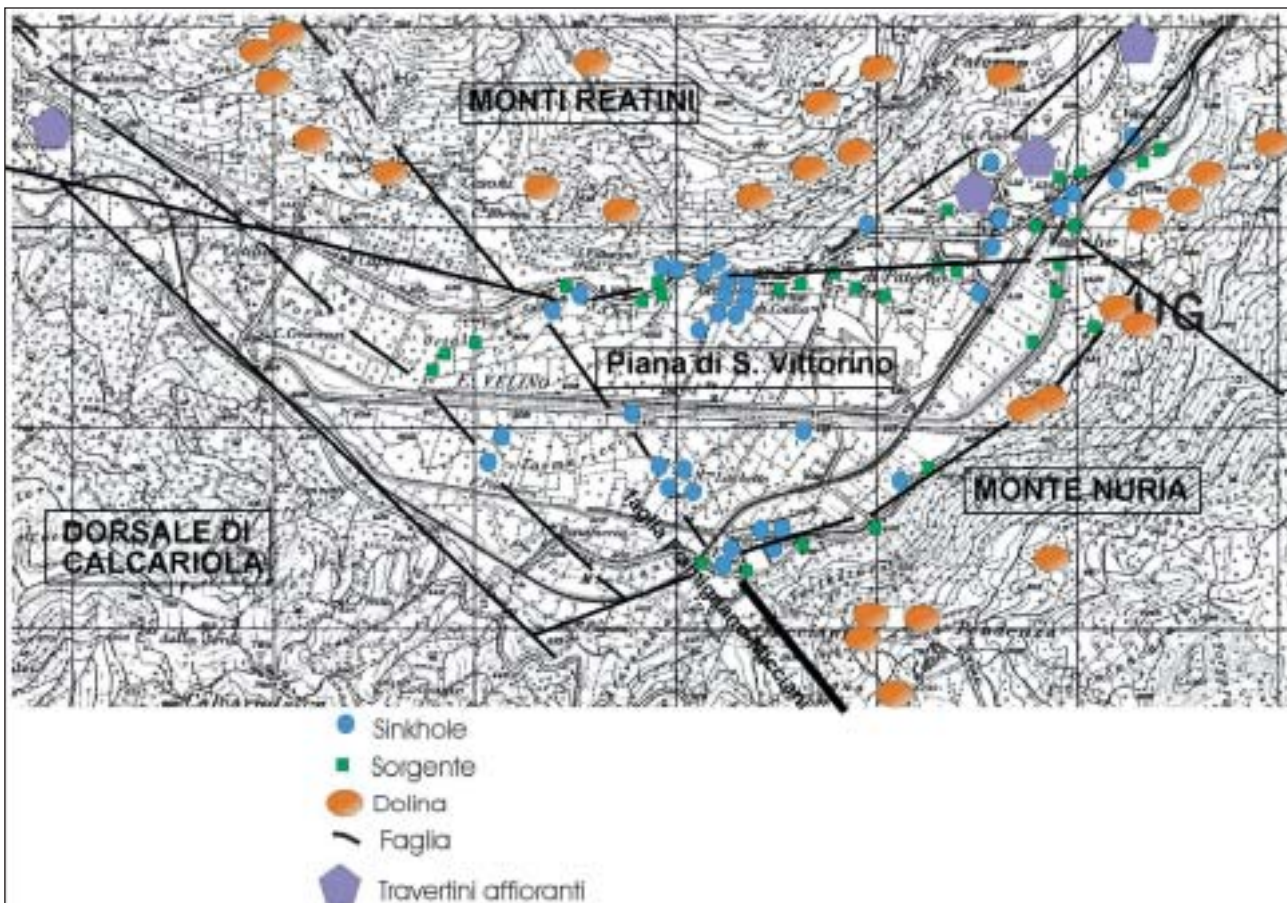


Fig 2: Schema dell'ubicazione dei sinkholes nella Piana di S. Vittorino (Rieti)  
Scheme of the sinkholes in the S. Vittorino Plane (Rieti- Central Italy)

tinentali della piana.

Per qualche Autore (Nolasco, 1998) alcune cavità di antica origine (Lago di Paterno, Pozzo di Mezzo e Pozzo Burino) rappresenterebbero delle doline. Ma lo spessore dei depositi continentali posti al di sopra del substrato carbonatico e per la locale situazione geologico-strutturale queste depressioni si sarebbero comunque originate per fenomeni di risalita, di sifonamento ed erosione (*piping*) e rappresenterebbero dunque sinkholes in senso stretto (nel senso sopra indicato) (Fig. 3).

Per altri Autori (Capelli *et al.*, 2000; Bersani & Castellani, 2002) la genesi degli sprofondamenti nella Piana di S. Vittorino sarebbe legata alla dissoluzione e conseguente collasso di orizzonti di travertino, con spessori non superiori a 10 m, riscontrati in sondaggi a profondità di 7-8 m nei pressi di Cotilia e a 30- 40 m in altre località.

Ma in altri sondaggi effettuati al centro della piana i travertini sono caratterizzati da spessori molto modesti e da una struttura sabbiosa, piuttosto incoerente, tale da non giustificare collassi di una certa entità.

Nei pressi poi del Lago Rotondo, verso le aree più meridionali della piana, non si sono incontrati travertini se non in spessori decimetrici.

