

# FENOMENI DI SPROFONDAMENTO CATASTROFICO. PROPOSTA DI CLASSIFICAZIONE APPLICATA ALLA CASISTICA ITALIANA.

**NISIO STEFANIA \* & SALVATI ROBERTO \*\***

\*APAT- Roma

\*\*Dipartimento Scienze Geologiche, Università Roma TRE

---

## RIASSUNTO

In questa nota viene affrontato il problema della classificazione dei fenomeni di sprofondamento catastrofico, soprattutto per cercare di proporre una razionalizzazione nell'uso e nella accezione di termini mutuati dalla letteratura anglosassone ed entrati ormai di diritto nel lessico scientifico italiano.

Ci si riferisce in particolare al termine sinkhole che nella letteratura, soprattutto statunitense, è utilizzato come sinonimo di doline (dolina), mentre nella terminologia italiana i due termini si devono necessariamente riferire a fenomeni di tipo diverso.

In questa nota verranno analizzati i fenomeni di sprofondamento catastrofico riconosciuti in Italia, ne verranno discusse le modalità di innesco e sviluppo e queste verranno utilizzate per formalizzare una proposta di classificazione dei sinkhole fondata non sulla morfologia dei fenomeni quanto sulle condizioni di localizzazione (sinkhole prone areas), innesco (triggering) e sviluppo (upward propagation).

Sostanzialmente ciò che distingue una dolina da un fenomeno di sprofondamento catastrofico è il fatto che nel primo caso l'evoluzione procede, ad opera di agenti esogeni (acque meteoriche, carsismo), dalla superficie verso il sottosuolo, mentre nel caso dei sinkhole l'innesco del fenomeno avviene ad opera di agenti endogeni (acque di circolazione sotterranea, flussi gassosi, collassi nel sottosuolo, etc.) e la propagazione della deformazione si sviluppa tutta dal basso verso l'alto all'interno della copertura che giace al di sopra del substrato carsificabile.

## INTRODUZIONE

Gli sprofondamenti catastrofici sono da sempre un fenomeno ben noto sia agli studiosi che alle popolazioni che vivono nelle aree soggette a questo tipo di evento. Fin da epoca storica si rinvengono segnalazioni e memorie di eventi di sprofondamento come negli scritti di Plinio il Giovane e di Vitruvio, risalenti al I sec a.C. o nel "De Prodigis" di Giulio Obsequente (636 ab urbe condita), e successivamente nei lavori di Dionigi di Alicarnasso, di Livio nel 550 d.c.. Numerose sono poi a partire dal XVI secolo, anche le iconografie che accompagnano gli scritti in cui si evidenzia come in numerose zone d'Italia i "sinkhole" fossero già una evidenza.

Venendo a tempi più recenti, i primi lavori di ricerca indirizzati allo studio delle forme carsiche risalgono alla fine dell' '800 nell'area del Carso Triestino, con un approccio nei confronti dei fenomeni di sprofondamento che fu sostanzialmente geomorfologico (CIVIČ, 1893). Solo nel 1941, ad opera di CRAMER (CRAMER, 1941), si ebbe la prima sistematica classificazione di fenomenologie carsiche in base ai processi genetico-evolutivi caratterizzanti. Sebbene i ricercatori europei ed italiani ne abbiano quindi gettato le basi, i maggiori progressi nello studio delle forme di sprofondamento catastrofico vanno riconosciuti però alla comunità scientifica americana che ha introdotto, alla fine degli anni sessanta, il termine sinkhole, riferendosi a voragini di forma sub-circolare che

si aprono improvvisamente nel terreno (FAIRBRIDGE, 1968; MONROE, 1970; NEWTON & HYDE, 1971; ALEY et al., 1972). In realtà, tale fenomeno, secondo una classificazione più tradizionale, rientrerebbe in alcune delle classi in cui si suddivide la più generica definizione di dolina. In particolare le definizioni di "dolina di collasso o crollo", "dolina alluvionale" e "dolina di subsidenza in roccia" (CASTIGLIONI, 1986), sembrano ben adattarsi alla descrizione dei processi genetico-evolutivi della maggior parte dei sinkholes.

Da qui la confusione e l'ambiguità che attualmente regna sia nella terminologia internazionale che, più localmente, in quella italiana. Il termine sinkhole nella accezione anglosassone e nordamericana non può essere mutuato tout court in quanto l'uso che i colleghi di oltreoceano ne fanno è sinonimica di dolina (MONROE, 1970; JENNINGS, 1985; WHITE, 1988; WHITE et al., 1995). Allo stesso tempo però c'è da sottolineare come la casistica dei fenomeni registrati in Italia trova una difficile interpretazione e collocazione nelle classificazioni attualmente in uso (TIHANSKY, 1999), soprattutto per quanto attiene alla localizzazione dei fenomeni ed alle condizioni geologiche s.l. di innesco e sviluppo (CAPELLI et al., 2000; CAPELLI & SALVATI, 2002; SALVATI & SASOWSKY, 2002).

