

Sinkholes: dissoluzione delle evaporiti in Sicilia centromeridionale

Sinkholes: evaporite dissolution in south-central Sicily

LIGUORI V. (*), MANNO G. (*), SAIA S. (**)

RIASSUNTO - La superficie topografica della Sicilia centro meridionale è interessata da depressioni e voragini, assimilabili a fenomeni di *sinkholes*. La presenza sul territorio di queste morfologie strettamente legate a dei collassi, si evidenzia sia attraverso l'analisi di foto aeree e satellitari che dal riscontro eseguito con rilievi geologici e geomorfologici. La formazione delle voragini è quasi sempre preceduta da morfologie simili alle doline di natura carsica: l'aspetto collinare dei luoghi, appare contraddistinto da depressioni localizzate, per lo più di forma sub circolare con diametri da 5 ai 10 m di grandezza e profondità variabile. Sul fondo, al centro di esse spesso è visibile un'area leggermente più depressa di assorbimento preferenziale. La formazione di queste depressioni causa inevitabilmente delle modificazioni sul deflusso superficiale e sotterraneo dell'acque circolanti, cambiando l'idrogeologia generale dell'area e modificando a volte la stabilità dei versanti limitrofi. Nei periodi invernali sono abitualmente colmi d'acqua formando piccoli laghetti, mentre al contrario, nei periodi estivi si asciugano totalmente. I *sinkholes* siciliani si concentrano soprattutto nelle aree dove avveniva l'estrazione mineraria e la loro localizzazione è sempre in funzione dello sviluppo in sottosuolo della miniera.

PAROLE CHIAVE: sinkhole, miniera, evaporiti, sale, rischio

ABSTRACT - The topography surface of the southern and center Sicily is affected by depression and chasms, equivalent to the phenomena of sinkholes. The presence on the territory of these morphologies closely linked to the collapse, it highlights through analysis of aerial and satellite photographs performed with geological and geomorphological relief.

The formation of chasms is almost always preceded by morphologies similar to the nature of karst dolines: the appearance of the hill, it seems marked by depressions localized, with sub circular form, diameters as 5 to 10 m and variable depth size. At the bottom, at the centre of them often can be seen areas more depressed of preferential absorption. The formation of these depressions because inevitably changes the flow of the water of surface and underground circulating, the general hydrogeology changing of the area and sometimes modifying the stability of near sides. In winter are usually full of water forming small lakes, while to the contrary, during the summer are dry completely. The Sicilian sinkholes are concentrated mainly in areas where the mining took place and their location is always depending on the development of the underground mine.

KEY WORDS: sinkholes, mine, evaporites, salt, hazard

(*) Dipartimento di Ingegneria Civile Ambientale e Aereospaziale, Facoltà di Ingegneria, Ed.8, I-90128 Palermo.

(**) Dipartimento di Protezione Civile Provincia di Caltanissetta.

1. - INTRODUZIONE

Qualsiasi intervento effettuato sull'ambiente deve avere come obiettivo la tutela e il rispetto del patrimonio ambientale e la salvaguardia della salute umana. Tali principi devono muoversi in parallelo con le esigenze antropiche di sfruttamento del territorio (MAY *et alii*, 2009, NEAL *et alii*, 1995 KENNETH, 1996, DELLE ROSE *et alii*, 2004, ANNUNZIATELLIS, *et alii*, 2009, BECCARISI *et alii*, 2009, BORGATTI *et alii*, 2009). Il paesaggio siciliano è caratterizzato dalla presenza di innumerevoli cavità di origine naturale (carsiche) e di origine antropica (gallerie minerarie). Le continue evoluzioni e modifiche delle condizioni geomorfologiche originatesi a causa dalla coltivazione di alcuni minerali, ha prodotto e produce numerosi rischi (KENNETH, 1985; MARKER, 2010; KENNETH S.J., 2005; TOLMACHEV *et alii*, 1999; BUCHIGNANI *et alii*, 2009; CREMONINI *et alii*, 2009; NISIO S. & VENTURA G. 2009).

L'area compresa tra le province di Agrigento, Caltanissetta ed Enna è soggetta a rischio *sinkholes*, in quanto in questo territorio, un tempo, sorgevano diverse miniere di zolfo, di salgemma e di sali potassici. Oggi la presenza di queste cavità sotterranee e lo stato di totale abbandono in cui versano, induce alla formazione di due diverse tipologie di eventi temuti, quelli derivanti dalla formazione dei *sinkholes* (subsidenze e crolli della cavità o parte di essa) e quelli che riguardano l'inquinamento relativo all'emanazione di gas (NEAL *et alii*, 1997; KENNETH, 2005; MAY *et alii*, 2009; CUCCHI *et alii*, 2009; DI MAGGIO *et alii*, 2009).

Le miniere, costruite a più livelli, avevano la tipica struttura a galleria e a camere e pilastri (fig. 1). I cloruri alcalini, come il cloruro di sodio (NaCl) e il cloruro di potassio, (KCl) subiscono processi di dissoluzione ad opera delle acque circolanti per infiltrazione nel sottosuolo (COOPER, 2006; LIGUORI *et alii*, 2009; BENITO *et alii*, 2000; GUTIÉRREZ 1996; ARENAS *et alii*, 2000; LUCHA *et alii*, 2008; LUDOVICO *et alii*, 2009; NISIO, 2009). La dissoluzione dei sali ha creato un indebolimento delle volte delle cavità dei tunnel minerari generando nei casi più spinti dei collassi improvvisi e locali che hanno interessato la superficie topografica (*sinkholes*), coinvolgendo in qualche caso strutture viarie e abitative. I

sinkholes che si verificano in tali aree sono spesso ubicati in corrispondenza dei punti di incontro delle gallerie minerarie. Sono quasi sempre con forme subcircolari e con diametri e profondità variabili.