Di conseguenza la sola presenza dei travertini peraltro non continui in tutta la piana, non è sufficiente a spiegare la genesi di tutte le cavità presenti nella piana stessa (Fig 4).

Ma la disposizione degli sprofondamenti, tutti localizzati su allineamenti tettonici, la presenza sia di un acquifero confinato in profondità, sia di falde circolanti nelle coperture alluvionali, nonché la disposizione delle anomalie dei fluidi gassosi (Faccenna *et al.*, 1993; Ciotoli *et al.*, 1998, 2000, Centamore & Nisio, 2000)

mettono in evidenza che fattore importante della genesi degli sprofondamenti in parola sono anche i processi di *piping* o *suffosione* legati ai fenomeni di dissoluzione degli orizzonti travertinosi, dove questi sono presenti (Fig 4).

Questi fenomeni potrebbero essere stati favoriti, oltre che dai sistemi di dislocazioni, che costituiscono la via preferenziale di risalita dei fluidi, anche dalla presenza in profondità di un substrato carsificato in precedenza, le cui forme potrebbero essersi evolute in questo contesto, favorendo così le evidenze superficiali. I fenomeni di sifonamento che si produrrebbero nella parte più superficiale del manto alluvionale potrebbero avvenire in corrispondenza di più ampie cavità carsiche poste ad un centinaio di metri nel substrato carbonatico e in collegamento tramite lo sviluppato reticolo di faglie e fratture che si rinviene lungo tutta la piana.

## 2) Pianura Pontina (Latina)

Casi di sprofondamento sono comuni in tutta la Pianura Pontina, costellata da numerosi laghetti e sorgenti; i Laghi del Vescovo, per esempio, sono una serie di cavità ubicate nell'area compresa tra il settore più meridionale dei Monti Lepini e il Fiume Uffente a sud di Sezze, a ridosso di faglie di importanza regionale, che ospitano specchi d'acqua. Da nord verso sud si riconoscono il Lago di S. Carlo, il gruppo vero e proprio denominato del Vescovo e il Lago Mazzocchio. Il gruppo del Vescovo è composto da 4 specchi d'acqua, di cui 3 presentano acque mineralizzate (con presenza di alti tenori in  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  e altri composti dello zolfo) e sono caratterizzati da colore opalescente, mentre uno è d'acqua dolce. Quello d'acqua dolce è profondo circa 18 metri ed ha una caratteristica forma di 8. Il Lago

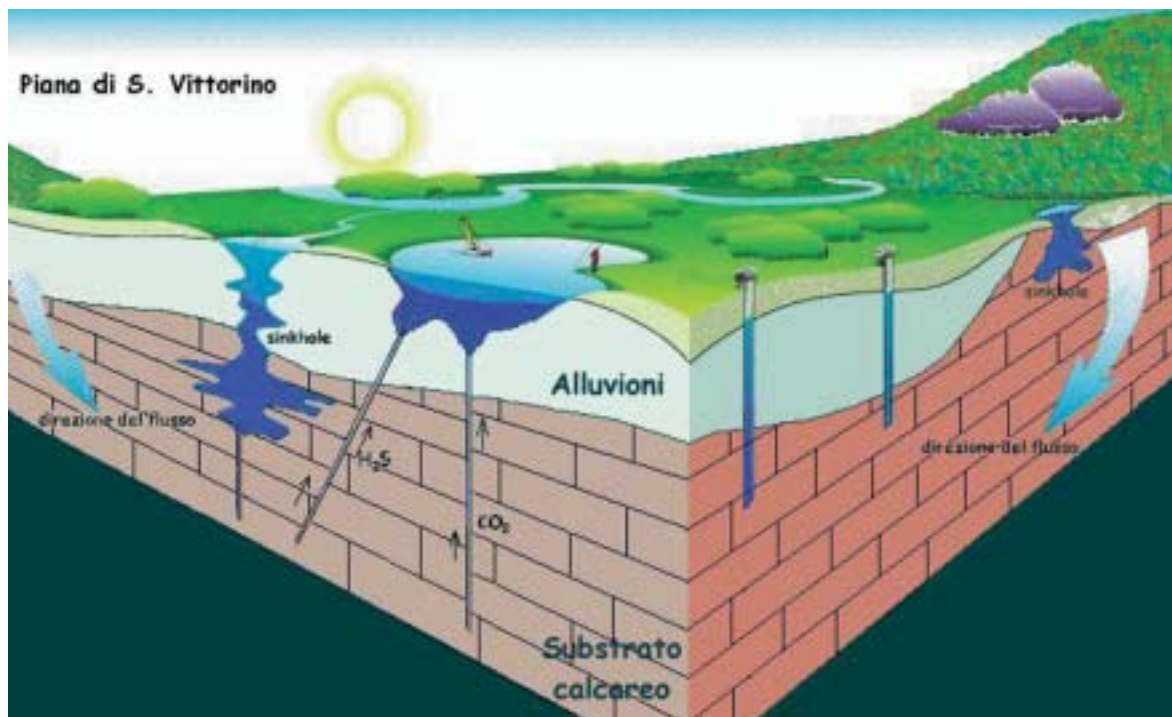


Fig. 3: Formazione di sinkholes nella Piana di S. Vittorino  
Formation of sinkholes in the St. Vittorino Plain (Rieti-Central Italy)



Mazzocchio è invece alimentato dalle acque di un canale (che drena nel fiume Uffente) dopo un impianto idrovo, risulta circondato da alti canneti e difficile da reperire.