Stanti queste premesse è evidente come lo studio dei fenomeni di sinkhole richieda necessariamente un approccio integrato, che permetta da un lato di acquisire i dati relativi alle diverse componenti geologiche, dall'altro di approntare modelli descrittivi, sia concettuali che quantitativi, che tengano conto dell'intero set di condizioni di innesco. In questa nota vengono proposti i criteri sulla base dei quali riconoscere una forma da sinkhole s.s. che possono essere sintetizzati in: (i) localizzazione in un'area con specifiche caratteristiche geologiche s.l.; (ii) tipologia di forme; (iii) modalità genetiche e di sviluppo. Come già si può evincere, il riconoscimento di una forma da sinkhole s.s. non è immediato né intuitivo, tanto più perché gli Autori ritengono che la definizione delle modalità di innesco e di sviluppo della deformazione siano un parametro indispensabile e che per definirlo necessitano indagini, o quantomeno una conoscenza del sottosuolo, nell'intorno della forma.

## **1. DEFINIZIONE DI UNA AREA A RISCHIO SINKHOLE (SINKHOLE PRONE AREA)**

La difficoltà di dare una classificazione soddisfacente dei fenomeni di sinkhole da un punto di vista genetico-evolutivo, risiede nel fatto che lo sviluppo di tali fenomeni è spesso legato alla coesistenza di più variabili, la cui trattazione non risulta sempre di facile analisi. Molteplici sono infatti i fattori che partecipano alla evoluzione di uno sprofondamento catastrofico, soprattutto se si tiene presente che le aree italiane in cui si verificano i fenomeni, sebbene geologicamente diverse, presentano un fattore unificante rappresentato dall'essere sempre aree di risorgenza delle acque sotterranee che circolano nei circuiti carsici all'interno delle dorsali carbonatiche.

A partire quindi da un modello semplificato, che prevede la presenza di uno spessore costituito da terreni di copertura al di sopra di un bedrock carsificato (SALVATI & SASOWSKY, 2002), numerose sono le variabili che influiscono sulle modalità e sui tempi di attivazione degli sprofondamenti catastrofici.

In linea generale gli Autori (FACCENNA et al., 1999; BIGI et al., 1999; BUCHIGNANI & CHINES, 2000; CAPELLI et al., 2000; CIOTOLI et al., 2000; ARGENTIERI et al., 2001b; COLOMBI et al., 2001; SALVATI et al., 2001a; SALVATI et al., 2000; CAPELLI & SALVATI, 2002; SALVATI & SASOWSKY, 2002; NISIO 2003) individuano un set di fattori che in Italia contribuiscono a caratterizzare un'area come potenziale Sinkhole Prone Area che può essere definito come segue:

- lo spessore dei materiali di copertura e quindi la profondità del bedrock carbonatico carsificato,
- l'entità e l'orientazione delle cavità carsiche nonché lo stato di stress e la presenza di fratture attive,

- Il valore dei parametri geotecnici dei terreni coinvolti,
- il posizionamento della falda,
- le modalità di scorrimento delle acque all'interno dei condotti carsici,
- l'effetto di sottospinta idrostatica delle acque in condizioni di confinamento,
- l'assenza di un moto verticale delle acque dall'alto verso il basso, sostituito, nei casi in cui l'acquifero carbonatico entri in collegamento con i terreni della copertura, da un movimento dal basso verso l'alto,
- la presenza di manifestazioni idrotermali o minerali, sia gassose che acquose, che testimonia l'esistenza di un circuito mineralizzato,
- la prossimità o la coincidenza con settori tettonicamente attivi sono tutti fattori, che, in condizioni particolari, possono convergere determinando l'attivarsi dei sinkholes

La definizione di una sinkhole prone area deve quindi necessariamente passare per la definizione del framework geologico e idrogeologico in cui alcuni dei fattori elencati poc'anzi rivestono indubbiamente un ruolo primario rispetto agli altri.

Osservando le evidenze e le considerazioni proposte dagli Autori che si sono interessati della definizione delle aree a rischio sinkhole (COLOMBI et al., 1999; BERTI et al., 2000; CAPELLI & SALVATI, 2002; Nisio, 2003) è stato possibile identificare gli elementi che costituiscono il quadro di riferimento generale della Sinkhole Prone Area tipo italiana.

Questi possono brevemente essere elencati come:

- bedrock carbonatico (o carsificabile in senso lato) sepolto, anche a profondità superiori ai 100 m;
- copertura di origine continentale a granulometria variabile, con scarse proprietà geomeccaniche in grande sebbene possano anche essere presenti spessori rilevanti di depositi coerenti o coesi;
- potente circolazione idrogeologica, nel bedrock, con: regime carsico, notevoli carichi idraulici, elevate portate e rilevante velocità;
- presenza di fluidi mineralizzati, che possono anche essere termominerali, in risalita da settori profondi che possono sia miscelarsi con le acque di circolazione carsica, sia assumere più classiche forme di convogli gassosi in upwelling;
- esistenza di lineamenti tettonici di carattere regionale, border e master faults, wrench faults e shear zones che svolgono il ruolo di "canalizzazione" della risalita dei fluidi e linee di sviluppo preferenziale delle deformazioni

In questo caso l'area di ricarica è rappresentata dai rilievi carbonatici presenti ai bordi delle piane, colmate da materiali di varia natura, prossime al livello di base (fiumi-mare). Le acque di circolazione degli acquiferi carbonatici, drenano verso il livello di base ed in parte emergono in corrispondenza del limite idrogeologico definito dal contatto fra i carbonati permeabili ed terreni di riempimento meno permeabili.

