

## **I *sinkholes* delle aree di pianura in Italia: considerazioni sugli aspetti genetici ed evolutivi**

*The sinkholes in the italian plain areas:  
consideration about genetic and evolution view*

---

GUARINO P.M. (\*), NISIO S. (\*), SANTO A. (\*\*)

### **1. - CONTESTO TERRITORIALE E PECULIARITÀ GEOLOGICHE E MORFOLOGICHE**

Lo stato dell'arte relativo ai *sinkholes* in zone di pianura in Italia è riferito a circa 850 casi distribuiti in oltre 170 aree, localizzate in molte regioni, ma con una diffusione maggiore nell'Appennino centro-settentrionale.

Nel presente studio sono stati considerati gli sprofondamenti naturali che interessano terreni sciolti (coperture, sedimenti alluvionali, marini, terreni piroclastici).

Molti sprofondamenti si riscontrano nelle pianure costiere e alluvionali, o in conche intramontane, talora con substrato roccioso affiorante (molti casi sono segnalati in Puglia, Friuli Venezia-Giulia, Veneto, Lazio); per la maggior parte, si tratta però di fenomenologie riconducibili a fenomeni di dissoluzione carsica, pertanto tali casi non sono stati approfonditi in questa trattazione. Come già richiamato nel capitolo introduttivo, non sono stati inoltre trattati i pur numerosi casi di sprofondamento in cui le attività antropiche hanno svolto un ruolo determinante e diretto nella formazione delle cavità sotterranee che hanno dato poi origine agli sprofondamenti in superficie (estrazione mineraria, immissione e/o estrazione di liquidi nel sottosuolo,

vibrazioni, ecc.), mentre sono state considerate quelle situazioni in cui le attività antropiche hanno svolto un ruolo marginale e/o di innesco nell'attiversi del fenomeno di sprofondamento.

Per quanto riguarda il contesto geologico-geomorfologico nel quale si riscontrano i *sinkholes*, si possono individuare alcuni tipi principali.

In diversi casi, le aree sono localizzate all'interno di grandi conche intramontane bordate da massicci carbonatici come nel caso della Valle dell'Aterno, in Abruzzo, o dei bacini endoreici del Lazio e della Campania. In questi settori, alcuni fenomeni di *sinkholes* si aprono ai bordi della piana, impostandosi su conoidi alluvionali o su terreni alluvionali. Depressioni sub-circolari da ricondurre a carsismo coperto sono presenti sui terrazzi alluvionali di alcune aree di pianura dell'Umbria.

In altre zone, gli sprofondamenti interessano ampie pianure alluvionali interne, solcate da importanti corsi d'acqua come nel caso del fiume Liri, nel Lazio, del fiume Aterno, in Abruzzo, o del fiume Volturno, in Campania. Le pianure alluvionali presentano talvolta un'estensione più limitata, o interessano le fasce pedemontane caratterizzate da pendenze modeste; in alcuni casi, i *sinkholes* risultano originati in zone pianeggianti, legate ad aggradazione di depositi piroclastici da caduta (Campania).

---

(\*) ISPRA - Dipartimento Difesa del Suolo - Servizio Geologico d'Italia - Servizio Geologia Applicata e Idrogeologia.

(\*\*) Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Geotecnica ed Ambientale (Sezione Geologia Applicata), Università di Napoli "Federico II".

In Calabria, i fenomeni risultano generalmente impostati in valli intramontane di origine tettonica, bordate da affioramenti di substrato cristallino/metamorfico. Tali depressioni ospitano potenti successioni sedimentarie marine di età miocenica, con coperture continentali quaternarie. I fenomeni segnalati si rinvergono, generalmente, lungo i corsi d'acqua, su affioramenti di alluvioni recenti (in alcuni casi, fissate dalla vegetazione). Tra i contesti interessati dai fenomeni censiti nel presente lavoro, ben rappresentati risultano quelli manifestatisi nelle piane costiere, come nel caso della Piana Pontina, nel Lazio, di quella di Camaiore, Sant'Eufemia, in Calabria, e del Golfo di La Spezia in Liguria.

Infine, meno frequenti appaiono i casi di sprofondamento nell'ambito di piccole conche intercollinari, ovvero in piccole depressioni tettoniche con presenza di depositi alluvionali di modesto spessore (poche decine di metri) che ricoprono versanti a debole pendenza, tipici dei paesaggi dei rilievi argillosi della Toscana.

In Puglia, i *sinkholes* risultano talvolta impostati su terrazzi costieri o deposizionali, in presenza di calcareniti carsificabili.

In Sicilia sono molto frequenti i fenomeni di sprofondamento carsico. I *sinkholes* nelle aree di pianura, che non interessano direttamente il substrato, sono più rari, causati per lo più dalla dissoluzione di lenti di gesso; interessano le successioni mioceniche marine poco permeabili con spessori di alcune decine di metri.

In Sardegna nell'ultimo ventennio si è registrato un aumento dei fenomeni di sprofondamento con formazione di voragini nelle pianure dell'Iglesiente. I fenomeni, strettamente connessi alla circolazione idrica sotterranea, sono stati probabilmente innescati dalle oscillazioni della tavola d'acqua, a loro volta causate dall'attività antropica, e si originano su terreni continentali-alluvionali a granulometria variabile.

Nelle pianure del Veneto ed in Emilia-Romagna, soprattutto in Pianura Padana alla confluenza del Po con l'Adige, sono presenti numerosi laghi di forma sub-circolare.

La formazione di tali specchi d'acqua, noti nella forma dialettale con il nome di *gorghi*, è generalmente associata a rotte fluviali (laghetti di rotta) o ad ingressioni marine. La loro genesi è imputabile a processi di *evorsione* (fenomeni erosivi legati a turbolenze ad asse verticale) a carico di corpi sedimentari caratterizzati da discreti spessori di materiali sabbiosi e/o a processi di sifonamento e *suffosione*. Per dovere di completezza pertanto il censimento si è esteso anche a tali casi che presentano analogie genetiche e danno origine a forme omologhe ai *sinkholes* s.s.

Nelle pianure e conche interne del Veneto, del Friuli e della Provincia Autonoma di Bolzano, i fenomeni di sprofondamento sono strettamente controllati dalla dissoluzione dei litotipi evaporitici e carbonatici (Calcarea a *Bellerophon*) che si rinvergono al di sotto di una copertura generalmente di modesto spessore, e sono riconducibili, pertanto, a fenomeni di *cover-collapse sinkhole*.

Anche in Friuli, durante l'evento sismico del 1976, ed in alcune località del Molise si sono originate morfologie circolari connesse alla liquefazione dei terreni.

In estrema sintesi, in Italia i *sinkholes* si sviluppano quindi prevalentemente nei contesti geologico-geomorfologici delle conche intramontane, o nelle grandi pianure (sia interne che costiere) e lungo i loro bordi.

Un dato interessante scaturisce dall'esame dei terreni coinvolti: fatta eccezione per alcuni casi, soprattutto in Puglia ed in Sicilia, dove affiorano formazioni calcarenitiche, quasi tutte le fenomenologie censite hanno evidenziato la presenza di sedimenti fini alluvionali, o di piroclastiti rimaneggiate granulometricamente assimilabili a limi, limi sabbiosi e sabbie. Solo in pochi casi, gli sprofondamenti interessano travertini e depositi più grossolani di conoide.

Relativamente al substrato, esso è quasi sempre costituito da calcari mesozoici; in pochi casi (Toscana, Calabria, Campania), il substrato profondo è costituito da terreni argillosi, con bassi valori di permeabilità. Per quanto riguarda la profondità del substrato, in numerosi casi esso viene riscontrato a più di 50 metri dal p.c., sino ad oltre 80-100 metri.