#### *Doganella di Ninfa,*

Doganella di Ninfa è ubicata nella porzione nord-orientale della Pianura Pontina a pochi chilometri da Latina. In questo settore la Pianura Pontina è bordata ad oriente dalla dorsale dei Monti Lepini, disposta in direzione appenninica, costituita da una potente successione di calcari di piattaforma. Una faglia di importanza regionale borda il versante sud-occidentale dei Monti Lepini a contatto con la pianura, il substrato carbonatico viene ribassato a gradinata da un sistema di faglie (semigraben) al di sotto dei sedimenti alluvionali.

In questa zona sono ospitate numerose emergenze per una portata complessiva di 15.000 l/s alimentate dall'acquifero principale ospitato nella dorsale lepina (Boni *et al.*, 1980; Celico, 1983).

Al di sotto della Pianura Pontina i carbonati ribassati e chiusi al tetto dalle alluvioni prevalentemente limose costituiscono un acquifero imprigionato. A volte si riscontrano falde all'interno dei sedimenti continentali, alimentate sia da apporti meteorici sia dalla dorsale carbonatica attraverso una serie di faglie o fratture che mettono in comunicazione i due sistemi.

Lo sprofondamento a Doganella è avvenuto il 22 agosto del 1989, in seguito ad una scossa sismica registrata nei primi giorni di agosto, e ad un periodo di siccità che ha provocato l'abbassamento della falda.

La cavità passò da uno a 4 metri di diametro in soli tre giorni, per arrivare a 31 m tre anni dopo. Attualmente è sede di un laghetto che assume forma ellissoidale con una superficie di 720 mq ed asse principale di 32 m. Da dati recenti è stata ipotizzata la presenza a 30-40 m di profondità di travertini (Bono, 1995; Di Filippo *et al.*, 2002) e di alcuni *deficit di massa* (probabili cavità sotterranee) riscontrati da analisi gravimetriche, accompagnati ad una rete di canali e di fratture che possano provocare fenomeni di risalita, di dissoluzione e conseguentemente di erosione ed asportazione di materiale clastico con successivo collasso superficiale.

Tale situazione sembra molto simile a ciò che si verifica nella Piana di S. Vittorino.

### 3) La Valle del Tevere (Capena)

Nel settore nord-orientale dell'area vulcanica dei Monti Sabatini, in prossimità della valle del Tevere, a sud del Monte Soratte, sono presenti forme di sprofondamento originatesi in epoca storica: Lago Vecchio (o Lago Sinibaldi), Lago Nuovo, Fontana Ciocci, Lago Puzzo.

#### *Lago Puzzo*

Nell'area in esame dal punto di vista geologico si possono distinguere:

- un substrato Meso-Cenozoico del Monte Soratte e del Monte Belvedere, costituito dalla successione marina condensata calcareo-silico-marnosa;
- una successione marina, trasgressiva sul basamento carbonatico, costituita da alternanze di sabbie, argille e