L'aliquota di acqua che non emerge al bordo dei rilievi viene invece drenata sia dai terreni di riempimento, dando luogo a più falde sovrapposte, che dal bedrock sottostante, dando luogo ad un acquifero in pressione.

A questo punto la risalita di fluidi profondi come CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, attraverso le discontinuità presenti nel bedrock, rigenerano quella condizione di aggressività, nelle acque presenti nel multi-layer di riempimento, persa da queste durante la lunga permanenza in acquiferi carbonatici.

Una rinnovata aggressività delle acque, unitamente a un movimento delle acque di falda rivolto verso l'alto, genera quindi una situazione favorevole all'innescarsi dei meccanismi di erosione chimica nel materiale carbonatico intercalato ai terreni di riempimento (ARGENTIERI et al., 2001a).

Come si può evincere da quanto detto finora, la identificazione delle aree a rischio, potenziale o conclamato, di sviluppo dei fenomeni di sinkhole introduce "a priori" una limitazione alla classificazione, e conseguentemente alla nomenclatura, delle forme. Secondo la tesi degli scriventi e tenendo presente i "criteri" secondo cui viene definita

una Sinkhole Prone Area, sono esclusi dalla classificazione tutti quei fenomeni e quelle forme che si verificano laddove: il substrato carbonatico è affiorante o soltanto coperto ma non sepolto, la circolazione idrica sotterranea non avviene in regime di confinamento, le acque di circolazione presentano una matrice idrogeochimica prossima o al di sopra della saturazione rispetto alla calcite, le cavità prodotte sono di natura antropica. Tutte le forme identificate in questi casi, quindi, sono secondo gli scriventi da classificare come tipiche forme carsiche o tipiche cavità antropiche e per esse non può quindi essere utilizzato il termine sinkhole, continuando invece ad usare il termine di dolina, in tutte le sue varianti o il termine di sprofondamento antropico. Altra alternativa sembra essere l'utilizzare il termine sinkhole con un'aggiunta di un attributo che ne chiarisca la genesi.

## 2. FORME DA SINKHOLE

I fattori di innesco, la genesi e lo sviluppo dei sinkhole in senso stretto sono sostanzialmente diversi da quelli delle doline in particolare, in considerazione del fatto che sostanzialmente i primi sono fenomeni che si generano e si propagano dal basso verso l'alto (hypogeous upward propagation), mentre le doline procedono per step successivi dalla superficie verso la profondità.

Ciononostante, le forme conclusive con cui i due tipi di fenomeni si presentano agli occhi degli studiosi sono molto simili e rappresentano probabilmente l'elemento di maggior difficoltà per discriminare un processo dall'altro.

Tralasciando la morfologia e morfometria delle doline che, oltre a non essere specifica di questa discussione è già stata ampiamente trattata da illustri Autori, tra cui solo per citarne alcuni (CVJIC, 1893; MONROE, 1970; CASTIGLIONI, 1986; WHITE, 1988; WHITE et al., 1995), è invece interesse degli scriventi spendere alcune parole sulla forma degli sprofondamenti da sinkhole.

In generale questi sprofondamenti sono delle forme erosive di forma sub-circolare e geometria imbutiforme, formatesi rapidamente e caratterizzate da un reticolo di drenaggio endoreico (WHITE, 1988; CANUTI, 1982; GALLOWAY et al., 1999; HYATT et al., 2001). Questa definizione estremamente generica, che potrebbe benissimo essere applicata anche alle doline, è resa più precisa se, come propongono gli scriventi, si aggiunge che gli sprofondamenti da sinkhole sono solo e unicamente quelli localizzati in aree di pianura (CANUTI, 1982; SALVATI & SASOWSKY, 2002; NISIO, 2003).

La forma e geometria sub o pseudo-conica dei sinkhole è stata rilevata da numerosi Autori nel corso di indagini batimetriche (OGDEN et al., 1989; BONO, 1995), di indagini geofisiche (STEEPLES et al., 1984; CHANG & BASNETT, 1995; KAUFMANN & QUINIF, 1999; ARGENTIERI et al., 2001b; DI FILIPPO et al., 2002;) o di investigazioni subacquee (CARAMANNA, 2001; GARY et al., 2003) ed è stata inoltre evidenziata da diversi lavori di modellizzazione analogica (WALEED & GOODINGS, 1996) o di simulazione numerica (WALEED, 1995; THARP, 1997; SALVATI et al., 2001b). Essa risponde strettamente alle modalità di sviluppo e di propagazione della deformazione che in termini semplificativi può essere assimilata allo sviluppo dei camini di collasso ben noti a chi si occupa di stabilità delle opere in sottoterraneo.