Per quanto riguarda l'assetto idrogeologico, la falda risulta spesso affiorante o sub-affiorante, come testimoniato dalla frequente formazione di laghi, talora perenni. Nelle diverse aree interessate dagli sprofondamenti, viene frequentemente segnalata la presenza di falde in pressione.

Questo primo censimento dei *sinkholes* nelle aree di pianura italiane permette di effettuare alcune considerazioni sulla genesi di tali fenomeni, partendo dall'osservazione dei fattori causali geologici e geomorfologici che accomunano le aree studiate.

Per i casi in cui è stato possibile rinvenire notizie, se ne è appurata la genesi improvvisa, con sprofondamenti profondi circa 20-30 metri. Meno chiare sono risultate le relazioni con gli eventi innescanti (soprattutto per quanto riguarda gli eventi meteorici e sismici). Nel primo caso, l'afflusso idrico legato alle precipitazioni (come pure allo scioglimento della copertura nevosa o anche alle pratiche irrigue) può infatti favorire l'intensificarsi dei processi di erosione sottocuta-

nea *sensu* CASTIGLIONE, 1986 e, quindi, consentire la manifestazione in superficie degli effetti geomorfici ad essa associati. Nel secondo caso, in concomitanza degli eventi sismici, il passaggio delle onde sismiche può provocare, in un terreno granulare saturo, unitamente al rapido cambiamento dell'assetto dei granuli, anche un incremento della pressione di poro. Se questa raggiunge i valori della pressione litostatica determinata dal carico dei materiali soprastanti, si produce la liquefazione del terreno. In alcuni casi particolarmente favorevoli, tale fenomeno può anche tradursi nella fuoriuscita violenta di sabbia mista ad acqua dal terreno, con formazione di vulcanelli di sabbia/fango ed eventuali sprofondamenti associati.

Solo per pochi casi studiati si conosce con buona approssimazione la data di origine. La contemporaneità e/o il lieve differimento temporale con gli eventi sismici sono stati verificati per alcuni di essi (soprattutto in Calabria). Con riferimento ai dati attualmente disponibili, non sembra emergere una netta correlazione tra intensità macrosismica epicentrale (MCS) e distanza dall'epicentro dei *sinkholes* sismoindotti. La distribuzione dei punti non evidenzia una significativa crescita della distanza epicentrale ( $d$ ) all'aumentare dell'intensità epicentrale ( $I_s$ ) - vd paragrafo successivo.

La genesi dei vuoti o delle liquefazioni profonde rimane ancora controversa; in alcuni casi, i ricercatori tendono ad attribuire la formazione dei *sinkholes* alla risalita di fluidi dal substrato, lungo faglie attive (es. Toscana e Lazio). In altri casi (es. alcuni casi in Campania e nel Lazio), si tende invece ad escludere questa possibilità per la notevole profondità del substrato, pur ammettendo la possibilità di fenomeni di liquefazione da imputare a scosse sismiche o alla variazione del carico idraulico della falda.

Solo su di un numero limitato di *sinkholes*, sono state ad oggi condotte indagini ed analisi di dettaglio, e sono state avviate campagne di monitoraggio - come nei casi di Camaiore in Toscana, San Vittorino nel Lazio, di Forino in Campania e di S. Basile in Calabria.

La raccolta di ulteriori dati stratigrafici, idrogeologici e geotecnici costituisce certamente un elemento di fondamentale importanza per poter chiarire la genesi dei *sinkholes* nelle aree di pianura e per poter effettuare le prime zonazioni di pericolosità associate a questi fenomeni.

I *sinkholes* si sviluppano, infatti, frequentemente in zone pianeggianti, ovvero in zone potenzialmente interessate dall'urbanizzazione (quando non già urbanizzate). In diversi casi, essi hanno storicamente già manifestato il loro

potenziale distruttivo, coinvolgendo strutture ed infrastrutture antropiche - come avvenuto a Camaiore (Lucca) nel 1995.

## 2. - CONSIDERAZIONI SULLA CLASSIFICAZIONE DEI FENOMENI DI SPROFONDAMENTO APPLICATA ALLA CASISTICA ITALIANA

La proposta di classificazione riportata in NISIO & SALVATI, 2004, NISIO *et alii* 2007 distingue i fenomeni di sprofondamento sulla base della loro genesi e dei meccanismi di propagazione e innesco dei fenomeni.

Non sempre risulta agevole o immediato classificare dal punto di vista genetico-evolutivo un fenomeno di sprofondamento; tale difficoltà, risiede nel fatto che lo sviluppo di tali fenomeni è spesso legato al ruolo svolto da più fattori, il cui peso risulta non sempre agevole da identificare.

Molteplici sono infatti i fattori che concorrono alla genesi e alla evoluzione di uno sprofondamento, anche se si tiene presente che le aree italiane trattate nel presente volume, sebbene geologicamente diverse, presentano un fattore comune rappresentato dall'essere aree di pianura con presenza di falde alimentate da circuiti idrogeologici profondi.

In ogni caso, è possibile suddividere gli sprofondamenti sul territorio italiano in alcune grandi classi (pagg. 17-32) in funzione dei processi genetici che li hanno originati: attività umane, processi carsici, acque di infiltrazione e fluidi di risalita, da cui derivano: sprofondamenti antropici; fenomeni carsici; fenomeni di evorsione o suffosione superficiale; fenomeni di *piping* profondo.

Nella presente monografia delle varie segnalazioni pervenute (di cui alcune rivelatesi fenomeni di origine antropica o vulcanica) si è scelto di trattare i casi più peculiari di *sinkholes* s.s., non sono stati discussi gli sprofondamenti di origine antropica (crolli di volte di cavità antropiche) né i fenomeni di dissoluzione e di subsidenza carsica (fig. 1).

I fenomeni censiti e analizzati nei capitoli precedenti riguardano i processi che possono definirsi *pseudocarsici* (attribuibili a carsismo coperto, in presenza di coperture terrigene di elevati spessori), nonché a fenomeni di suffosione e/o *piping*.

In tale ambito i fenomeni analizzati sono stati imputati a processi carsici (*cover collapse sinkhole* o *cave collapse sinkhole*) per crollo di volte (costituite da terreni litoidi, es. travertino) e/o a crolli della copertura terrigena, a fenomeni di *deep piping* accertati o presunti, e a fenomeni di suffosione o evorsione (pagg. 17-32).

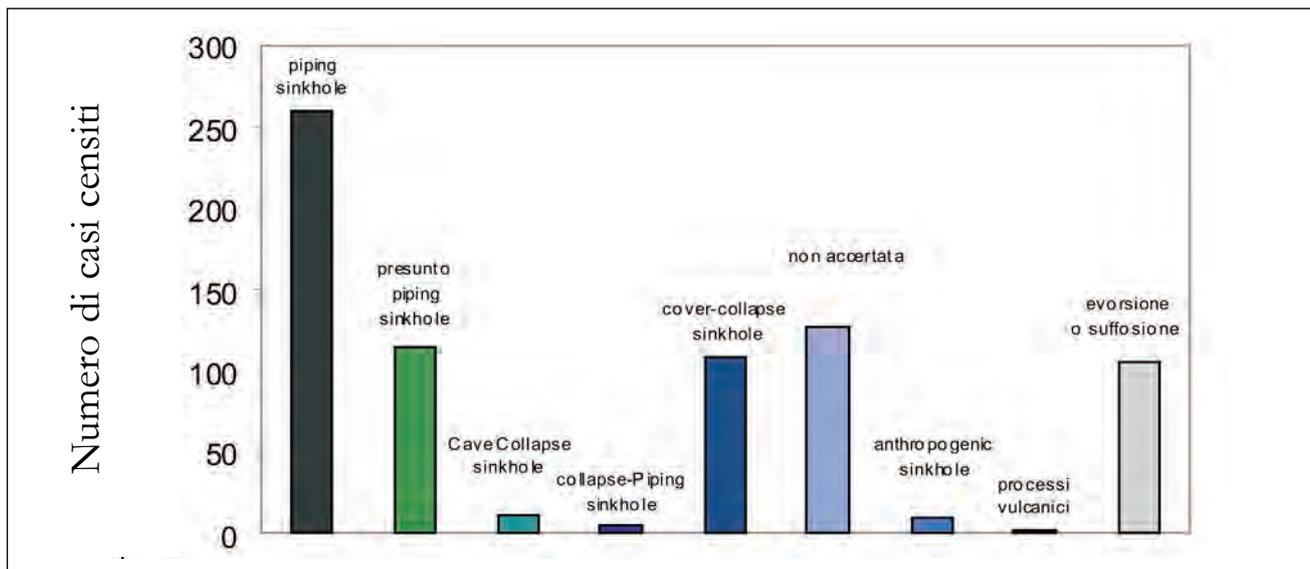


Fig. 1 - Classificazione dei fenomeni censiti studiati. - *Censed and studied sinkholes classification.*