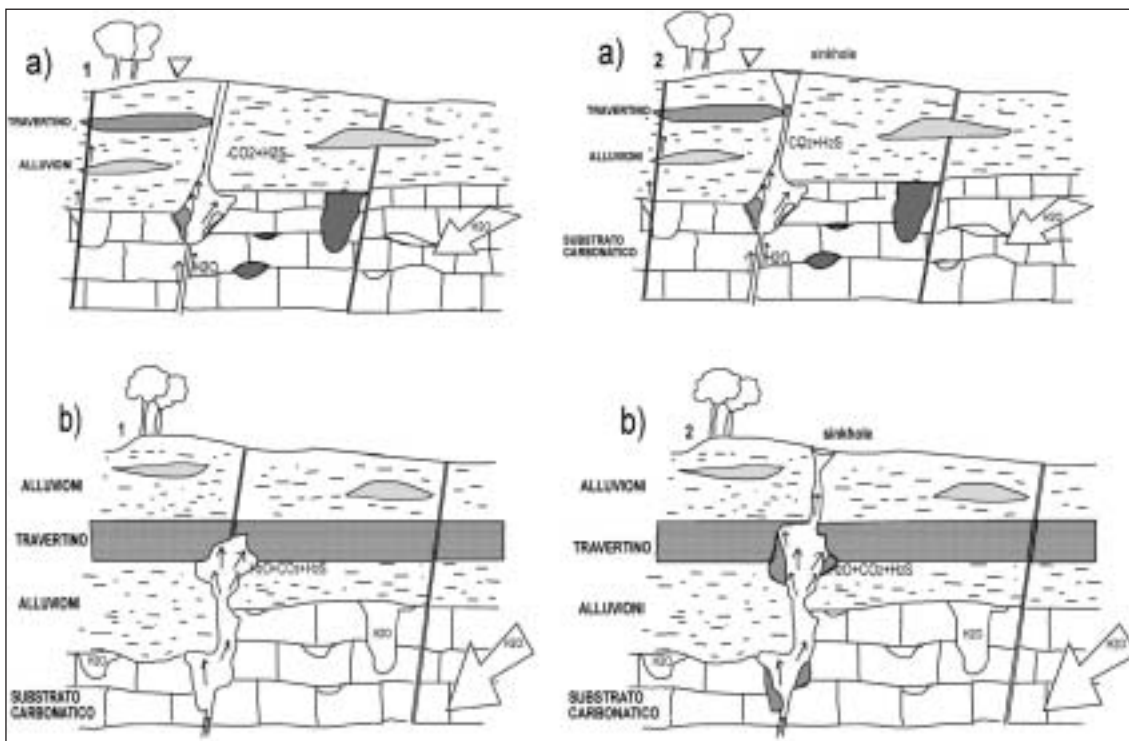


Fig 4: Schema evolutivo di un meccanismo di piping sinkhole. a) caso con depositi alluvionali privi di orizzonti di travertino; b) l'orizzonte di travertino funge da struttura metastabile e permette l'allargamento di una cavità.

*Evolutionary outline of a mechanism of piping sinkhole. a) case with alluvial sediments without horizons of travertine; b) the horizon of travertine acts as from meta-stabile structure and allows to the increase of one cavity.*



ghiaie;

- una copertura vulcanica costituita da piroclastiti rimaneggiate alternate ad epivulcaniti;
- depositi lacustri con caratteristiche e granulometrie differenti in cui si intercalano diatomiti,
- travertini intercalati ai prodotti piroclastici.

Il Monte Soratte è un *horst* costituito da due scaglie tettoniche con piani di accavallamento a direzione NNW-SSE; esso è delimitato a sud da faglie a direzione meridiana. Da tali piani di faglia avviene la risalita di fluidi di origine profonda ricchi di gas; lungo il fosso S. Martino si allineano una serie di sorgenti di portata modesta. Le acque del Lago Puzzo in particolare hanno riscontrato un alto tenore di H<sub>2</sub>S, da cui il nome al lago.

Il basamento carbonatico al di sotto del lago si attesterebbe ad una profondità compresa tra i 50 e i 100 m; al tetto sono presenti sedimenti costituiti da sabbie, silt e piroclastiti.

Il Lago Puzzo, ormai in via di estinzione, si apriva a contatto tra i travertini (sponda sud con spessore di 6-7 m; Di Loreto *et al.*, 1999) e le sabbie marine, presenta forma ellittica con asse maggiore orientato in direzione N-S, con profondità molto scarsa (mezzo metro) negli anni '90, attualmente quasi del tutto interrto a causa degli apporti detritici.

Dal fondo del lago si originavano sorgenti mineralizzate, ormai completamente obliterate dalla copertura argillosa, ed emissioni di gas che si notano tuttora nei fanghi del fondo.

La prima segnalazione storica della formazione del Lago Puzzo risale al 1856 (28 ottobre), quando si aprì improvvisamente una cavità che subito si riempì d'acqua (Ponzi, 1857; Ratti, 1857); essa venne attribuita a un fenomeno postvulcanico o al crollo di cavità carsiche. Prevalse la seconda ipotesi con cui si spiegò anche la formazione di una seconda cavità, il Lago di Leprignano, che si formò nel 1895 (Brunialti, 1895; Folghraiter, 1896; Meli, 1896; Moderni 1896). Altri laghi e piccole cavità ormai estinti si allineano tutti secondo una dislocazione ad andamento N-S; l'estinzione sembra esser proceduta da N verso S: (Lago Vecchio o Lago Sinibaldi, con diametro di 500 m, Fontana Ciocci (250 m), Lago Nuovo o di Leprignano (260 m), Pian della casa che si formò nel 1897.

Nel corso del tempo il Lago Puzzo si è colmato per apporti detritici provenienti dal vicino torrente di S. Martino e si sarebbe riformato nella medesima posizione in tempi più recenti del 1930 accompagnato da emissioni di gas, lanci di detriti, boati (Segre, 1948, Patrizi, 1967).

## ALTRI ESEMPI NELL'APPENNINO CENTRALE TOSCANA

- 1) Camaiole località Le Funi: il *sinkhole* si è formato il 15 ottobre del 1995 con 30 m di diametro e 11 di profondità (Buchignani, 2002; Buchignani & Chines, 2002; D'Amato *et al.*, 2002; Gonnelli *et al.*, 2002). Il substrato risulta costituito da *Calcare cavernoso* affiorante ad una profondità media di circa 140 m, sormontato da alluvioni impermeabili o semipermeabili, con presenza di una potente falda in un acquifero confinato;
- 2) Grosseto, località Bottegone: il *sinkhole* si è formato

il 29 gennaio 1999 con 153 m di diametro e 17 di profondità (Berti *et al.*, 2001; Gonnelli *et al.*, 2002), il substrato risulta costituito da *Calcare cavernoso* ad una profondità di circa 200 m, su cui giacciono argille e limi argillosi (in sondaggio riscontrati fino a 110 m di profondità, Berti *et al.*, 2002), con presenza di una potente falda di un acquifero confinato termale, nelle vicinanze di una faglia di importanza regionale;

- 3) Lago di S. Antonio, Poggibonsi (Siena), solo da notizie storiche (Del Zanna, 1901), di genesi incerta, si riescono a trarre informazioni di questo sprofondamento che potrebbe trattarsi di un *sinkhole*, formato su di un substrato di travertino, posto a non elevate profondità;
- 4) Lago dell'Accesa, Massa marittima (GR) e Lago di S. Floriano, Capalbio (GR), di origine incerta, si sono formati in base a notizie storiche alla fine del secolo scorso in seguito ad eventi improvvisi, su di un substrato carbonatico a notevole profondità sormontato da depositi continentali.