Concettualmente, la forma e la geometria dei sinkhole deriva da un processo che prevede, tralasciando per il momento le cause, l'innesco di uno "svuotamento" dal basso di un piccolo settore della copertura a contatto con il bedrock carbonatico (protocavità). Questo "svuotamento" si propaga quindi per "crolli successivi" attraverso l'intero spessore dei depositi di copertura assumendo, in funzione sia del leading issue (semplice ravelling piuttosto che un fenomeno di piping o suffusione, oppure la combinazione di questi ed altri processi), che della reologia e del comportamento meccanico dei mate-

riali interessati, geometrie che possono essere imbutiformi o di condotti pseudo-cilindrici. Il collasso finale, nel momento in cui la propagazione della deformazione arriva in prossimità della superficie, avviene in unica soluzione e porta alla genesi delle forme ad imbuto che tutti conoscono.

Nel caso in cui si verifichino le condizioni per una reiterazione del fenomeno nello stesso punto (CAPELLI et al., 2000), i sinkhole possono assumere forme meno definite e più articolate per la coalescenza dei diversi sprofondamenti (TUCCIMEI et al., in printing).

### 3. GENESI DEI SINKHOLE

Come più volte accennato, la genesi è l'elemento che caratterizza maggiormente gli sprofondamenti da sinkhole da quelli delle doline e soprattutto dai crolli di natura antropica che spesso erroneamente vengono associati alla stessa fenomenologia.

Ricordando quanto espresso nella descrizione delle aree a rischio da sinkhole, si evince chiaramente come i sinkhole siano il risultato di una serie complessa di interazioni tra diversi fattori e processi.

Sicuramente una distinzione primaria va fatta tra i fattori di innesco (triggering issues) e i fattori di sviluppo (developing issues). I primi sono gli elementi necessari per cui si possano creare le condizioni per la genesi degli sprofondamenti, sono intrinseci delle sinkhole prone areas ed è pertanto inutile richiamarli essendo già stati esposti in precedenza. I secondi sono invece quegli elementi che agevolano, favoriscono o comunque caratterizzano la propagazione della deformazione dal punto di innesco verso la superficie. Tra questi un ruolo di primo piano lo svolgono sicuramente le caratteristiche reologiche e le proprietà geomeccaniche dei terreni che costituiscono la copertura. Come esposto da THARP (1997, 1999 e 2000) il fenomeno dell'upward propagation può essere descritto con un modello di deformazione poroelastica dei terreni sottoposti a stress (si veda anche (SALVATI et al., 2001b ; GARBIN et al., 2004). Le cause che possono indurre stress e quindi innescare, nelle condizioni favorevoli, lo sviluppo di un sinkhole, sono molteplici tra cui occorre ricordare: (i) la decompressione brutale e repentina dell'acquifero carsico confinato; (ii) la "rottura" dell'interfaccia bedrock/copertura con conseguente innesco di un fenomeno di ravelling e quindi la creazione di microcavità; (iii) l'effetto di "pumping" dinamico che la falda carsica in pressione esercita sui terreni di copertura; (iv) la suffosione o piping che le acque di circolazione carsica potenti e veloci esercitano sui depositi a scarsa coesione.

Anche la propagazione verso l'alto della deformazione è direttamente dipendente dalla geomeccanica dei terreni interessati. Mentre, infatti, è intuitivo come una copertura composta di materiali non coesi si comporterà come la sabbia in una clessidra, fluendo senza soluzione di continuità verso il basso e propagandosi in progressione geometrica con una forma conica, la presenza di orizzonti o spessori di materiali coesivi o addirittura litoidi o pseudolitoidi, presenti pressoché ovunque nelle stratigrafie delle pianure italiane, imporrà alla propagazione della deformazione un avanzamento per step discreti. Questi, inoltre, produrranno delle geometrie non necessariamente coniche o pseudoconiche, bensì cilindriche proprio in virtù delle proprietà dei materiali più competenti. Proprio i terreni a più elevata competenza d'altronde rappresenteranno per la propagazione della deformazione un ostacolo o quantomeno un rallentamento che paradossalmente accresce la pericolosità di questo tipo di fenomeni.

Altri elementi importanti del developing issues set, sono: i già citati pumping e piping che la falda carsica esercita sui terreni della copertura una volta che si siano create le condizioni per uno "de-confinamento" locale. In altre parole, nel momento in cui, rotta l'interfaccia di confinamento tra acquifero carsico e copertura, la falda in pressione è libera di spingere sui terreni sovrastanti si possono innescare fenomeni di erosione

meccanica diretta dei terreni di copertura stessi e soprattutto, se le condizioni di circolazione carsica lo permettono, di trasporto solido ed allontanamento del materiale eroso da parte della circolazione idrica sotterranea.

A questo occorre poi aggiungere il non trascurabile effetto indotto dai convogli gassosi risalenti dal profondo e delle mutate condizioni idrogeochimiche prodotte dal miscelamento con fluidi mineralizzati. Questi due fattori giocano un ruolo di alterazione chimica dei terreni di copertura con conseguente erosione chimica o degradazione delle caratteristiche geomeccaniche dei terreni. I convogli gassosi inoltre possono esercitare un effetto di sottospinta che si aggiunge a quello esercitato dalla falda carsica artesia.