*Sprofondamento per crollo della volta o della copertura (comprende i cave collapse sinkholes e i cover collapse sinkholes).*

Tra i *sinkholes* esaminati, un certo numero è stato attribuito a cavità formatesi per crollo della volta di cavità carsiche (FORD & WILLIAMS, 1989) con effetti potenzialmente catastrofici. Nella maggior parte dei casi si tratta di crolli di orizzonti di travertino che si trovano associati a terreni alluvionali a granulometrie variabili (*cave collapse sinkhole*).

La forma della cavità originatasi tende ad allargarsi verso il basso, con pareti che assumono un profilo tronco-conico.

Tale tipo di sprofondamento può originarsi anche in presenza di terreni di copertura al di sopra del substrato carsificato, con richiamo improvviso verso l'ambiente sotterraneo dei materiali costituenti la volta e della sovrastante copertura. In tali casi (ne sono stati individuati più di 100) la morfologia della cavità è risultata pseudo cilindrica ed i materiali terrigeni coinvolti hanno presentato range estremamente variabile di granulometrie (*cover collapse sinkhole*).

*Sprofondamento per evorsione/suffosione (evorsion or suffosion sinkhole).*

I casi esaminati in Appennino settentrionale (più di 100 casi) sono risultati per lo più classificabili come depressioni originate per processi di evorsione e suffosione (*evorsion or suffosion sinkhole*). Tali casi si presentano come laghi di forma sub-circolare (gorghi o laghetti di rotta), diametro compreso tra 30 e 100 m e profondità fino ad un massimo di circa 15 m. Essi sono ubicati in corrispondenza di zone di confluenza di grandi porta-

te d'acqua. Risultano spesso ubicati ai piedi di un argine fluviale, in corrispondenza di una rotta, o in depressioni morfologiche nel luogo di convergenza di acque tracimate, oppure in punti in cui queste hanno dovuto attraversare strutture lineari come argini, dossi, cordoni litoranei. Si formano in terreni prevalentemente sabbiosi, con un ruolo fondamentale svolto da processi di suffosione superficiale e di sifonamento.

*Sprofondamento per piping profondo (deep piping sinkhole).*

La gran parte dei casi censiti (circa 380 casi) ed analizzati nel presente volume sono stati attribuiti a *deep piping sinkhole* (NISIO, 2003; NISIO *et alii*, 2007; CARAMANNA *et alii*, 2008), o presunti tali (120 casi). Essi si originano per un meccanismo profondo di erosione dal basso che interessa coperture a granulometria variabile ma prevalentemente fini (argille siltose o limi con spessori superiori a 100 m), impermeabili o semipermeabili (NISIO, 2003; TUCCIMEI & SALVATI, 2003; NISIO & SALVATI, 2004). L'acqua di falda, molto spesso mineralizzata e ricca di gas, presenta una prevalenza tale da divenire a volte artesiane, generando quindi delle sorgenti. Sarebbe proprio la coesistenza di acque mineralizzate e di emissioni gassose, sostanzialmente riconducibili a CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S, che induce ad invocare un modello genetico ed evolutivo che si discosta da quelli richiamati in precedenza. Si può pertanto ipotizzare un ruolo di primo piano svolto da artesianismo e gas, sia nella genesi che nello sviluppo di questo tipo di fenomeni. In altre parole, l'acqua presente all'interno dei *sinkholes* sarebbe idraulicamente connessa alla

circolazione idrica sotterranea del basamento carbonatico (NISIO, 2003; TUCCIMEI & SALVATI, 2003; NISIO & SALVATI, 2004) e risalirebbe, in pressione, lungo discontinuità tettoniche (FACCENNA *et alii*, 1993).

Il modello geologico concettuale affinché si verifichi un *sinkhole* di questo tipo prevede la presenza, al di sopra del substrato carsificato, di un potente pacco (50-200 m) di depositi di copertura, generalmente consistenti in depositi alluvionali con granulometrie variabili, in senso verticale e laterale, dalle argille-sabbiose, ai limi, alle sabbie, alle ghiaie. Associazioni sedimentarie di questo tipo determinano nell'intero pacco un certo grado di coesione e una portanza naturale. L'azione erosiva operata dai fluidi in pressione, provenienti dal substrato, determinerebbe un progressivo ampliamento di vuoti in profondità, con possibile migrazione verso l'alto. La propagazione verso l'alto è direttamente dipendente dalle caratteristiche geotecniche dei terreni interessati. Mentre, infatti, è intuitivo che una copertura composta di materiali privi di coesione si comporta come la sabbia in una clessidra, fluendo senza soluzione di continuità verso il basso e dando origine a una cavità di forma conica, la presenza di orizzonti di materiali coesivi o addirittura litoidi o pseudo-litoidi, imporrà alla propagazione un avanzamento per fasi discrete. Queste, inoltre, produrranno delle geometrie variabili da coniche o pseudo-coniche a cilindriche.

Quando lo spessore della volta della cavità così prodotta diventa esiguo, la fase evolutiva finale consiste nel crollo improvviso della copertura (in analogia ai *cover collapse* di WALTHAM *et alii*, 2005).

Alcuni Autori ritengono che i fenomeni di sprofondamento per *piping* sono favoriti dalla presenza di discontinuità tettoniche o strutturali nel substrato (FACCENNA *et alii*, 1993; CIOTOLI *et alii*, 2001; NISIO, 2003; NISIO & SALVATI, 2004; FERRELI *et alii*, 2004; CARAMANNA *et alii*, 2008), che in alcuni casi possono corrispondere a lineamenti tettonici attivi. Essi costituiscono le vie preferenziali di sviluppo dei processi sopradetti e, conseguentemente, condizionano l'ubicazione in superficie degli sprofondamenti (VENI, 1987).

Tali fenomeni si manifestano per l'intensificarsi dei processi erosivi a causa di una favorevole combinazione di condizioni: l'azione chimica, legata alla rinnovata aggressività delle acque derivante dal mescolamento delle stesse con fluidi gassosi acidi; l'aggressione meccanica, indotta dal moto turbolento dei fluidi nelle fratture in allargamento; ulteriore effetto meccanico, prodotto dal materiale trasportato dal fluido in risalita.

In conclusione, la proposta di classificazione dei *sinkholes* in Italia avanzata in NISIO & SALVATI,

2004, NISIO *et alii*, 2007 CARAMANNA *et alii*, 2008, appare sostanzialmente in grado di fornire un quadro complessivo della genesi dei casi riscontrati sul territorio italiano. Rimane un numero di casi per i quali, la mancata disponibilità di dati e la complessità del contesto non consentono l'inserimento in una delle classi individuate.

### 3. - PROBLEMATICHE INERENTI IL TRASPORTO DEL MATERIALE

Un tema ancora controverso in letteratura è quello che riguarda il trasporto e l'accumulo del materiale che collassa per effetto dello sprofondamento.

Si tratta di un fenomeno solo eccezionalmente oggetto di osservazione diretta.