## CONCLUSIONI

I casi di *sinkhole* in Italia centrale, concentrati soprattutto nelle pianure alluvionali, nelle immediate vicinanze di dorsali carbonatiche, presentano dimensioni diverse da poche decine di metri a diametri e profondità che possono superare i 100 m.

In letteratura vengono definiti impropriamente *sinkholes* fenomeni la cui genesi coincide con le *doline di crollo*, le *doline alluvionali* o le *doline di subsidenza in roccia*.

Molti Autori definiscono *sinkhole* una cavità di qualsiasi forma che si genera anche per cause antropiche, così come crolli di volte in antiche catacombe, o in miniere dismesse, cave di tufo o crolli del manto stradale sovrapposto a cavità.

In questa sede si vuole puntualizzare la differenza tra il fenomeno di *sprofondamento* in genere, di cui fanno parte tutti i fenomeni sopra elencati, le *doline* ed i *sinkholes*.

I *sinkholes* (il cui termine corretto in italiano è *camini di collasso*) hanno forma sub-circolare e si aprono improvvisamente in terreni di origine continentale a granulometria variabile.

La genesi di un fenomeno con queste caratteristiche non è semplicemente carsica (come avviene nelle doline) ma deve necessariamente ammettere un processo di risalita di acque, ricche in gas, che possano generare sifonamento e asportazione di particelle solide, *suffosione* o *piping* sfruttando come vie di risalita preferenziali sistemi di faglie e fratture.

Fenomeni di questo tipo, definiti in questa sede *sinkhole* in senso stretto, coincidono con quei fenomeni definiti dalla letteratura anglosassone *piping sinkhole*.

Pertanto allo stato attuale delle conoscenze poiché non è più possibile ridefinire il termine *sinkhole* in tutta la letteratura internazionale risulta necessario aggiungere al termine, almeno, un attributo che chiarifichi la genesi e il tipo di fenomeno di cui si sta trattando (*piping sinkhole*, *collapse sinkhole*, *solution sinkhole* e così via).

Tutti i casi esaminati nell'Appennino centrale presentano caratteristiche comuni:

- a) Presenza di un substrato carbonatico posto a notevole profondità (oltre i 100 m),
- b) Presenza al tetto del substrato un potente pacco di depositi continentali a granulometria variabile, generalmente impermeabili o semipermeabili
- c) Scarse caratteristiche fisico-meccaniche dei sedimenti di tetto (scarsa, consistenza o uno scarso grado di addensamento);
- d) Presenza di un potente acquifero confinato (falda in pressione) e di sorgenti poste nelle immediate vicinanze con portate elevate;
- e) Origine tettonica delle piane sulle quali si originano i fenomeni (*graben* o *semigraben*);
- f) Presenza di importanti dislocazioni tettoniche di faglie e di fratture che attraversano il substrato;
- g) Presenza di gas (radon, metano, elio, anidride carbonica, acido solfidrico);
- h) Presenza di un reticolo di piccole fratture o diaclasi che mette in comunicazione il mezzo permeabile con quello impermeabile.

Non comune a tutti i casi (Piana Pontina?, alcuni casi nella Piana di S. Vittorino?, Lago di S. Antonio) è la presenza di orizzonti o lenti travertinose poste a profondità intermedia tra il substrato e il piano campagna (30-40 m).

Gli Autori che hanno analizzato il problema (ad esempio Capelli *et al.*, 2000; Bersani & Castellano, 2002) manifestano diversità di vedute sulla possibilità di un processo di risalita di fluidi, sifonamento e *suffosione* su sedimenti continentali di notevole potenza.

Tale possibilità sembra invece poter dipendere dagli altri elementi sopra elencati, in particolare i meccanismi di piping e *suffosione* potrebbero sfruttare proprio le linee di maggior debolezza, nonché dal fattore tempo.

Pertanto i fenomeni di erosione sub-superficiale potrebbero essere richiamati dal basso ed essere collegati ai fenomeni carsici del bedrock attraverso linee tettoniche e fratture.

In alcuni casi è possibile che le cavità di superficie possano avere origine per la dissoluzione di sedimenti, quali travertini o altri, a scarse profondità (alcuni metri o poche decine di metri) dal piano di campagna, in molti altri casi la genesi dei *sinkholes* è da ricercarsi a profondità più elevate nel *bedrock* carbonatico.

## BIBLIOGRAFIA

- Anelli F. (1959) *Nomenclatura italiana dei fenomeni carsici*. Grotte d'Italia, 3(3), 3-56, Castellana Grotte.
- Anelli F. (1965) - *Fenomeni carsici, paracarsici e pseudocarsici*. Giorn. di Geol., 31(2), 11-35.
- Beck B.F. (1984) *Sinkholes: their geology, engineering & environmental impact*. Ed. A.A. Balkema/Rotterdam/Boston (1984).
- Beck B.F. & Wilson W.L. (1987) - *Karst hydrogeology: engineering and environmental applications*. Ed. A.A. Balkema/Rotterdam/Boston (1987).
- Bersani P. & Castellano F. (2002) - *I sinkhole della Piana di S. Vittorino (Rieti) e il rischio idraulico connesso*. In: Le voragini catastrofiche, un nuovo problema per la Toscana. Att. Conv. 31 marzo 2000, (GR). Regione Toscana, 47-61.
- Bersani P., Biagi P. F., Ferranti C. & Piotti A. (2000) - *Gli sprofondamenti della Piana di S. Vittorino*

(Rieti). L'Aquila, 1/2000, 39-48.