Elemento aprioristico rispetto a quanto detto finora è la presenza di discontinuità tettoniche o strutturali nel bedrock, che possono in alcuni casi essere anche lineamenti tettonici attivi che interessano gli stessi terreni di copertura, i quali rappresentano generalmente le vie preferenziali di sviluppo dei processi sopradetti e conseguentemente le zone in cui preferenzialmente si sviluppano i sinkhole (BROOK & ANDERSON, 1985; Veni, 1987; FACCENNA et al., 1993; FACCENNA et al., 1994; CAPELLI et al., 2000; KAUFMANN & QUINIF, 1999; Salvati et al., 2001a; SALVATI & SASOWSKY, 2002).

#### **4. SINKHOLE S.S. NELLA CASISTICA ITALIANA**

Stante quanto finora esposto, non tutti i fenomeni di sprofondamento catastrofico censiti nella casistica italiana possono essere identificati come sinkhole in senso stretto.

Una prima classificazione generale degli sprofondamenti vede la suddivisione in tre grandi classi di fenomeni in relazione ai processi genetici che li hanno originati, e cioè l'attività umana, le acque di infiltrazione, o i fluidi di risalita:

- i) sprofondamenti antropici (coincidenti con il termine di anthropogenic sinkhole),
- ii) fenomeni carsici;
- iii) fenomeni di sinkhole in senso stretto.

Non appare utile agli scriventi una classificazione ulteriore degli sprofondamenti antropici che sono riferiti al semplice collasso di volte originate dall'attività umana (cave, miniere, catacombe, scavi di varia origine etc.), con formazione di cavità con morfologia varia, non necessariamente sub-circolare.

Per quanto riguarda invece i fenomeni carsici sembra utile riportare la suddivisione genetica delle doline; la classificazione per questi fenomeni è relativa, oltre chiaramente alla dissoluzione dei materiali, al meccanismo che provoca la cavità in superficie. I meccanismi a cui sono riconducibili i fenomeni sono i seguenti:

- i) il crollo o collapse
- ii) la lenta subsidenza o subsidence
- iii) la sola dissoluzione o solution

Le cavità carsiche originate dal crollo di volta sono identificabili con :

dolina di crollo o collapse doline (coincidente con il termine anglosassone di collapse sinkhole ) e a loro volta suddivisibili in relazione alla natura dei materiali collassati (se roccia o copertura costituita da materiali sciolti).

Ulteriore suddivisione è cave collapse doline o cave collapse sinkhole, se la volta è costituita unicamente da rocce solubili, cover collapse doline o cover collapse sinkhole se è presente una copertura di modesto spessore costituita da terreni sciolti ma con una certa portanza naturale.

Tali forme carsiche si riconoscono per la morfologia delle pareti costituenti la cavità con caratteristica forma tronco-conica.

Le forme carsiche epigee dovute alla lenta subsidenza dei terreni prendono il nome di subsidence doline o doline di subsidenza (coincidenti con i subsidence sinkholes) a loro volta classificabili in relazione alla natura dei materiali costituenti il top:

la dolina di subsidenza in roccia (coincidente con il termine anglosassone di "rock subsidence sinkhole" o "subsidence doline") è una cavità formatesi su rocce coerenti e permeabili ma non solubili, poggiate su rocce solubili per crollo di volta (CASTIGLIONI, 1986); la dolina alluvionale o cover subsidence doline (coincidente con il termine anglosassone di cover subsidence sinkhole) è 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).

Le forme epigee in cui non si verificano crolli o altri movimenti coincidono con:

la dolina di soluzione normale o solution doline: (coincidente con il termine anglosassone di "solution sinkhole o dissolution sinkhole": conca chiusa originata per dissoluzione della roccia da parte dell'acqua di ruscellamento superficiale (CASTIGLIONI, 1986).

Per quanto riguarda i fenomeni di sinkholes in senso stretto gli scriventi si sono venuti convincendo che il termine, così come esposto nell'introduzione, vada anzi utilizzato con accortezza, proprio in virtù della difficoltà di definizione del fenomeno, onde non introdurre ambiguità nella terminologia.

In questa sede si propone quindi di definire come sinkhole i fenomeni descritti come segue:

- Cover Collapse Sinkhole – Il modello geologico concettuale necessario affinché si attivi un sinkhole di tipo cover-collapse prevede la presenza, al di sopra del bedrock, di una copertura costituita da materiali caratterizzati da un certo grado di coesione (GALLOWAY et al., 1999).

In questo caso i processi di piping non possono avere luogo e gli effetti della asportazione del materiale di copertura non vengono gradualmente trasmessi alla superficie topografica, proprio in virtù della portanza naturale dei terreni coinvolti.

Piuttosto, ciò che accade in questo caso, è la formazione di una cavità all'interno del materiale di copertura che si propaga dal tetto del bedrock verso l'alto (SASOWSKY et al., 1995; THARP, 1999, 2000) nel momento in cui il tetto della cavità raggiunge uno spessore tale da non poter più sopportare gli sforzi di taglio che vi agiscono, questo collassa repentinamente dando luogo a un cover-collapse sinkhole.