Il trasporto verticale del materiale, dalla superficie verso il fondo, è strettamente connesso alla propagazione verso l'alto di un vuoto originatosi all'interno dei terreni di copertura.

Il terreno collassato può essere compattato o trasportato in profondità per processi gravitativi, andando a colmare cavità carsiche presenti nel substrato; esso però può anche subire, almeno parzialmente, un trasporto orizzontale, in presenza di un vero e proprio circuito di drenaggio del materiale, ovvero di un reticolo carsico sotterraneo ben sviluppato e/o di paleo-reticoli carsici.

Il fattore che influenza in maniera determinante i movimenti verticali (dall'alto verso il basso) che avvengono lungo le fratture presenti nella copertura alluvionale, al tetto del substrato, è la posizione della superficie piezometrica e sue oscillazioni: (WHITE, 1995; THARP, 1999).

Quando la falda si trova al di sopra del tetto dell'interfaccia substrato/copertura, l'azione combinata delle forze di galleggiamento e della pressione idrostatica di controspinta, che agisce sui materiali posti al di sopra della cavità, unitamente al lento fluire del materiale nei condotti carsici, genera un ritardo dei processi di caduta del materiale di copertura (WHITE, 1995) determinando una lenta evoluzione del *sinkhole*. È stata osservata, a questo proposito, una diretta connessione fra i fenomeni di sprofondamento e le oscillazioni della superficie piezometrica (TIHANSKY, 1999) in aree interessate da intensi emungimenti delle falde più o meno profonde, o in occasione di periodi di intensa siccità alternati a periodi di alluvionamento.

THARP (1997, 1999, 2002), mediante un approccio analitico alla modellizzazione del fenomeno (*poroelastic analysis*), asserisce che, quando si verifica l'abbassamento della superficie piezometrica al di sotto dell'interfaccia substrato/copertura, i terreni soprastanti il substrato, posti ai margi-

ni di un'ipotetica cavità iniziale, subiscono una sorta di rottura idraulica a causa della perdita delle forze di galleggiamento e dell'aumento del gradiente della pressione di poro, generando così una propagazione verso l'alto del vuoto iniziale, internamente ai terreni di copertura stessi. Inoltre l'Autore suggerisce che, ammettendo un vuoto iniziale in seno ai terreni di copertura di forma sferica, i processi di rottura idraulica possano agire con intensità direttamente proporzionale al raggio della cavità stessa.

Il trasporto orizzontale invece può avere luogo nel momento in cui, alla base dei condotti carsici sub-verticali (attraverso i quali avvengono i primi processi di caduta del materiale di copertura), si verificano le condizioni di presa in carico e di rimozione del materiale. Bisogna quindi ipotizzare delle vere e proprie modalità di trasporto solido che si localizzano alla base dei condotti sub-verticali e che, instaurandosi all'interno di cavità carsiche attive, si evolvono, rispetto a quelli, lungo direttrici orientate tangenzialmente.

Altri Autori, invece, propongono modelli diversi, che escludono la presenza di un substrato carsificabile (HOFFMAN *et alii*, 1998; ARKIN & GILAT, 2000) dimostrando che i vuoti responsabili del collasso si possano formare anche in terreni granulari per fenomeni di suffosione ed eversione. Durante tale processo il trasporto orizzontale del materiale avviene per erosione meccanica del materiale fine o per erosione di un terreno poroso incoerente attraverso un filtro per effetto dello scorrimento *subsuperficiale*. Quest'ultimo secondo la definizione originaria di (CASTIGLIONI, 1986), è lo scorrimento dell'acqua in pressione (TOMLINSON & VAID, 2000) lungo delle linee di flusso discrete con elevata velocità e moto turbolento che può essere anche innescato da un adattamento della falda ad un nuovo livello di base indotto, come nel caso del Mar Morto, da una regressione del livello del mare (ARKIN & GILAT, 2000). Questo processo, funzione del rapporto tra le dimensioni granulometriche tra terreno e terreno filtro ( $D_{15f}/D_{85t} > 12$ ), dà origine a canalicoli a sviluppo sub-orizzontale, condotti tubolari o cavità lungo le linee di flusso.

Simili meccanismi, peraltro suffragati da dati stratigrafici ed idrogeologici, sono segnalati lungo il perimetro del Mar Morto (ARKIN & GILAT, 2000), nella piana del fiume Santa Cruz a Tucson in Arizona (HOFFMAN *et alii*, 1998) e nella conca endoreica di Forino in Campania (DEL PRETE *et alii*, in stampa) dove la variazione da flussi laminari a turbolenti in zone discrete lungo il percorso delle linee di flusso in subalveo, causa il dilavamento dei materiali a granulometria sottile e la formazione di vuoti sotterranei.

#### 4. - PROBLEMATICHE CONNESSE ALLE CAUSE INNESCANTI: GLI EVENTI SISMICI

Dall'analisi dell'insieme dei dati presenti in letteratura, emerge che, tra i fattori predisponenti, esercita un ruolo predominante il contesto geologico-strutturale, in cui è condizione ricorrente, in una elevata percentuale delle aree suscettibili, la presenza di lineamenti sismogenetici attivi, di sistemi di faglie che si intersecano, di reticoli di fratture che possono mettere in comunicazione il substrato con la copertura alluvionale (NISIO, 2003; NISIO & SALVATI, 2004; NISIO *et alii*, 2007; CARAMANNA *et alii*, 2006, 2008).

Tra le cause innescanti, gli Autori sottolineano spesso la possibilità di connessione tra un evento sismico, verificatosi il giorno stesso o alcuni giorni prima del fenomeno e la formazione dello sprofondamento.

Tuttavia, manca sovente una puntuale verifica da parte degli Autori dell'effettiva connessione tra evento sismico e sprofondamento; non è mai stata accertata, ad esempio, la relazione (se esiste) tra il tempo che può intercorrere tra il verificarsi di un terremoto, l'intensità e la formazione di uno sprofondamento, né la distanza massima dall'epicentro alla quale (in relazione all'intensità del sisma) è possibile un risentimento sul terreno.

In realtà, come si è visto nella descrizione delle singole regioni, sono numerose le cronache, relative ai grandi terremoti appenninici, che descrivono l'apertura di voragini (possibili *sinkholes*) in seguito a scosse sismiche di cui, in alcuni casi, si è persa quasi completamente la memoria storica e di cui vengono di seguito riportate alcune narrazioni.

Riguardo al terremoto di Boiano (CB) del 853 d.C., BARATTA (1901) riporta: *In tale anno Boiano fu da un disastroso terremoto subissata: si dice inoltre che nel luogo della Città siasi formato un grande lago di acqua dolce.*

In occasione del terremoto del 5 dicembre 1456 le cronache narrano che, in diverse località dell'Appennino meridionale (Benevento, Isernia, Napoli, Castellammare di Stabia, Ascoli Satriano e Fornelli), si aprirono fenditure e voragini nel terreno e si intorbidirono le acque delle sorgenti. Gli effetti più rilevanti furono registrati a Boiano (CB), che fu sommersa dalle acque, probabilmente a causa di una frana che interruppe il corso del fiume Biferno e a Castel di Sangro, che fu investita da una frana staccatasi dal monte soprastante. BARATTA (1901) riporta: *Le antiche memorie parlano di città state inghiottite, di laghi formati, di squarciature aperte nel terreno esalanti pestilenziali gas e vapori.*

Nel terremoto del 7 ottobre 1639 ad Amatrice (RI) in un vigneto di proprietà dei frati francescani fu osservato un "avvallamento superficia-

le”; ad Accumoli (RI) alcune sorgenti si estinse-  
ro, altre si intorbidirono.

Durante il terremoto del 23 luglio 1654 tra Isola del Liri e Sora (FR) si aprì una grande voragine; inoltre, una larga fenditura si aprì sul monte Corvo (massiccio del Gran Sasso).