Nel bacino minerario di Caltanissetta sono numerosi i crolli e le subsidenze legate alle cavità sotterranee (LIGUORI *et alii*, 2004, 2008, 2009). I fenomeni più evidenti si localizzano presso i siti minerari dismessi di Bosco, San Cataldo-Palo, di Cattolica Eraclea e l'ex insediamento minerario di Racalmuto-Montedoro. In queste aree i dissesti prodotti dalla formazione di grandi inghiottitoi, coni di frana e subsidenze varie, ha prodotto ingenti danni in superficie interessando vaste aree in cui ricadevano abitazioni o terreni agricoli e talvolta infrastrutture viarie, per tale ragione sono state dichiarate aree ad alto rischio. Secondo la classificazione proposta da Gutiérrez (2008b) questi *sinkholes* rientrano all'interno della tipologia dei *complex sinkholes*, più precisamente dei *caprock sagging e collapse sinkholes*, cioè piegamento e conseguente crollo degli strati di copertura (GUTIÉRREZ 2010, GUTIÉRREZ *et alii*, 2008; GUTIÉRREZ *et alii*, 2007; GALVE *et alii*, 2008; NISIO S. & SCAPOLA F. 2009; POYADJI *et alii*, 2009; VALORE *et alii*, 2011).

Scopo di questo lavoro è quello di conoscere e descrivere le aree a rischio *sinkhole* e subsidenze in Sicilia, in particolare le aree ricadenti nell'area centro meridionale, un tempo interessate da miniere di coltivazione di cloruro di sodio (NaCl) e sali potassici.

2. - LA SERIE GESSOSO SOLFIFERA SICILIANA

La successione Gessoso Solfifera è una definizione geologica adottata per identificare sedimenti evaporitici primari e secondari risalenti al Miocene superiore (Messiniano) e situati nell'area appenninica, presenti in Sicilia, Calabria, Toscana, Marche, Emilia Romagna e Piemonte, tale serie è inoltre ben nota per la sua importanza mineraria, zolfo e sali alcalini (MEZZADRI, 1989; DECIMA & WEZEL 1971). Le rocce sedimentarie registrano i cambiamenti ambientali e climatici della Terra, in esse è possibile analizzare tali cambiamenti, nonché alternanza di condizioni di mare profondo, chiusura del

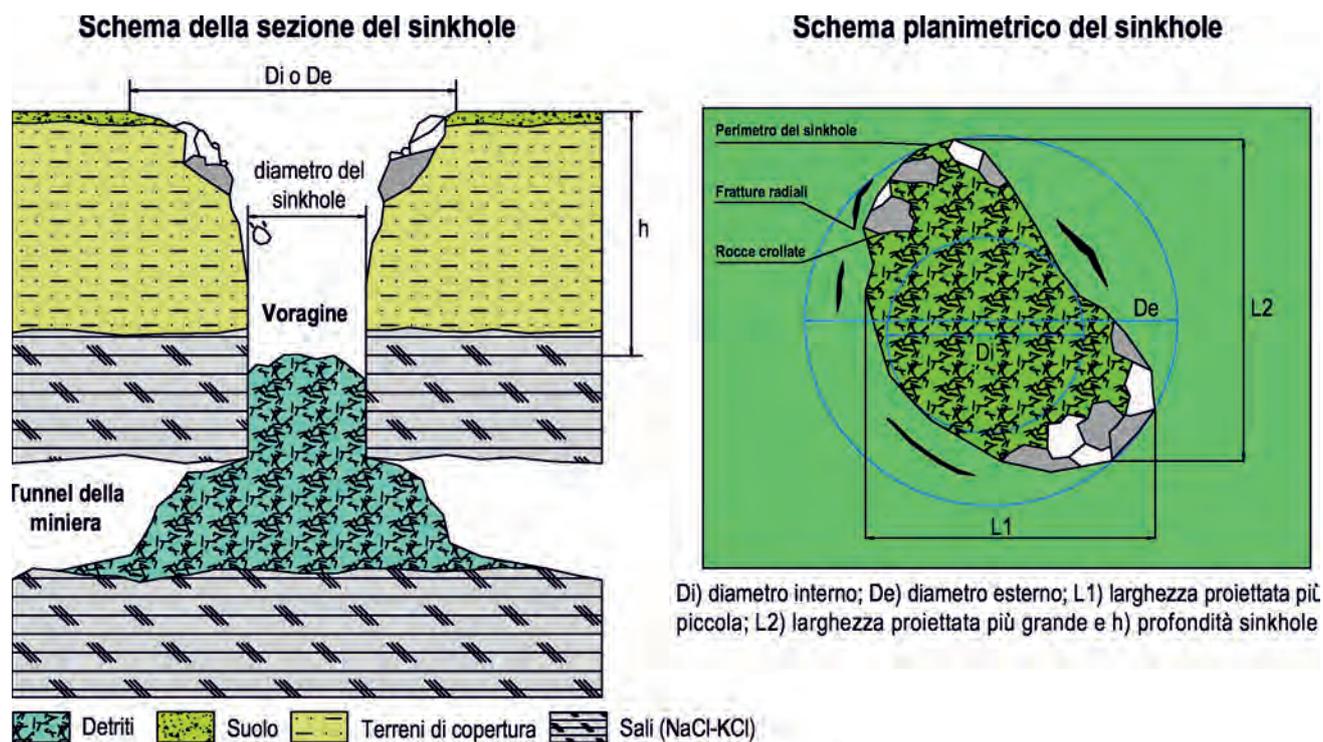


Fig. 1 - A sinistra un tipico schema del profilo di un Sinkhole del bacino minerario di Racalmuto. A destra il sinkhole visto in pianta.
 - Left panel shows a typical sinkholes profile of the Racalmuto area. The right panel shows the sinkhole map.