- Berti G., Canuti P., & Casagli N. (2002 a). *Voragini e sprofondamenti nel territorio nazionale: analisi morfometrica di alcuni casi caratteristici in aree appenniniche*. In: Le voragini catastrofiche, un nuovo problema per la Toscana. Att. Conv. 31 marzo 2000, GR. Regione Toscana, 71-81.
- Berti G., Canuti P., & Casagli N., Micheli L., Pranzini G. (2002 b). *Risultati preliminari sullo sprofondamento in località Bottegone (Grosseto)*. In: Le voragini catastrofiche, un nuovo problema per la Toscana. Att. Conv. 31 marzo 2000, GR. Regione Toscana, 242-256.
- Billiard A., Muxart T., Derbyshire E., Wang J.T. & Dijkstra, T.A. (1992) - *Les glissements de terrain induits par les loess de la province de Gansou, Chine*. Annales de Géographie, 566, 495-515.
- Billiard A., Muxart T., Derbyshire E., Wang J.T. & Dijkstra, T.A. (1993) - *Landsliding and land use the loess of Gansu Province, Chine*. Zeitschrift fur Geomorphologie, Supplement Band 87, 117-131.
- Bigi G., Capelli G., Mazza R., Parotto M., Petitta M. & Salvati R. (1999) - *Strutture di collasso nella piana di S. Vittorino (Fiume Velino, Lazio): interazione tra circolazione idrica sotterranea e tettonica attiva*. Convegno Conoscenza e salvaguardia delle aree di Pianura. Ferrara Italy, 8-11 Novembre 1999.
- Boni C., Bono P., Calderoni G., Lombardi S., & Turi B. (1980) *Indagine idrogeologica e geochimica sui rapporti tra ciclo carsico e circuito idrotermale nella Pianura Pontina (Lazio Meridionale)*. Geol. Apl. e Idrogeol. 15, 203-247.
- Boni C., Cappelli G. & Petitta M. (1995) - *Carta idrogeologica dell'alta e media valle del F. Velino*. System cart, Roma.
- Bono P. (1995) - *The sinkhole of Doganella (Pontina, Plain, Central Italy)*. Environmental Geology, 26, 48-52.
- Brunamonte F., Prestininzi A. & Romagnoli C. (1994) - *Geomorfologia e caratteri geotecnici dei depositi di terre rosse nelle aree carsiche degli Aurunci orientali (Lazio meridionale, Italia)*. Geol. Rom., 30, 465-478.
- Brunialti A. (1895) - *Il nuovo Lago di Leprignano*. L'Illustrazione italiana, 22: 339-340.
- Buchignani V. (2002) - *Indagini relative al fenomeno di crollo verificatosi nell'ottobre 1995 in località "le Funi" Camaiole capuologo, rapporto di aggiornamento 2001*. In: Le voragini catastrofiche, un nuovo problema per la Toscana. Att. Conv. 31 marzo 2000, GR. Regione Toscana, 202-209.
- Buchignani V. & Chines C. (2002) - *Indagini relative al fenomeno di crollo verificatosi nell'ottobre 1995 in località "le Funi" Camaiole capuolog.*. In: Le voragini catastrofiche, un nuovo problema per la Toscana. Att. Conv. 31 marzo 2000, GR. Regione Toscana, 176-201.
- Canuti P. (1982) - *Ambienti geologici investigati nell'ambito del sottoprogetto fenomeni franosi*. C.N.R. progetto finalizzato conservazione del suolo (1982).
- Capelli G. & Petitta M. (1998) - *La Piana di S. Vittorino: rischi geologici e idrogeologici*. Tevere rivista dell'Autorità di Bacino del Tevere, in stampa.