La caratteristica che contraddistingue questi sinkholes è la rapidità con la quale si attivano in superficie, peculiarità questa, che li rende spesso responsabili di conseguenze catastrofiche.

Da un punto di vista morfometrico i sinkholes di tipo cover-collapse possono presentare diametri e profondità che raggiungono le decine di metri, mentre morfologicamente si presentano con versanti molto acclivi, che, nel tempo, in seguito a processi erosivi, possono essere decisamente addolciti.

Questi sinkhole presentano nella quasi totalità dei casi un colmamento d'acqua riferibile alla falda multistrato della copertura.

- Piping Sinkhole – Questa classe di sinkhole viene in questa sede proposta per la prima volta sebbene in precedenti lavori degli scriventi fossero già state avanzati i concetti generali (Nisio, 2003; Tuccimei&Salvati, 2003). Ciò che distingue questi sinkhole, è il fatto che l'acqua di riempimento, mineralizzata fredda e con risalita di gas, del collasso presenta una prevalenza tale da renderla a volte artesiane al di sopra del piano campagna generando quindi delle sorgenti, da cui il nome anche di spring sinkhole usato da alcuni autori.

La coesistenza di acque mineralizzate e di emissioni gassose, sostanzialmente riconducibili a CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, assente o limitata in tutti gli altri fenomeni censiti nelle diverse aree, induce ad invocare un modello genetico ed evolutivo che si discosta da quelli comunemente accettati.

Sostanzialmente, quel che viene ipotizzato in questa sede, è un ruolo attivo e di primo piano svolto da quello che è stato definito come “fattore A/G” (Artesianismo/Gas), sia nella genesi che nello sviluppo di questo tipo di fenomeni. In particolare si pensa che, al momento della formazione di questi fenomeni, la risalita di acque miscelate a gas di origine profonda possa aver meccanicamente contribuito in maniera determinante all’attivazione degli sprofondamenti.

In altre parole, a differenza degli altri tipi di fenomeno, l’acqua presente all’interno di questi sinkhole sarebbe idraulicamente connessa alla circolazione idrica sotterranea attiva nel basamento carbonatico (TUCCIMEI et al., 2002; TUCCIMEI & SALVATI, 2003; TUCCIMEI et al., in printing); ovvero in questo tipo di sinkhole la quota di imposta della deformazione sarebbe proprio quella del tetto del bedrock carbonatico, indipendentemente dalla profondità a cui esso è posto. La falda in pressione, indotta dal differenziale idraulico rispetto alle zone di alimentazione poste nei massicci limitrofi, risalirebbe lungo discontinuità tettoniche (FACCENNA et al., 1993), agevolata anche dalla presenza di convogli gassosi in risalita dal profondo.

L’azione combinata di aggressione chimica, legata alla rinnovata aggressività delle acque conferitagli dal mixing con i fluidi gassosi acidi, e di aggressione meccanica, indotta dal moto turbolento che si innescherebbe nelle fratture in allargamento, nonché dal rimescolamento provocato dal materiale che progressivamente vi precipita, porterebbe ad una accelerazione dei fenomeni di propagazione della deformazione all’interno della copertura, rendendo così possibile il verificarsi di questi fenomeni anche laddove questa raggiunge spessori dell’ordine del centinaio di metri.

Sulla base di tale ipotesi è stato introdotto per questo tipo di sinkhole il termine classificativo di spring-sinkholes.

## **5. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE**

Questo lavoro ha inteso fornire un contributo allo studio dei fenomeni di sprofondamento da sinkhole, cercando di proporre degli elementi a supporto di una più razionale classificazione e terminologia dei fenomeni in oggetto.

L’uso del termine sinkhole come sinonimo di dolina, oltre che scientificamente erronea, può indurre sbagli nella valutazione della pericolosità dei fenomeni studiati. Quanto esposto in questa nota, in merito alla genesi ed allo sviluppo dei sinkhole s.s., pone l’accento sul rischio costituito da un fenomeno di cui è di fatto impossibile prevedere l’occorrenza e per il quale è estremamente difficile definire alcun tipo di prevenzione, che non sia quella fondata su una dettagliata conoscenza del territorio e su una normativa di gestione dello stesso, relativamente alle aree a rischio, che tenga conto dei processi coinvolti e che limiti al massimo le perturbazioni indotte in situazioni metastabili, come di fatto sono le sinkhole prone areas.

## **RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI**

ALEY, T.J., WILLIAMS, J.H. & MASSELLO, J.W. (1972). Groundwater contamination and sinkhole collapse induced by leaky impoundments in soluble rock terrains. *Engineering Geology* **5**.

ARGENTIERI, A., CAPELLI, G., LORETELLI, S., SALVATI, R. & VECCHIA, P. (2001a). La pericolosità da sinkhole nel territorio della Provincia di Roma: il caso di Marcellina. *Centro Studi Orsa Maggiore, Castro Marina (LE)*.