Mar Mediterraneo con conseguente evaporazione e riapertura dello Stretto di Gibilterra. Si tratta di una successione prevalentemente evaporitica compresa tra le argille marnose del Tortoniano superiore e la formazione dei Trubi del Pliocene basale e depositatasi in corrispondenza ad una crisi di salinità che ha interessato tutta l'area mediterranea.

La Serie Gessoso Solfifera compare in maniera piuttosto estesa nel bacino centrale siciliano conosciuto come Fossa di Caltanissetta, si estende da NE a SW per circa 140 km ed ha una lunghezza di circa 80 km, lo spessore massimo raggiunto è di 7500 m e si registra presso le località di Agrigento e Licata. In realtà le ipotesi di deposizione della Serie Gessoso Solfifera sono diverse, ma quella più accreditata risale a Decima e Wezel, 1971, in cui lo schema stratigrafico interpretativo si riferisce ad una crisi di salinità.

La sedimentazione iniziale dei depositi evaporitici è caratterizzata: nella zona marginale del bacino, da facies stagnanti e carbonatiche; nella zona centrale del bacino, da una potente sequenza di sedimenti euxinici di acque profonde e di depositi evaporitici (banchi a grandi cristalli seleni-

tici e livelli salini). I sedimenti risalgono al Miocene superiore, periodo in cui tutta la Sicilia centro-meridionale era sommersa dal mare profondo, dunque i fondali marini erano interessati dalla deposizione di coltri di argille, sabbie e ciottoli, la successiva diagenesi ha portato a modificare tali depositi in arenaria e conglomerati di colore ruggine. A tale periodo susseguono degli stress deposizionali iniziati nel Messiniano, a seguito della chiusura del Mar Mediterraneo e terminati nel Pliocene inferiore con la riapertura di esso.

In Sicilia il Bacino di Caltanissetta rappresenta il luogo dove è possibile trovare le facies evaporitiche messiniane, sfruttate dal punto di vista minerario fino agli anni '70. In particolare i Bacini Corvillo e Mandre, sotto bacini del Bacino di Caltanissetta, si sono formati in un dominio convergente al fronte della catena Appenninico-Maghrebide Siciliana. La sedimentazione evaporitica ha avuto luogo nei bacini localizzati al tetto ed al fronte di falde sud-vergenti, strutturate già nel Tortoniano durante la deposizione della Formazione Terravecchia. La distribuzione delle facies dei sedimenti messiniani, così come quelli torto-

niani, permette di ricostruire la paleogeografia dell'area: le facies marginali (rappresentate essenzialmente da scogliere coralline e dal Calcarea di Base) bordano gli alti strutturali (margini dei bacini in corrispondenza di anticlinali di rampa), mentre le facies più profonde (diatomiti, gessi, argille) sono localizzate nelle parti più profonde dei bacini ubicati a nucleo di sinclinali. La facies evaporitica marginale è costituita dal Calcarea di Base, un calcarea a struttura prevalentemente brecciata, dovuta alla trasformazione diagenetica del gesso. Il calcarea di Base poggia sulla Formazione Terravecchia, e localmente, direttamente sul substrato deformato pre Tortoniano. La Formazione di Cattolica (evaporiti inferiori o I Ciclo Evaporitico) è costituita dal Calcarea di Base, alternato a gessi selenitici primari, che mostrano localmente evidenze di emersione e carsismo (rose del deserto). Lungo i fianchi dei bacini, laminati gessose si intercalano al Calcarea di Base diventano progressivamente più spesse verso le parti profonde dei bacini. La Formazione di Cattolica è separata dalla formazione di Pasquasia (Evaporiti del II Ciclo Evaporitico) da un limite

dovuto al basso eustatico intramessiniano, che ha interessato un substrato mobile e che ha determinato, localmente, lungo i fianchi delle principali strutture tettoniche attive (per esempio anticlinali) la formazione di depositi di versante costituiti da breccie carbonatiche e

megaruditi a clasti di gesso. Diatomiti, argille e grossi spessori di evaporiti si ritrovano, invece, nei bacini e sono correlabili alle corrispondenti facies marginali (fig. 2). L'architettura deposizionale dei sedimenti del Messiniano superiore dimostra che questi si sono formati in seguito all'azione concomitante di eustatismo e tettonica.

Durante il Pliocene l'annegamento dell'area deposizionale, porta alla sedimentazione dei Trubi, cui seguono nel tardo Pliocene, marne, argille marnose ed arenarie, che sono il prodotto di un sollevamento regionale.

Dal punto di vista litostratigrafico, i depositi evaporitici siciliani sono identificati dalla Successione Gessoso Solfifera. Tale successione poggia sui depositi pre-evaporitici messiniani della Formazione "Tripoli" (Miocene superiore) ed è rico-