In occasione del terremoto del gennaio-feb-  
braio 1703, nell’Appennino centrale, nelle provin-  
cie di Rieti e L’Aquila si originarono molti spro-  
fondamenti anche di grandi dimensioni. Le nume-  
rose scosse causarono rilevanti aspetti sull’ambien-  
te; in particolare sono descritte voragini e spac-  
cature nel terreno, fuoriuscita di materiale  
inflammato e di gas sulfurei, dissesti e variazioni  
del corso dei fiumi, formazione di piccoli laghi.  
Ne abbiamo testimonianza dagli scritti di  
Francesco Cappa il quale raccolse alcune memo-  
rie relative alla scossa del 2 febbraio del 1703.  
L’Autore riporta l’apertura di voragini di grandi  
dimensioni che si aprirono improvvisamente nei  
paesi di Sigillo e Lucoli (RI) e da cui fuoriusciva-  
no “fiaccole di fuoco e fumi”.

L’Autore descrive, in particolare, la voragine di  
Sigillo (AQ), apertesi in un’area adibita a pascolo,  
che sembra fosse molto lunga (circa venticinque  
canne) e molto larga (circa venti canne) e la cui pro-  
fondità non fosse calcolabile per mancanza di  
strumenti idonei alla misurazione. Allo stesso  
evento sono attribuiti alcuni *sinkholes*, tutt’ora pre-  
senti, nella Piana di S. Vittorino (CARLETTI, 1787;  
FLORES, 1981) e quelli che si aprirono presso il tor-  
rente Pizzoli (AQ) nel bacino del fiume Aterno.

Lo stesso sisma ha prodotto l’apertura di  
molte voragini in Umbria, nel bacino del Tevere,  
presso la piana di Norcia.

Nelle cronistorie del terremoto del 3 novembre  
1706, sono descritte spaccature del terreno a  
Pettorano sul Gizio (AQ) e a Caramanico (AQ); in  
particolare, una grande fenditura da cui uscirono  
gas solforosi si aprì nelle vicinanze della Maiella,  
dove vennero anche uditi dei rombi sotterranei.

Nel terremoto della Calabria del 1783 si formarono  
alcune cavità presso Rosarno, altri sconvolgimen-  
ti furono osservati presso Oppido, Spezzano,  
Crosoleto, S. Cristina, Castellane, Sinopoli, Terranova  
etc. (BARATTA, 1901). Alcune cronache riportano:  
*durante il terremoto le scosse e i vulcani di Fango di S. Sisto a  
12 km da Cosenza e di Torre del Ponte della Sila Piccola,  
compirono una fortissima eruzione... Non pochi cittadini degni  
di fede asserirono che a Rosario uscirono dal suolo acque fan-  
gose scottanti... (RICCIARDI, 1910). BARATTA (1901) scri-  
ve... Questo ordine di fenomeni fu la causa precipua della pro-  
duzione dei laghi nei territori di Seminara, Sinopoli, Cosoletto,  
Stizzano, Castellane. S. Cristina, di Oppido, di Drosi e di  
Malocchio di ciascuno dei quali Vivenzio ci dà estensione e pro-  
fondità ed i lavori fatti per il loro prosciugamento.*

Le descrizioni del terremoto di S. Anna del 26  
luglio 1805 (CAPOZZI, 1834; ESPOSITO *et alii*, 1990,  
PORFIDO *et alii*, 2007), a cui viene attribuita la for-  
mazione o la riattivazione di alcuni *sinkholes* (Lago  
delle Corrée, Lago La Quaglia) riportano la for-  
mazione di voragini, liquefazione di terreno e for-  
mazione di nuove sorgenti mineralizzate; alcune  
vengono segnalate presso Morcone (BN) “...si  
osservano nelle vicinanze della taverna, dove aprirono delle  
orribili voragini per un tratto di un terzo di miglio, alcune  
delle quali avevano rovesciato il terreno all’altezza di più  
di sei palmi, e di cui la latitudine era oltre i tre palmi con  
proporzionata lunghezza...qui un fonte accrebbe le sue  
acque, che ha dato picciol senso di zolfo. Qui stesso sgorgò  
un nuovo fonte saliente...in questo luogo è sorto anche un  
altro fonte che dà solo creta...” (CAPOZZI 1834).

Da BARATTA (1901) vengono riportate le  
seguenti cronache riguardanti il confine campano-  
molisano: *Nel dì seguente al terremoto, verso la metà del  
Monte di Boiano, si aprirono due profonde voragini: in  
Acquaviva ed Isernia, un bosco di 20 miglia circa di cir-  
conferenza fu interamente sconvassato, il terreno aperto e  
gli alberi divelti. Fra Calitri e Castiglione successe un feno-  
meno identico e si aprì pure una fenditura di un miglio di  
lunghezza e di 5 palmi di larghezza. Nella regione “Piano  
della Cretta” presso S. Bartolomeo in Galdo, si formò uno  
spacco ovale comprendente circa 100 moggia di terreno.  
Presso S. Giorgio la Molara un ponticello di dura roccia  
si infranse, il terreno adiacente si innalzò di 40 palmi ed  
in vicinanza si aprì una voragine entro cui si gettarono le  
acque del Tammaro che diedero luogo alla formazione di  
un vero lago...*

Nell’area di Telese è ormai certa la correlazio-  
ne tra l’emergenza delle acque sulfuree, i *sinkholes*  
ed importanti eventi sismici (ROSSI, 1857;  
IANNACCHINO, 1900; RICCARDI, 1927, pagg. 149-  
212).

IANNACCHINO (1900) attribuisce la ricomparsa  
delle sorgenti sulfuree a seguito dell’evento sismi-  
co del 1349. ROSSI, (1857) riporta che durante il  
terremoto del 1349 si formarono molti sprofonda-  
menti sul colle Pugliano che subirono allarga-  
menti ed approfondimenti durante l’evento sismi-  
co del 1805 (pagg. 149-212)

La conferma che il lago di Telese si sia formato  
per sprofondamento durante l’evento del 1349 è  
palese nella cronaca di GAUTHIER (1910) che ripor-  
ta quanto segue (pagg. 149-212): “... Rimasero così  
allo scoperto delle cavità circolari più o meno grandi, veri  
imbuti, le cui pareti son fatte da calcare dolomitico, riempite  
d’acqua, dando luogo a stagni e laghetti, dei quali ancora  
oggi se ne riscontra uno accosto alla strada ferrata, chiama-  
to lago di Telese. Gli altri più piccoli come gli stagni sono  
stati prosciugati per ragione di bonifica, ed oggi ancora si veg-  
gono alcune cavità circolari all’asciutto, massime lungo il  
viale che dallo stabilimento mena alla stazione ferrovia-

ria...”.

Dei casi riportati in letteratura, alcuni appaiono particolarmente interessanti perché gli studi finora condotti permettono una analisi della distanza tra i *sinkholes* formatisi e gli epicentri degli eventi sismici innescanti (figg. 2, 3, 4).

Nell'area di Telese (BN) risulta una distanza tra epicentro e *sinkhole* di 65 km circa, per l'evento sismico del 1349 e di circa 32 km per l'evento sismico del 1805.

Relativamente alla Piana di S. Vittorino, si hanno numerose segnalazioni di sprofondamenti conseguenti a eventi sismici (tab. 1), come quella relativa al *sinkhole* formatosi all'interno della chiesa omonima indotto dall'evento sismico del 1703 (CARLETTI, 1787), o come quelle riportate in RICCARDI, 1951; MORI, 1983; MICETTI *et alii*, 1994.

Anche per la Piana di S. Vittorino è possibile effettuare una stima della distanza epicentro/*sinkhole* (fig. 3).