ARGENTIERI, A., VECCHIA, P., LORETELLI, S., REITANO, R., SCIARRA, P., PIRO, M., FABIANI, M., CAPELLI, G., SALVATI, R., PAROTTO, M., DI FILIPPO, M., TORO, B., RUSPANDINI, T., CECCHINI, F. &



- MARGOTTINI, S. (2001b). Il sinkhole di Marcellina (Roma): Indagini geologiche, geotecniche, idrogeologiche e geofisiche. Accademia dei Lincei, Rome.
- BERTI, G., CANUTI, P. & CASAGLI, N. (2000). Some examples of sinkhole in Italy and preliminary report on the Grosseto case. Regione Toscana, Camaiore (LU).
- 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, Ferrara, Italy.
- BOND, P. (1995). The sinkhole of Doganella (Pontina Plain, Central Italy). *Environmental Geology* **26**.
- Brook, G.A. & Anderson, T.L. (1985). Fracture mapping and ground subsidence susceptibility modeling in covered karst terrain: the example of Dougherty County, Georgia. Balkema, Rotterdam.
- BUCHIGNANI, V. & CHINES, C. (2000). Risultati delle indagini sulla voragine verificatasi a Camaiore (Toscana). Regione Toscana, Camaiore (LU).
- CANUTI, P. (1982). Ambienti geologici investigati nell'ambito del sottoprogetto fenomeni franosi. In "Progetto Finalizzato Conservazione del Suolo." CNR, Rome.
- CAPELLI, G., PETITTA, M. & SALVATI, R. (2000). Relationships between catastrophic subsidence hazards and groundwaters in the Velino Valley (Central Italy), Ravenna, Italy.
- CAPELLI, G. & SALVATI, R. (2002). Il Progetto Sinkhole del Lazio. Dip. Sc. Geologiche Univ. Roma TRE & Regione Lazio Ass.to U.T.V.R.A., Rome.
- CARAMANNA, G. (2001). Scientific utilization of scuba diving and ROV techniques in an inland flooded sinkhole in the Latium Region (Central Italy) for the hydrogeologic and geochemical study of the karst water resource. FIST, Chieti.
- CASTIGLIONI, G. B. (1986). Geomorfologia. UTET.
- CHANG, K. & BASNETT, C. (1995). Delineation of sinkhole boundary using DutchCone soundings. *Engineering Geology* **52**.
- CIOTOLI G. DI FILIPPO M. NISIO S. & ROMAGNOLI C. (2000) – La Piana di S. Vittorino: dati preliminari sugli studi geologici, strutturali, geomorfologici, geofisici e geochimici. *Mem. Soc. Geol. It.*, **56**, 297-308.
- COLOMBI, A., SALVATI, R. & CAPELLI, G. (2001). Sinkhole in Latium Region (Central Italy). Purposes of the Main Project. In "Geotechnical and Environmental applications of karst geology and hydrology." (J., Beck B.F. & Gayle Herring, Ed.). Balkema, Louisville, KY - U.S.A.
- 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., Ferrara.
- CRAMER, H. (1941). *Die Systematik der Karstdolinen*.
- CVJIC, J. (1893). *Das Karstphaenomenon*. Geol. Abhandl. Wien.
- DI FILIPPO, M., PALMIERI, M. & TORO, B. (2002). Studio gravimetrico del Sinkhole di Doganella di Ninfa (Latina). Regione Toscana, Grosseto.
- FACCENNA, C., FLORINDO, F., FUNICIELLO, R. & LOMBARDI, S. (1993). Tectonic settings and sinkhole features: case histories from Western Central Italy. *Quaternary Proceedings* **3**.
- FACCENNA, C., FUNICIELLO, R., MONTONE, P., PAROTTO, M. & VOLTAGGIO, M. (1994). Late Pleistocene strike-slip tectonic in the Acque Albule basin (Tivoli, Latium). *Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia* **49**, 37-50.
- FAIRBRIDGE, C. (1968). *The Encyclopedia of Geomorphology*. Reinhold Ed., New York.
- GALLOWAY, D.L., JONES, D.R. & INGEBRITSEN, S.E. (1999). Land subsidence in the United States. USGS.
- GARBIN, F., SCARAPAZZI, M., CIANCI, S., CAPELLI, G., SALVATI, R., ALBANESE, G. & STORONI, S. (2004). Esempio di caratterizzazione geotecnica finalizzata alla definizione del rischio in un'area interessata da fenomeni di sprofondamento catastrofico (Tor Tre Ponti, Latina). APAT, Rome.
- GARY, M.O., SHARP, J. M., CARAMANNA, G. & HAVENS, R.S. (2003). Volcanically influenced speleogenesis forming "El Sistema Zacatòn" (Mexico) and "Pozzo del Merro" (Italy),

the deepest phreatic sinkholes in the world. Geological Society of America, Seattle.

HYATT, J.A., WILSON, R., GIVENS, J.S. & M.JACOBS, P. (2001). Topographic, geologic, and hydrogeologic controls on dimensions and locations of sinkholes in thick covered karst, Lowndes County, Georgia. In "Geotechnical and environmental applications of karst geology and hydrology." pp. 37-45. Proceedings of eighth multidisciplinary conference on sinkholes 1-4 April, 2001. A. A. Balkema, Lisse, The Netherlands.