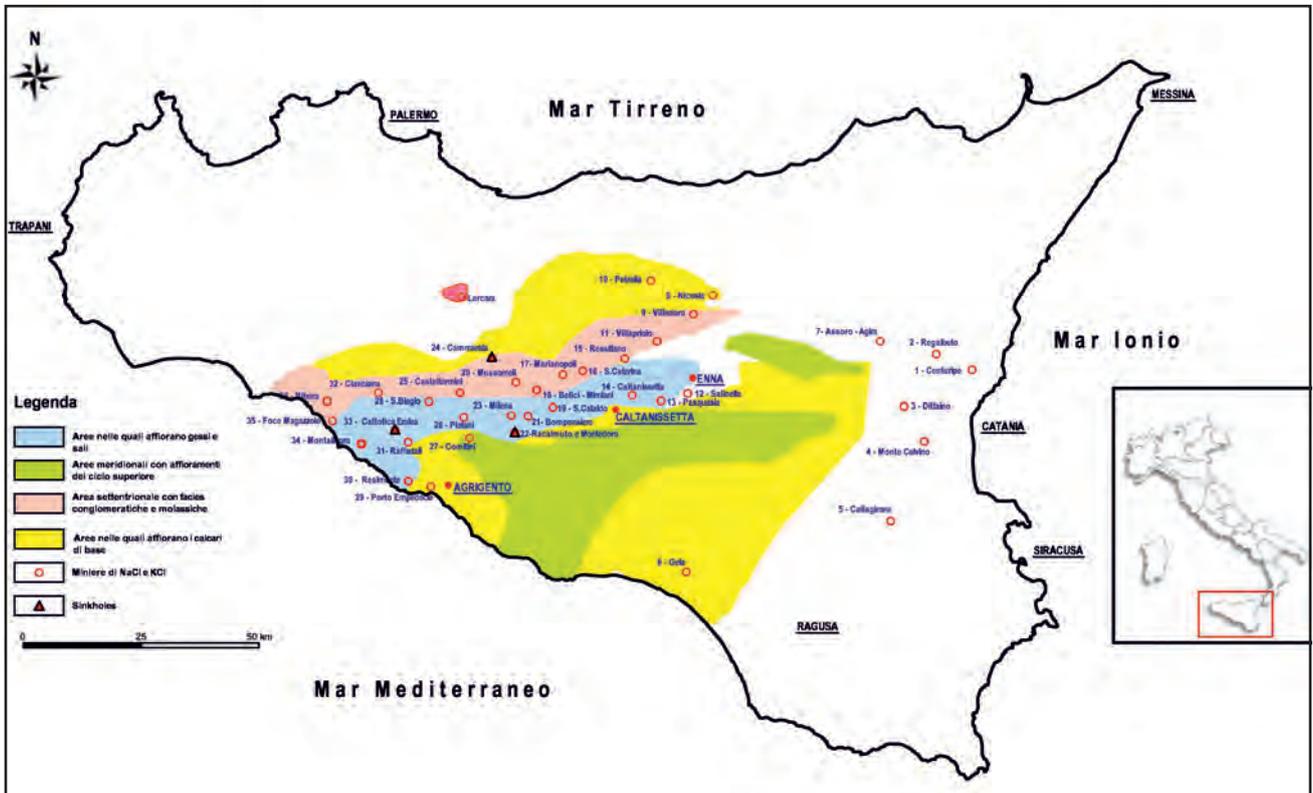


Fig. 2 - Le rocce evaporitiche siciliane in Sicilia centromeridionale e localizzazione delle miniere.
 - Evaporitic rocks in Sicily and mines location.

perta, in discordanza, dalle calcilutiti e dalle calcisiltiti pelagiche (Formazione Trubi) del Pliocene inferiore (fase postevaporitica). Il Gruppo della Serie Gessoso-Solfifera si divide in due unità: un'unità evaporitica inferiore ed una unità evaporitica superiore. L'unità evaporitica inferiore è costituita, dalle seguenti litologie: a) calcari evaporitici (calcari algali, laminati dolomitiche, ecc.) generalmente conosciuti come "Calcare di Base", b) gessi selenitici e laminati (in genere primari) con intercalazioni di marne gessose, c) Sali (principalmente cloruri) passanti verso l'alto e lateralmente ad argille e gessareniti. L'unità evaporitica superiore è costituita, dal basso verso l'alto, dalle seguenti litologie: a) gessi (selenitici, balatini e clastitici) intercalati da livelli argilloso-sabbiosi e carbonatico-gessosi, b) calcari bioclastici passanti verso l'alto e lateralmente a gessi, c) sabbie argillose (Arenazzolo). Le due unità evaporitiche sono separate da una superficie di discordanza intramessiniana che è stata interpretata come una testimonianza di un'importante episodio di deposizione subaerea creatosi in concomitanza con la fine della deposizione dell'unità evaporitica inferiore. La tipica successione della Serie Gessoso Solfifera siciliana è mostrata nella figura 3.

Il "Tripoli" ed il "Calcare di Base" possiedono una ciclicità nella deposizione e appaiono controllati da due processi: la parziale evaporazione del bacino mediterraneo (con periodici apporti provenienti dall'Oceano Atlantico durante il Tortoniano superiore-Messiniano) e la deformazione progressiva delle aree di avanfossa-avampaese e dei bacini satelliti associati, con la formazione di numerosi corpi tettonici sud-vergenti. Un importante aspetto del Tripoli è lo sviluppo di gruppi di strati alternati ciclicamente, costituiti dalle seguenti litologie: argille (di colore verde più o meno scuro) e marne con ricco contenuto faunistico (molto comuni i foraminiferi, i radiolari, le spicole di spugne silicee ed i pesci), i carbonati. (con abbondanti foraminiferi planctonici), le laminati diatomitiche, con strati dello spessore variabile da pochi centimetri a cinque e più metri e le calcilutiti marnose.

Il Calcare di Base evaporitico è rappresentato da calcari, di colore bianco o grigio, stratificati o da ammassi di spessore variabile da 1 a 15 m. La

roccia contiene, localmente, pseudomorfiti di alite. Gli ammassi calcarei sono alternati a livelli (con spessori da 30 a 150 cm) costituiti da marne calcaree, calcari laminati, dolomie o più raramente, da gessi. A volte questi banchi appaiono brecciati.