Anche la formazione della voragine presso Camaiole nel 1995 è stata correlata ad un episodio sismico avvenuto qualche giorno prima, con

epicentro in Lunigiana (BUCHIGNANI, 2002; BUCHIGNANI & CHINES, 2002; D'AMATO AVANZI *et alii*, 2002). La distanza dall'epicentro al sito è risultata di 33 km (fig. 4).

In aggiunta alle situazioni di maggiore interesse e/o più evidenti, sopra descritte, in figura 5 vengono riportate la distanza dall'epicentro e l'intensità del terremoto dalle aree ove si sono prodotti *sinkholes*.

## 5. - RAGGRUPPAMENTI DI *SINKHOLES* IN BASE AL CONTESTO GEOLOGICO-MORFOLOGICO

I fenomeni di *sinkholes* registrati in Italia sono accumulati dall'aver alcune caratteristiche ricorrenti, coincidenti con una serie di fattori indispensabili per il loro innesco e la loro propagazione, tuttavia in un'analisi di dettaglio gli stessi si differenziano per una serie di altre caratteristiche minori, riscontrabili solo dopo lo studio e il confronto di centinaia di casi.

Tab. 1 - Fenomeni di sprofondamento nella piana di S. Vittorino innescati da eventi sismici.  
- *Sinkholes* in the St. Vittorino plain induced by seismic events.

| <i>Sinkhole</i> | N. di Casi | Anno formazione                        | Data terremoto                      | Epicentro           | Distanza      | Is all'epicentro | Is al sito | Giorni dall'evento sismico |
|-----------------|------------|--|-------------------------------------|---------------------|---------------|------------------|------------|----------------------------|
| S. Vittorino    | 1          | 14/1/ 1703                             | 14/01/1703<br>2/02/1703             | Norcia<br>L'Aquila  | 32 km - 21 km | 100 90           | 95         | 0                          |
| S. Vittorino    | 2          | 19-22/sett.<br>1891                    | 14/07/1891<br>1/10/1891<br>9/4/1895 | Trevi               | 50 km         | 65               |            | 66?                        |
| S. Vittorino    | 2          | 2/1/2039                               | 1/23/2039                           | Rieti               | 4 km          | 60               | 60         | 9                          |
|                 |            |  |                                     | Castelritaldi       | 56 km         | 60               |            |                            |
| S. Vittorino    | 3          | 1/1/2040                               | 26/05/1903<br>02/11/1903            | Rieti -<br>Norcia   | 11 km -57 km  | 50-60 60-70      |            | 23                         |
| S. Vittorino    | 7          | 31/01/1915<br>02/02/1915<br>03/02/1915 | 1/13/1915                           | Avezzano            | 55 km         | 110              | 75-80      | 18 - 21                    |
| S. Vittorino    | 1          | 7/5/1933                               | 7/3/1933                            | Lama dei<br>Peligni | 95 km         | 90               |            | 2                          |
| S. Vittorino    | 1          | 1962                                   | 6/25/1962                           | Serravalle          | 51 km         | 60               |            | ?                          |
|                 |            |  | 20/10 1962                          | Baiano              | 43 km         | 70               |            |                            |
|                 |            |  | 9/12/1962                           | Alvito              | 100 km        | 55               |            |                            |
|                 |            |  | 12/14/1962                          | Alvito              | 100 km        | 60               |            |                            |
| S. Vittorino    | 1          | 9/27/2004                              | 9/27/2004                           | Monti<br>Reatini    | n.p.          | 30               |            | 1                          |

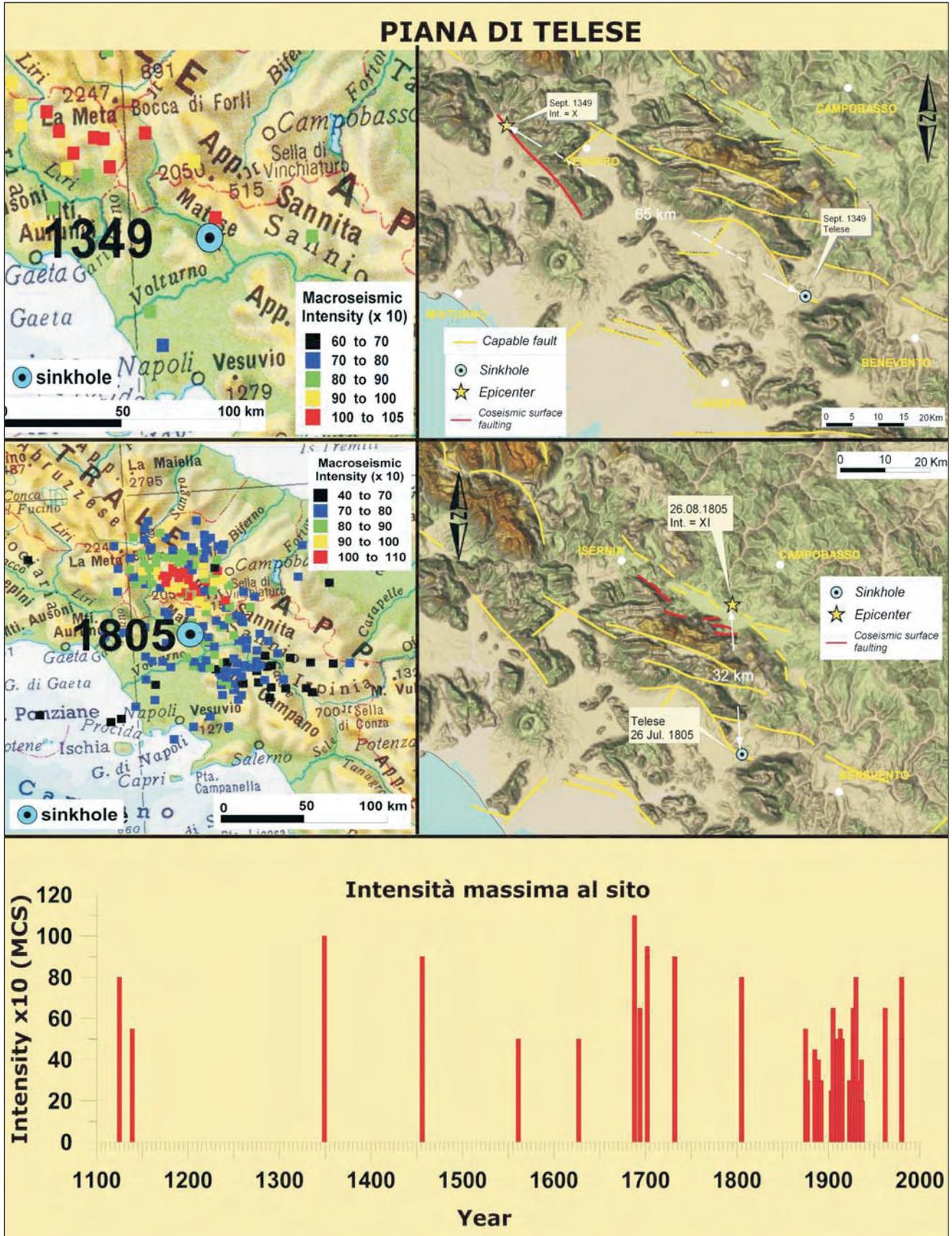


Fig. 2 - Teleso (BN): correlazione tra eventi sismici ed innesco di sinkholes (terremoti del 1349 e del 1805).  
 - Teleso (BN): correlation between seismic events and sinkholes trigger; some examples for the earthquakes of the 1349 and 1805.