- Capelli G., Petitta M. & Salvati R. (2000) – *Relationships between catastrophic subsidence hazards and groundwater in the Velino Valley (Central Italy)* – Proceedings Sixth International Symposium on Land Subsidence SISOLS 2000, Ravenna, Italy. 1, 123-136.
- Castiglioni G.B. (1986)- *Geomorfologia*. Opere UTET di geografia e discipline affini; 436 pp.
- Catenacci V. (1992) – *Censimento dei dissesti causati dal crollo di cavità sotterranee verificatesi in Italia dal dopo guerra al 1990*. Mem. Serv. Geol. Naz. Vol. XLVII.
- Celico P. (1983) - *Idrogeologia dei massicci carsici, delle piane quaternarie e delle aree vulcaniche dell'Italia centro-meridionale (Marche e Lazio meridionali, Abruzzo, Molise e Campania)*. Quad. Cassa Mezzogiorno, 4 (2).
- Centamore E. & Nisio S. (1999) – *Quaternary morphodynamics between the Velino and Salto Valleys*. International workshops on Large-Scale vertical movements and related gravitational processes. Rome-Camerino, June 21-26, 1999. Abstracts, 45.
- Centamore E. & Nisio S. (2002 a) - *Quaternary Morfodinamic between the Velino and Salto Valleys*. Studi Geol. Camerti Vol Spec. (1999), 37-44.
- Centamore E. & Nisio S. (2002 b) - *Tettonica e sedimentazione (Lias-Pleistocene) nella media Valle del F. Salto (Rieti, Italia centrale)*. Studi Geol. Camerti. Il 2003, (in stampa).
- Centamore E. & Nisio S. (2003) - *The effects of uplift and tilting in the Central Apennine*. Quaternary international **101-102** (2003), 93-101
- Centamore E., Nisio S. & Sabatinelli A. (1999) – *Nuovi dati sull'assetto geologico-strutturale e morfotettonico della Piana di S. Vittorino ("zona d'incontro tra Umbria-Marche e Lazio-Abruzzi, Lazio nord-orientale- Rieti)*. Boll. Serv. Geol. Naz. (in stampa).
- Ciotoli G., Di Filippo M., Nisio S., Romagnoli C. (1998) - *La piana di S. Vittorino: dati preliminari sugli studi geologici, strutturali, geomorfologici, geofisici e geochemica*. Atti Conv. Giovani Ricercatori di Geologia Applicata. Chieti 22-24 Ott. 1998, Vol. abs. 200-201.
- Ciotoli G. Di Filippo M. Nisio S. & Romagnoli C. (2000) – *La Piana di S. Vittorino: dati preliminari sugli studi geologici, strutturali, geomorfologici, geofisici e geochemici*. Mem. Soc. Geol. It., **56**, 297-308.
- Colombi A., Salvati R., Capelli G., Sericola A., Colasanto F., Crescenzi R., Mazza R., Meloni F. & Orazi A. (1999) - *Problematiche da sprofondamento catastrofico nelle aree di pianura della Regione Lazio. Il Progetto Sinkhole del Lazio*. Convegno Conoscenza e salvaguardia delle aree di Pianura. Ferrara Italy, 8-11 Novembre 1999.
- CRAMER H. (1941) - *Die Systematik der karstdolinen*. Neues Jb. Miner. Geol Paläont., 85, 293-382.
- D'Amato Avanzi G., Puccinelli A., Verani M. (2002) – *La geologia della Piana di Camaiole in relazione al fenomeno di sprofondamento del 15 ottobre 1995*. In: Le voragini catastrofiche, un nuovo problema per la Toscana. Att. Conv. 31 marzo 2000, GR. Regione Toscana, 154-175.
- Del Zanna (1901) – *I laghi di S. Antonio in provincia di Siena*. Boll. Soc. Geol. It., VIII.
- Derbyshire E., & Mellors T. W. (1988) - *Geological and Geotechnical characteristic of some loess and loessic soil from China and Britain: a comparison*. Engineering Geology, **25**, 135-175.
- Derbyshire E., Wang J., Jin Z., Billard A., Egels Y., Kasser M., Jones D.K. C. Muxart T. & Owen L. (1991) – *Landslide in the Gansu loess of China*. Catena Supplement, **20**, 119-145.
- Di Filippo M., Palmieri M., Toro B. (2002) - *Studio gravimetrico del sinkhole di Doganella di Ninfa (Latina)*. In: Le voragini catastrofiche, un nuovo problema per la Toscana. Att. Conv. 31 marzo 2000, GR. Regione Toscana, 62-70.
- Di Loreto E., Liberi L., & Piro M. (1999) – *Riqualficazione ambientale del Geotopo di Lago Puzzo, Comune di Fiano Romano Roma*. Mem descr. Carta geol. D'It., **LIV**, 339-346.
- Dramis F. & Nisio S. (in stampa) - *Cenni di Geomorfologia*. Note Illustrative della Carta Geol d'Italia, F° 358, Pescorocchiano. Serv. Geol. Naz.;
- Faccenna C., Florindo F., Funicello R., & Lombardi S. (1993) – *Tectonic setting and Sinkhole Features: case histories from western Central Italy*. Quaternary Proceeding n.3, 47-56.
- Fairbridge (1968) – *The Encyclopedia of Geomorphology*. Ed. Reinhold, New York, 1968, 1295 pp.
- Ferrarese F. & Sauro U. (2001) – *Le doline: aspetti evolutivi di forme carsiche emblematiche*. Le Grotte d'Italia, 2, 25-38.
- Folgheraiter G. (1896) – *Sopra il nuovo Lago di Leprignano*. Frammenti concernenti la geofisica dei pressi di Roma, 3, 1-17, Roma.
- Ford D. & Williams P. W. (1989) – *Karst geomorphology and hydrology*. Unwin Hyman, London, 601 pp.
- Forti P. (2002) - *Evoluzione ipercarsica all'interno di acquiferi termali e in rapporto a possibili problemi di suffosione*. In: Le voragini catastrofiche, un nuovo problema per la Toscana. Att. Conv. 31 marzo 2000, GR. Regione Toscana, 11-26.
- Guerricchio A. (1982) - *Carsogenesi e movimenti gravitativi nelle formazioni carbonatiche dell'Appennino meridionale*. Atti II Symp. Int. "Utilizzazione delle Aree Carsiche", Geol. Appl. Idrogeol., **17** (2), 161-186, Bari .
- Jennings J.N. (1985) – *Karst geomorphology*- Kateprint Co. Ltd, Oxford, 293 pp..
- Klimchouk A., Lowe D., Cooper A. & Sauro U. (1997) – *Gypsum karst of the world*. Int. J. Speleol. 25 (3-4), 1996, 308 pp..
- Littlefield J.R., Culbreth M.A. Upchurch S.B., Stewart M.T. (1984) – *Relationship of modern sinkhole development to large scale-pholinear features*. In: Beck Barry F. (1984) Sinkholes: their geology, engineering & environmental impact. Ed. A.A. Balkema/Rotterdam/ Boston.
- Macaluso T., Madonia G., Palmieri A., Sauro U. (2002) – *Atlante dei karren nelle evaporiti della Sicilia (Atlas of the karren in the evaporitic rocks of Sicily)*. Quaderni del museo Geologico "G.G. Gemellaro", 5, Dip. Di Geologia e Geodesia, Università degli studi di Palermo, 143 pp.
- Meli R., (1896) – *Breve relazione delle escursioni geologiche eseguite all'isola del Giglio e al Lago nuovo di Leprignano*. Ann. Scuola Applicaz Ingegneri,