Le facies evaporitiche nei depositi messiniani della Sicilia sono numerose, di seguito se ne riportano sinteticamente le loro caratteristiche. Facies del solfato di calcio nodulare, si tratta di sedimenti continentali con elementi clastici, facies del Gesso costituita da ruditi carbonatico-gessose, areniti e marne arenitiche, rappresentate in proporzioni variabili da frammenti di gesso (a luoghi anidrite) ed in parte da vari materiali risedimentati quali frammenti di carbonati ed argille, quarzo, feldspati, glauconite e frammenti vulcanici alterati. Questa facies è rappresentata quindi da soli sedimenti clastici e può essere suddivisa, sulla base delle geome-

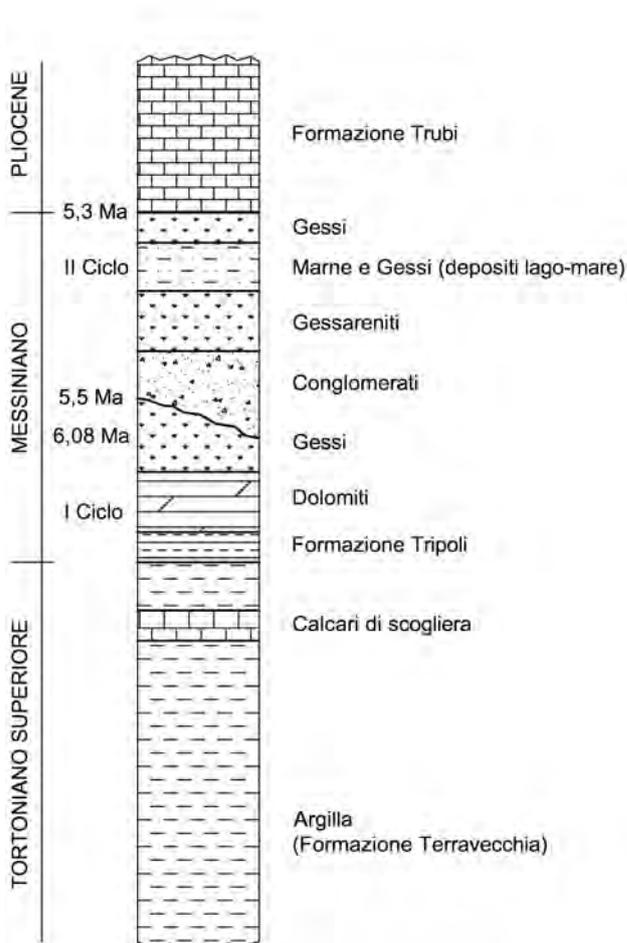


Fig. 3 - Colonna stratigrafica rappresentativa della Serie Gessoso Solfifera, nel Bacino di Caltanissetta.

- Stratigraphic column of the Gessoso Solfifera Series in Caltanissetta basin.

trie dei loro strati e della loro struttura e tessitura interna in strati gradati (con strutture interne quali stratificazione incrociata, ripples, ecc.), strati gradati nei quali sono ben rappresentate sequenze di BOUMA (1962), e strati non gradati indicanti flussi di massa, slumps, ecc. In queste evaporiti è presente anche la facies del Solfato di calcio laminato, spesso associato a sottili intercalazioni carbonatiche (strati laminati) e la facies della Selenite con disposizione dei cristalli costituenti in vari strati a tappeto o a “cavoli”. Infine esistono le facies dei Sali in cui possiede cristalli a tramoggia e strutture Chevron, le facies (halite, kainite, ecc.) con strutture laminate continue e con saltuarie intercalazioni di gessoruditi gradate e areniti con apparenza di depositi torbiditici. In aggiunta a queste facies sono presenti anche ulteriori tipi rocciosi, dovuti alle trasformazioni diagenetiche, che si sovrappongono alle litofacies originarie. Tali facies raggiungono i 1000 m di spessore, mentre nelle zone a tettonica più blanda è generalmente di 400-500 m.

3. - BACINO MINERARIO RACALMUTO-MONTEODORO

Il bacino minerario di Racalmuto - Montedoro rientra all'interno di una vasta area denominata altopiano di Racalmuto. L'area ricade al confine tra la provincia di Caltanissetta e di Agrigento ed è compresa all'interno della tavoletta IGM (1:25000) 267 III NO Montedoro. L'altopiano di Racalmuto è suddiviso in tre settori: il settore settentrionale caratterizzato dalla presenza di gessi e trubi; il settore centrale, settore valutato come il più interessante dal punto di vista della coltivazione dello zolfo e dei sali potassici e il settore meridionale di scarso interesse minerario.

Il comprensorio minerario Racalmuto - Montedoro rientra nel settore centrale in cui si distingue a sua volta una zona occidentale (Vallone di Racalmuto), una zona centrale (Sacchitello-Pantano-Racalmuto) e una zona orientale (Marchesa Montedoro).

L'ammasso salino è stato integralmente coltivato per l'estrazione di salgemma (NaCl), kainite ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{KCl} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) e carnallite ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$).

Nella fascia occidentale del bacino minerario Racalmuto-Montedoro, il minerale è sub-affiorante e sempre in questa fascia di territorio numerose sono state in passato le concessioni minerarie sul fianco destro e sinistro del Vallone Pantano. Da sondaggi ed analisi il tenore in cloruro di sodio è paria a 99.5% circa. Il bacino minerario in esame possiede uno spessore salino prossimo ai 1200 m, una larghezza di 1.5 km ed una lunghezza di 4 km. Intorno agli anni cinquanta, in quest'area, sorsero la miniera di sale Italkali, le miniere di sali potassici Montecatini e Montedoro, ma a causa dell'esaurimento delle risorse e dello sviluppo industriale le miniere furono costrette alla chiusura, eccetto la miniera Italkali attualmente attiva. Adesso il territorio appare in sostanziale degrado.