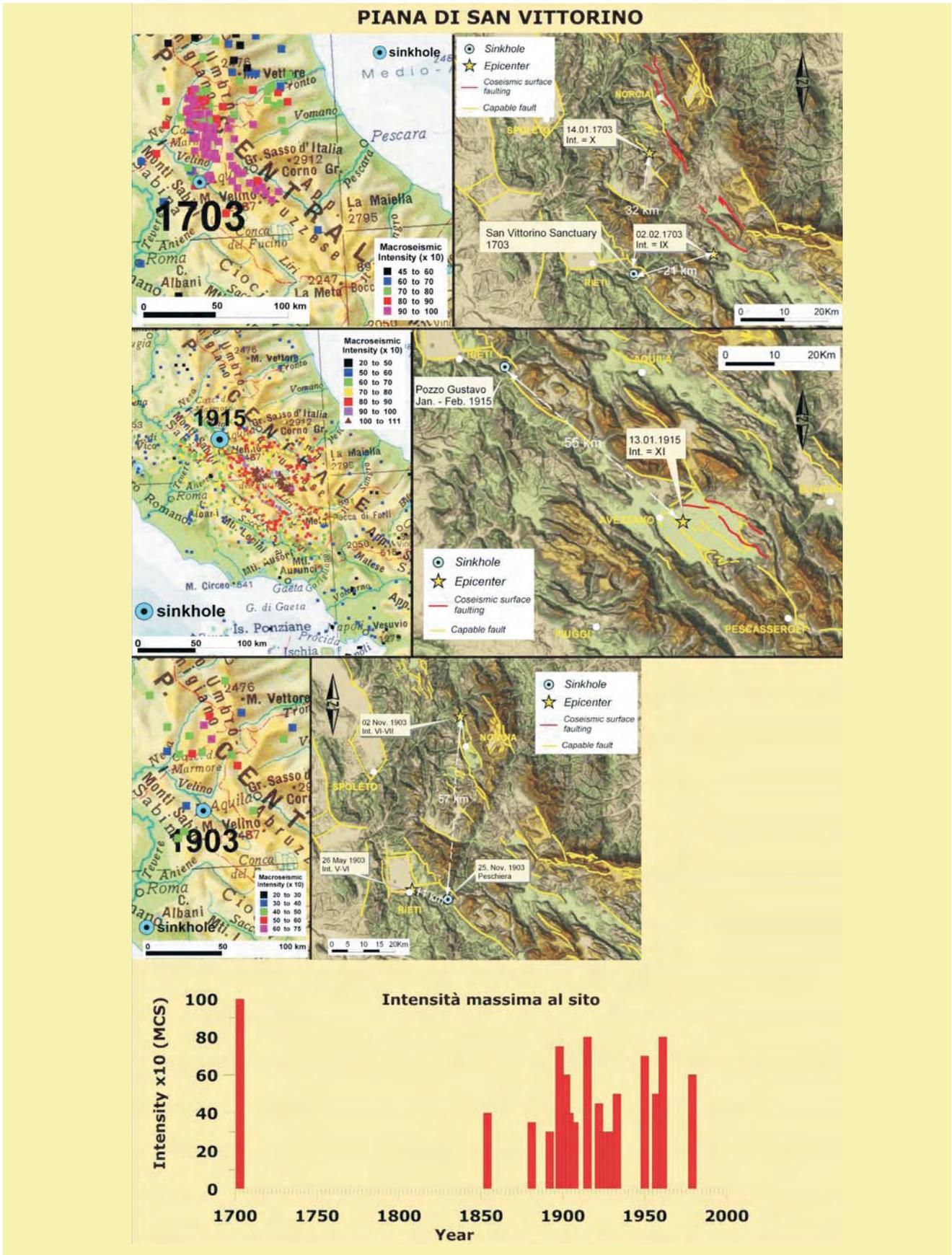


Fig. 3 - Piana di S. Vittorino (Cittaducale - RI): correlazioni tra eventi sismici ed innesco di *sinkhole*.  
 - St. Vittorino Plain (Cittaducale - RI): correlation between seismic events and sinkhole triggering.

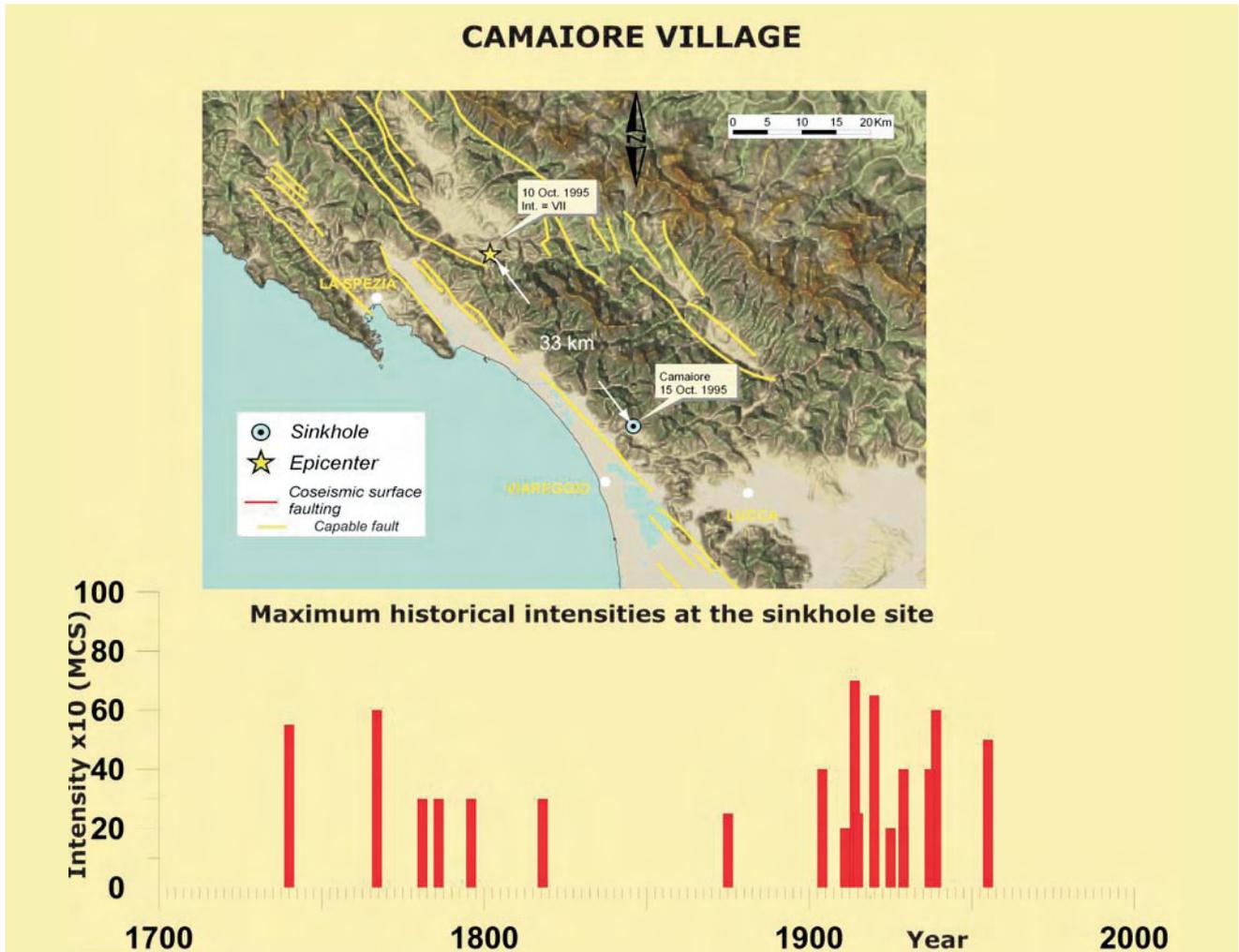
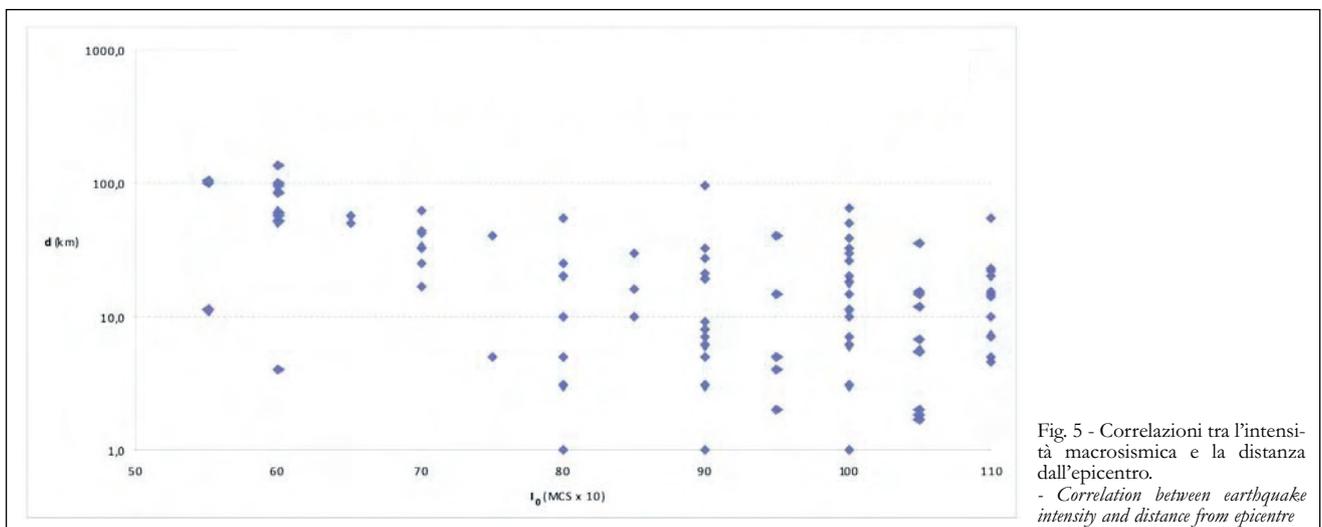