JENNINGS, J.N. (1985). Karst geomorphology. Basil Blackwell, New York.

KAUFMANN, O. & QUINIF, Y. (1999). Cover-collapse sinkholes in the Tournaisis area, southern Belgium. *Engineering Geology* **52**, 15-22.

MONROE, W.H. (1970). A glossary of karst terminology. U.S.G.S. Water SUP.

NEWTON, J.G. & HYDE, L.H. (1971). Sinkhole problem in and near Roberts Industrial Subdivision Birmingham, Alabama. Geological Survey of Alabama.

NISIO, S. (2003). I fenomeni di sprofondamento: stato delle conoscenze ed alcuni esempi in Italia centrale. *Il Quaternario* **16**, 121-132.

OGDEN, A.E., CURRY, W.A. & CUMMINGS, J.L. (1989). Morphometric analysis of sinkholes and caves in Tennessee comparing the Eastern Highland Rim and Valley and Ridge physiographic provinces. In "Engineering and environmental impacts of sinkholes and karst." pp. 135-142. Proceedings of third multidisciplinary conference on sinkholes 2-4 October, 1989. A.A. Blakema Publishers, Brookfield, Vermont.

SALVATI, R., CAPELLI, G. & COLOMBI, A. (2001a). Catastrophic subsidence risk assessment: a conceptual matrix for sinkhole genesis. In "Geotechnical and environmental applications of karst geology and hydrology." (Beck B.F., Gayle Herring J., Ed.), pp. 159-162. Balkema, Rotterdam.

SALVATI, R., CAPELLI, G. & SASOWSKY, I.D. (2000). Conceptual model for development of collapse sinkhole in areas of groundwater discharge, Central Italy. GSA, Reno, Nevada.

SALVATI, R. & SASOWSKY, I.D. (2002). Development of cover collapse sinkholes in areas of groundwater discharge. *Journal of Hydrology* **264**.

SALVATI, R., THARP, T. & CAPELLI, G. (2001b). Conceptual model for geotechnical evaluation of sinkhole risk in the Latium Region, Louisville, Kentucky.

SASOWSKY, I.D., WHITE, W.B. & WEBB, J.A. (1995). Acid mine drainage in karst terranes: geochemical considerations and field observations. A.A. Balkema.

STEEPLES, D.W., KNAPP, R.W. & MILLER, R.D. (1984). Examination of sinkholes by seismic reflection. In "Sinkholes: Their geology, engineering & environmental impact." pp. 217-223. Proceedings of first multidisciplinary conference on sinkholes 15-17 October, 1984. A.A. Blakema Publishers, Accord, Massachusetts.

THARP, T.M. (1997). Mechanics of formation of cover-collapse sinkholes. In "The engineering geology and hydrogeology of karst terranes." pp. 29-36. Proceedings of sixth multidisciplinary conference on sinkholes 6-9 April, 1997. A.A. Balkema Publishers, Brookfield, Vermont.

THARP, T.M. (1999). Mechanics of upward propagation of cover-collapse sinkholes. *Engineering Geology* **52**.

THARP, T.M. (2000). Cover-collapse sinkhole formation and piezometric surface draw-down. P.E. LaMoreaux and Associates, Louisville, Kentucky.

TIHANSKY, A.B. (1999). Sinkholes, West-Central Florida. 121-141.

TUCCIMEI, P., DELITALA, M.C., CONFORTI, M., SALVATI, R. & GARELLO, M. (2002). Excess Radon distribution in water samples from sinkholes in groundwater discharge areas (Pontina Plain, Central Italy), Denver, CO.

TUCCIMEI, P. & SALVATI, R. (2003). New Hydrochemical Data on the deep-seated groundwater circulation in the Pontina Plain (Central Italy). Geological Society of America, Seattle, WA.

TUCCIMEI, P., SALVATI, R., DELITALA, M.C. & CAPELLI, G. (in printing). Radon tracing of groundwater input into a cover collapse sinkhole within the discharge zone of a karst aquifer (Green Lake, Pontina Plain, Central Italy). *Applied Geochemistry*.

- VENI, G. (1987). Fracture permeability: Implications on cave and sinkhole development and their environmental assessments. In "Karst hydrology: engineering and environmental applications." pp. 101-105. Proceedings of second multidisciplinary conference on sinkholes 9-11 February, 1987. A.A. Blakema Publishers, Accord, Massachusetts.
- WALEED, A.A. (1995). Centrifuge modeling of sinkhole development in weakly cemented sand. Unpublished PhD thesis, University of Maryland.
- WALEED, A.A. & GOODINGS, D.J. (1996). Modeling of sinkholes in weakly cemented sand. *Journal of Geotechnical Engineering* **122**.
- WHITE, W.B. (1988). *Geomorphology and hydrology of karst terrains*. Oxford University Press, New York.
- WHITE, W.B., CULVER, D.C. & HERMAN, J.S. (1995). Karst lands. *American Scientists* **83**.