- 12-16. Roma.
- Michetti A.M., Brunamonte F., Serva L. & Whitney R.A. (1994) – *Seismic hazard assessment from paleoseismological evidence in the Rieti region, Central Italy*. Bull. Ass. Eng. Geologist. Spec. Vol., 63-82.
- Moderni P. (1896) – *Il nuovo lago e gli avvallamenti del suolo nei dintorni di Leprignano*. Boll. Regio Comit. Geol., 27: 46-57, Roma.
- Monroe W.H. (1970)- *A glossary of karst terminology*. U.S. Geol. Surv. Water Sup (1970).
- Mori A. (1983) – *Sulla formazione di alcuni laghetti presso Cittaducale*. In: la petrografia per tutti.
- Muxart T., Billard A., & Derbyshire E. & Wang J. (1994) – *Variation in Runoff on steep unstable loess slopes near Lanzhou, China: Initial results using rainfall simulation*. In: M. J. Kirby – Process models and theoretical geomorphology (1994), 337-355.
- Newton J.C. (1984)- *Review of induced sinkhole development*. In: Beck Barry F. (1984) Sinkholes: their geology, engineering & environmental impact. Ed. A.A. Balkema/Rotterdam/Boston.
- Newton J.C. (1987)- *Development of sinkholes resulting from man's activities in the eastern United States*. USGS C-968, 54 pp.
- Nisio S. (in stampa) – *Geologia applicata: Movimenti franosi*. In: Note Illustrative della Carta Geol d'Italia, F° 358, Pescorocchiano. Serv. Geol. Naz. (in stampa).
- Nolasco F. (1986) – *Sprofondamenti del terreno in località Sciamargutta presso Cotilia Terme*. Roma
- Nolasco F. (1998) – *La piana di S. Vittorino. Contributo allo studio dei processi evolutivi dei rischi e della prevenzione*. Regione Lazio- Acea.
- Patrizi (1967) - *Sullo stato attuale del Lago Puzzo (Fiano Romano Lazio)* Atti de XX Congr. Geograf. It. Marzo-aprile, 1967. Soc. Geogr. It.: 3-7, Roma.
- Ratti F. (1857) – *Sul laghetto di recente formazione nelle vicinanze di Leprignano*. In Corrsp. Scient. Di Roma, Scienze, 5, 65-69.
- Riccardi M. (1951) – *Nuove ricerche sulla Piana di S. Vittorino*. Boll. Soc. Geogr. It., IV, Fasc. V.
- Segre A.G. (1948) - *I fenomeni carsici e la speleologia del Lazio*. Ist. Geogr. Dell'Unv, XI, 239 pp., Roma
- Sinclair, W.C. (1982) – *Sinkhole development resulting from ground-water, development in the Tampa area, Florida*. USGS WRI, 81-50, 19pp.
- Sinclair W.C. & Stewart, J.W. (1985)- *Sinkhole type, development and distribution in Florida* .USGS MS-110, 1 plate
- Sweeting M.M. (1972) – *Karst landform*. Macmillan, London, 362 pp.
- Tenore G. (1872) – *Sulle azioni chimiche e meccaniche dell'acqua come cagioni attuali modificatrici nella Valle del Velino nel secondo Abruzzo Ulteriore (Piana di San Vittorino)*.
- Tihansky A.B. & Galloway D.L. (2000) – *Land and water-resource development activities increase sinkhole frequency in the mantled karst region of Florida*. USA. Proceedings Sixth International Symposium on Land Subsidence SISOLS 2000, Ravenna, Italy. 1, 77-90.
- VERRI A. (1886)- *La sorgente del Peschiera*. In: L'Annunziatore umbro-sabino. Anno IV, n°38.7
- White W.B. (1988) – *Geomorphology and Hydrology of carbonate terrains*. University Press, Oxford, 464 pp.
- Wilson W.L. & Shock E.J. (1996) - *New sinkhole data spreadsheet manual (v1,1)* Subsurface evaluation Inc., Tampa, Florida, 31pp.

Ms. ricevuto il 2 dicembre 2002  
 Testo definitivo ricevuto il 13 maggio 2003

Ms. received: December 2, 2002  
 Final text received: May 13, 2003