Fig. 4 - Camaiore (LU) : correlazione tra evento sismico ed innesco del *sinkhole*.  
 - Camaiore (LU): correlation between 1995 seismic event and *sinkhole*.



La prima osservazione è che i *sinkholes* analizzati si verificano in aree di pianura con caratteristiche morfologiche differenti in contesti e scenari geologici-idrogeologici diversi. Inoltre lo scenario morfologico ed il contesto geologico-litologico condizionano strettamente la circolazione idrica sotterranea.

Per poter raggruppare i casi di *sinkhole* censiti sono stati considerati: lo scenario morfologico, lo spessore dei materiali di copertura, la profondità e la natura del substrato. Inoltre le cavità possono essere caratterizzate da presenza di acqua talvolta mineralizzata che in qualche modo costituisce elemento distintivo.

In tale analisi sono stati presi in considerazione solamente i casi di *sinkholes* in aree di pianura in cui lo spessore dei depositi di copertura sia superiore ai 30 m, in cui il processo genetico sia riconducibile ad una erosione operata dal basso. Pertanto i fenomeni prettamente carsici sono stati esclusi da questa trattazione.

Pertanto sono state individuate alcune morfologie di aree pianeggianti e raggruppate in sei classi (conca intramontana, pianura costiera, valle fluviale, valle aperta, fascia pedemontana e piccola depressione intracollinare).

Nelle stesse aree morfologiche possono essere presenti fenomeni con stesse caratteristiche per la presenza della medesima natura dei sedimenti costituenti la copertura, tuttavia è risultato che in aree omologhe, con stesso scenario morfologico, possono svilupparsi *sinkholes* con caratteristiche differenti.

Ciò che è emerso è un primo tentativo di raggruppamento in cui è stato possibile individuare le seguenti classi (fig. 6).

*Tipo 1:* Conche intermontane. Le coperture sedimentarie sono costituite da sedimenti alluvionali misti, con intervalli argillosi e lenti di travertino, ma risultano prevalentemente impermeabili. Le forme sono generalmente attive, con risalita di acque mineralizzate e presenza di gas e conseguentemente, sorgenti al fondo e falda in pressione che risale al piano campagna. Ne sono esempi i *sinkholes* presenti nella Piana S. Vittorino (Lazio) e i Laghi del Vescovo (Lazio).

*Tipo 2:* Aree vallive e pedemontane, con presenza di conoidi alluvionali, alluvioni a granulometria mista, prevalenza di ghiaie e sabbie, substrato a notevole profondità. Presenza di acque stagnanti al fondo generalmente alimentate dalle falde superficiali, con evidenti oscillazioni di livello. In tale raggruppamento risulta difficile individuare la tipologia di processo che potrebbe essere assimilata anche ai *cover collapse sinkholes*. Ne sono esempi il caso di Marcellina (Lazio), i fenomeni di Solopaca (Campania), alcuni fenomeni presenti in

Abruzzo.

*Tipo 3:* Piane alluvionali, fascia pedemontana. Piroclastiti sciolte, alluvioni con intervalli limoso sabbiosi, depositi lacustri e travertini. Acque poco mineralizzate, con livello al di sotto del piano campagna alimentate generalmente da falde superficiali. Ne è esempio il caso di Doganella.

*Tipo 4:* Aree vulcaniche, della fascia pedemontana o vallive. Piroclastiti sciolte o semi litoidi, cavità generalmente prive di acqua. Le cavità mostrano morfologia cilindrica. Il substrato carbonatico, forse influente, è generalmente molto profondo ( $P > 100 - 200$  m). Ne sono esempi i casi di Artena (Lazio), di Galliciano (Lazio), di Forino (Campania) delle Fosse Falerne (Campania).

*Tipo 5:* Piane alluvionali, depressioni intracollinari con travertini in affioramento. I processi potrebbero essere influenzati dalla presenza di bancate di travertino ma a volte le cavità interessano anche i materiali argillosi impermeabili sottostanti a questi. Le acque risultano al di sotto del piano campagna, a volte sono presenti sorgenti. Ne sono esempi i casi toscani di Poggibonsi, il lago di Telesse.

*Tipo 6:* Piane costiere, sedimenti marini, prevalentemente impermeabili, con travertini, substrato a media profondità. Ne sono esempi il Lago di S. Floriano (Toscana), alcuni fenomeni rinvenuti in Pianura Pontina (Lazio).

*Tipo 7:* Conche intramontane, valli interne, depositi argillosi, e metamorfici, su calcari vucolari e fortemente carsificati, substrato a media profondità. Acque al piano di campagna, a volte mineralizzate. Presenza di sorgenti sub-lacuali. Ne sono esempi i casi del Marruchetone (Toscana), il Lago dell'Accesa (Toscana).

*Tipo 8:* Piane costiere in argille marine o sedimenti fini lacustri, substrato ad elevata profondità ( $P > 100$  m). Acque provenienti da elevate profondità. Ne è esempio il caso del Bottegone (Toscana).

*Tipo 9:* Aree interne, o aree costiere in terreni argillosi o gessi. Acque fortemente mineralizzate, con livello al di sotto del piano campagna. Ne sono esempi i Laghi Siciliani, Gorgi, i fenomeni di Marina di Lesina (Puglia).

*Tipo 10:* Valli fluviali, valli aperte con depositi di natura e granulometria mista, alluvioni grossolane substrato a medio-scarso profondità, cavità generalmente asciutte, presenza di terre rosse. Le cavità possono presentare diametri non eccessivamente elevati. Ne sono esempi i fenomeni riscontrati in Sardegna nell'Iglesiente.

*Tipo 11:* Cavità di eversione e suffosione fusione (pagg. 5-16).



Tipo 1



Tipo 2



Tipo 3



Tipo 4



Tipo 5



Tipo 6



Tipo 7



Tipo 8



Tipo 9



Tipo 10

Fig. 6 - Raggruppamenti di *sinkholes* in base allo scenario geologico-morfologico e alle caratteristiche fisiche delle cavità.  
 - *Sinkholes surrounding area features considering geological-morphological scenario and sinkholes physical characteristic.*