3.1. - MINIERA MONTEODORO

La miniera di Montedoro ricade nel settore orientale del bacino minerario Racalmuto-Montedoro, la distinzione effettuata tra la miniera di Montedoro e le miniere di Racalmuto è puramente di carattere amministrativo poiché l'ammasso salino è lo stesso in tutto l'intero bacino minerario (figg. 4, 5). La Miniera Montedoro è ubicata in Contrada Perciata e da essa si estraeva kainite. Il sinkhole rilevato presso il sito minerario di Montedoro interessa un Pozzo denominato Kainite, ed il crollo, avvenuto intorno agli anni 80 (PAI - Bacino Fiume Platani), è stato generato dal mancato rivestimento del pozzo stesso. Crollata, infatti, la testa del Pozzo, il cono di frana ha coinvolto anche un edificio adiacente, la cui funzione sarebbe stata quella di sala argano. Il sinkhole presenta un diametro di 24 m e una profondità di circa 24-25 m, anche se gli addetti ai lavori reputano che la profondità sia superiore, il crollo non è stato istantaneo, ma è avvenuto nel tempo.

3.2. - MINIERA RACALMUTO

L'unità mineraria Racalmuto, è ubicata in Contrada Gargilata, da essa si cavavano sali potassici, l'estrazione avveniva mediante pozzi e il minerale veniva successivamente trasportato in impianti di flottazione. Al momento della cessazione dell'atti-

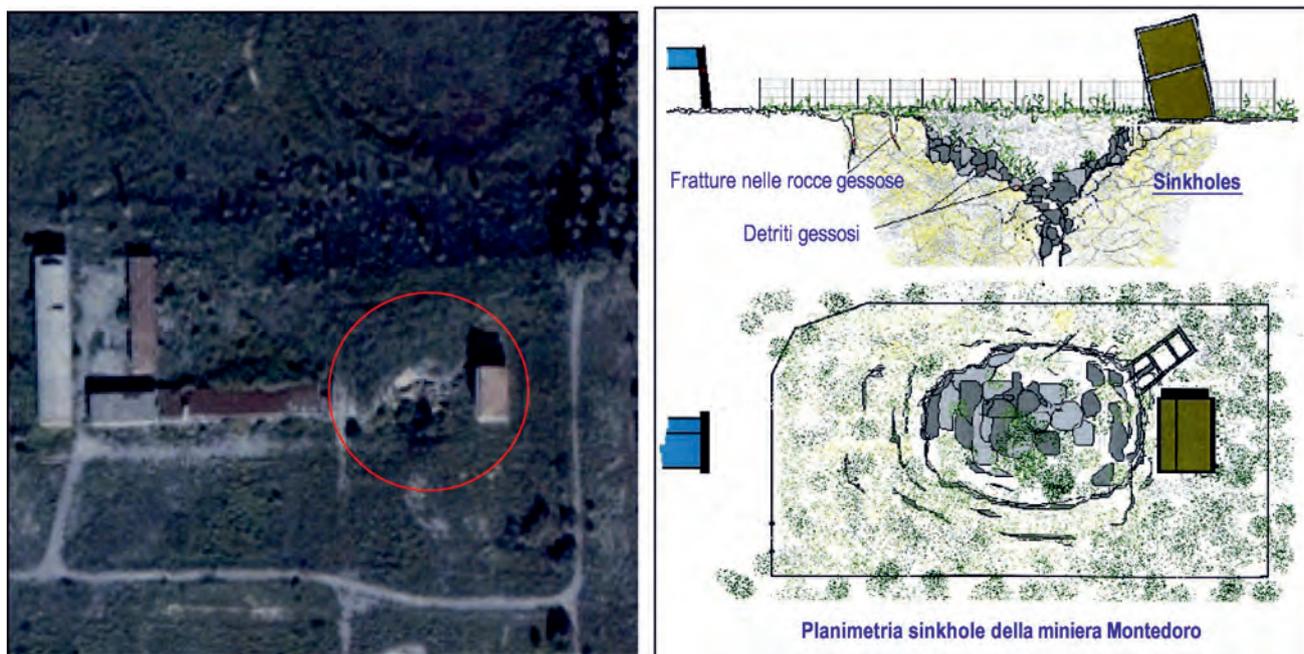


Fig. 4 - Immagine aerea, rappresentativa della zona. A sinistra localizzazione planimetrica del sinkhole, mentre a destra schema del sinkhole.
 - To left aerial image of Montedoro area. To right the map and profile of the sinkhole.



Fig. 5 - Immagine fotografica del sinkhole.
 - Sinkhole photo in Montedoro area.

vità, 1990, questa unità mineraria venne dichiarata *in potenziale stato di coltivazione* in quanto, in quel momento le strutture minerarie erano integre e funzionanti. Quando la miniera è stata dismessa, a causa delle elevate profondità di coltivazione del minerale aloide e del mancato funzionamento del-

l'impianto di eduazione dell'acqua, in particolare Pozzo 2, operante sino a 300 m, si è reso possibile l'infiltrazione dell'acqua con conseguente dilavamento e crollo del castelletto metallico che ha prodotto il sinkhole rilevato. Da circa cinque anni l'inghiottitoio è stabile ed attualmente è largo 200

metri e profondo 40 m. Sono stati interessati dal crollo anche alcuni edifici in cui erano stati allocati: sala quadri elettrici, sala argano, officina, compressori e utensileria (fig. 6).

In contrada Contrada Pantanelli (fig. 7), nel settore centrale del bacino salifero compreso tra le località di Racalmuto e Montedoro esiste una vecchia miniera di sale anch'essa soggetta a *sinkholes*. Da questa miniera veniva estratto salgemma, ed è in stato di abbandono dagli anni cinquanta. Il giacimento era costituito da una lente di salgemma avente direzione E-W con immersione verso N. Sono stati tracciati 9 livelli di coltivazione raggiungendo la quota di - 241 m dalla superficie topografica (6° livello).

4. - MINIERA DI CATTOLICA ERACLEA

I *sinkholes* presenti nell'area in cui ricade la miniera di Cattolica Eraclea, attualmente chiusa proprio perché si era registrato durante il periodo di attività un crollo, sono ben visibili sia all'ingresso della miniera sia sulla zona di copertura della miniera stessa. Il primo crollo si è registrato nel 1980, altri sono stati registrati più recentemente, tale distinzione è visibile, i *sinkholes* più vecchi presentano una copertura vegetale che non si presenta invece nei *sinkholes* più recenti. L'area di interesse dei *sinkholes* possiede una estensione superiore ad un ettaro (fig. 8).

5. - MINIERA BOSCO

Il sito minerario San Cataldo-Bosco sorse inizialmente come solfara, nel periodo compreso tra il 1930 e il 1938, solo nel 1954 si assiste alla scoperta del giacimento salino proprio in questo sito, grazie alla Società Montecatini che svolgeva attività di ricerca di nuovi giacimenti di zolfo all'interno della concessione Bosco. Per caso venne quindi scoperto un grosso giacimento di Kainite che si rilevò essere tra i più grandi di Europa. Nel 1956 l'area superficiale della miniera un piccolo villaggio e fu bonificata l'area limitrofa al torrente Stincone. La scoperta di questo giacimento salino ha portato molte società operanti in Sicilia alla ricerca di giacimenti di zolfo ad avere come obiettivo la scoperta di ulteriori giacimenti di Sali potassici. Il trattamento dei Sali potassici prevedeva un arricchimento del sale attraverso una prima purificazione della Kainite dal cloruro di sodio (NaCl) e un successivo arricchimento del sale attraverso la flottazione.

A seguito della grande quantità del materiale estratto venne realizzato in loco un impianto di flottazione per l'arricchimento del sale. Il prodotto estratto veniva trasportato, mediante una teleferica lunga (18 km), allo stabilimento chimico di Campofranco, per l'ultimo trattamento, qui la Kainite veniva trasformata in Solfato di Potassio (K_2SO_4) per poi essere inviata allo sta-



Fig. 6 - Sinkhole della miniera Racalmuto. La zona interessata dal sinkhole è stata messa in sicurezza attraverso due recinzioni con l'obiettivo di impedire l'accesso.

- Sinkhole in Racalmuto mine: aerial map and panoramic view.



Fig. 7 - Sinkhole alla miniera Racalmuto in contrada Pantanelli. In basso a destra si evidenziano la laminazione e i livelli dei gessi all'interno del sinkhole.
 - Sinkhole in Racalmuto mine (Pantanelli zone). Sinkhole shows a gypsum levels.

bilimento di Porto Empedocle per il successivo imbarco. Nel periodo 1960-1980 vennero estratti nell'area mineraria Bosco diversi milioni di tonnellate di Sali potassici (cloruro di potassio - KCl ; e solfato di potassio - K_2SO_4), da utilizzare come fertilizzanti. Tuttavia a causa dell'accertato esaurimento del giacimento salino nel 1988 venne ritirata la concessione mineraria e la miniera Bosco chiuse. Quello che rimane oggi del sito minerario sono gli impianti e i macchinari, i capannoni, il villaggio degli operai e la discarica di scarti di sale (fig. 9). Anche il sottosuolo non si presenta in buone condizioni, perché una volta fermate le pompe che mantenevano asciutta la miniera, i grandi vuoti della miniera generati dall'estrazione del sale sono stati invasi dall'acqua producendo dissoluzione dei sali e crolli che hanno coinvolto le volte delle gallerie di diversi

livelli. Il corretto ciclo delle acque meteoriche è stato turbato dall'intensa coltivazione del giacimento e risulta non controllabile a causa del totale stato di abbandono. Il risultato è una continua crescita del livello idrico all'interno delle gallerie dovuto sia alle precipitazioni atmosferiche sia al contributo delle acque di falda. In questo contesto si inserisce l'erosione del torrente Stincione che ha originato un approfondimento dell'incisione in prossimità della strada e della discarica di scarti salini. Nell'inverno del 1992, proprio in questo punto della discarica si è originata un'elevata dissoluzione dei sali producendo una voragine con una dimensione media di circa 10 m. L'erosione ad opera del torrente incide uno strato gessoso variabilmente fratturato che ha dato luogo ad inghiottitoi con forme di ingrottamento, tipici del carsismo.



Fig. 8 - Sinkhole di Cattolica Eraclea.
- *Sinkholes in Cattolica Eraclea area.*

6. - MINIERA MUTI COFFARI

Il deposito salino è costituito da una piega asimmetrica con asse SW-NE e immersione SE e raggiunge uno spessore di 100 m. Anche per questa miniera il metodo di coltivazione era a camere e pilastri. L'infiltrazione delle acque meteoriche nel sottosuolo ha prodotto la dissoluzione dei pilastri (di sale), innescando crolli delle volte delle gallerie, fino ad interessare la superficie topografica generando *sinkholes*. Il più importante sinkhole è stato originato dal crollo della volta della galleria dei livelli -2, -1 e 0 coinvolgendo un volume di materiale pari a 8.000 m³, e producendo una voragine profonda circa 30 m (LIGUORI *et alii*, 2008, 2009).

Questo sinkhole al momento è riempito dai detriti del vicino versante. Anche i più piccoli e numerosi *sinkholes* (fig. 10), presenti in quest'area vengono periodicamente riempiti di materiale argilloso trasportato dalle acque meteoriche. Durante il periodo invernale le abbondanti acque meteoriche si infiltrano nel sottosuolo attraverso i *sinkholes* allagando completamente le gallerie della miniera e operando ulteriore dissoluzione del sale. In questo modo si produce una salamoia che periodicamente fuoriesce dall'ingresso principale della miniera e si immette seguendo un torrente nelle acque del fiume Platani, rendendole salate. In questo modo l'intero ecosistema del fiume Platani si modifica producendo un grande impatto negativo sulla flora e fauna presente in quella zona.

7. - CONCLUSIONI

In questo lavoro viene presentata una panoramica dello stato attuale dei fenomeni di *sinkholes* verificatisi in Sicilia centromeridionale. Il bacino minerario di Racalmuto (Agrigento), classificato come uno dei più grandi della Sicilia, è un esempio concreto delle modificazioni geomorfologiche del territorio legate alla presenza delle miniere di sale ormai abbandonate. In queste aree i dissesti prodotti dalla formazione di grandi inghiottitoi, coni di frana e subsidenze varie, ha prodotto ingenti danni in superficie interessando vaste aree in cui ricadevano abitazioni o terreni agricoli e talvolta infrastrutture viarie, per tale ragione sono state dichiarate aree soggette a rischio. Secondo la classificazione proposta da GUTIÉRREZ *et alii*, (2008a, 2008c) questi *sinkholes* rientrano all'interno della tipologia dei *complex sinkholes*, più precisamente dei *caprock sagging* e *collapse sinkholes*, cioè piegamento e conseguente crollo degli strati di copertura. Tra i diversi *sinkholes* siciliani quello più grande è proprio in corrispondenza della miniera di Racalmuto con una larghezza di circa 200 m e una profondità di circa 100 m (fig. 7). Allo scopo di ridurre il pericolo prodotto dalla comparsa improvvisa di queste voragini sarebbe necessario accertare meglio le cause di innesco di questi fenomeni e avviare una campagna di monitoraggio.

In tal senso si rende necessario promuovere una campagna di indagini che iniziando con rilievi to-



Fig. 9 - Area mineraria San Cataldo - Bosco, che presenta fenomeni di subsidenza.
- Subsidence phenomena in San Cataldo Bosco mine. In the panel above the mine salts waste.



Fig. 10 - Area mineraria Muti-Coffari: fenomeni di subsidenza.
- Muti Coffari area with subsidence phenomena.

pografici, dettagli il modello di circolazione idrica nel sottosuolo differenziando le acque salate dalle acque di alimentazione meteorica in modo da studiare con controlli quali-quantitativi e piezometrici le potenzialità e la ricarica della falda idrica e la provenienza della ricarica delle acque che riempiono le gallerie minerarie. Inoltre si rende necessario la realizzazione di un modello della struttura dell'ammasso roccioso con rilievi *in situ*, sismica a riflessione, dati che permetteranno l'esecuzione di sondaggi per la ricostruzione stratigrafica, e per il monitoraggio con piezometri e inclinometri. Alla luce dei risultati ottenuti si potrà definire un'ipotesi di intervento per mettere in sicurezza l'area con uno degli interventi sperimentati in altre aree con fenomeni e litologie identiche.

Fra di essi si "ricorda":

immissione di acque soprassature per favorire il deposito dei Sali mitigando lo scioglimento e chiudendo le fratture nella roccia salina o gessosa: l'*artificial recharge* evita fenomeni erosivi nel sottosuolo e mantiene la pressione tale da evitare fenomeni di subsidenza;

umentare la pressione all'interno della miniera come mezzo per ridurre il deflusso di acqua salata; riempimento delle stesse con miscele cementizie in grado di consolidare le gallerie allagate.

Quanto detto in precedenza porterebbe a gestire correttamente i *sinkholes* esistenti e porterebbe ad identificare eventuali nuove aree soggette a questi fenomeni. Inoltre nelle miniere dismesse sarebbe necessario introdurre provvedi-

menti strutturali e non al fine di mettere in sicurezza tali siti. I provvedimenti da attuare dovranno comunque essere intrapresi nel rispetto delle singole aree in funzione delle specifiche esigenze riscontrate.

BIBLIOGRAFIA

- ANNUNZIATELLIS A., CIOTOLI G., GUARINO P.M. & NISIO S. (2009) - *Nuovi dati sui sinkholes del Bacino delle Acque Albule (Tivoli, Roma)*. 2° International workshop on "Sinkholes. The catastrophic sinking in natural and anthropic environments", pp. 94.
- ARENAS C., GUTIÉRREZ F., OSÀCAR C. & SANCHO C. (2000) - *Sedimentology and geochemistry of fluvio-lacustrine tufa deposits controlled by evaporite solution subsidence in the central Ebro Depression, NE Spain*. *Sedimentology*, **47**, pp. 883-909.
- BENITO G., GUTIÉRREZ F., PÉREZ-GONZÁLEZ A. & MACHADO M.J. (2000) - *Geomorphological and sedimentological features in Quaternary fluvial system affected by solution-induced subsidence (Ebro Basin, NE-Spain)*. *Geomorphology*, **33**, pp. 209-224.
- BECCARISI L., DELLE ROSE M., ERNANDES P., NAPOLETANO S. & ZUCCARELLO V. (2009) - *Hydrogeological hazard and conservation status of cave-collapse sinkholes along the salentine ionian coast (southern apulia, italy)*. 2° International workshop on "Sinkholes. The catastrophic sinking in natural and anthropic environments", pp. 94.
- BORGATTI L., BIANCHI E., BONAGA G., GOTTARDI G., LANDUZZI A., MARCHI G., MASTRANGELO A., RODORIGO S., VICO G. & VITTUARI L. (2009) - *Sinkhole phenomena in the po plain: the role of geological setting and geotechnical properties of recent alluvial sediments*. 2° International workshop on "Sinkholes. The catastrophic sinking in natural and anthropic environments", pp. 94.
- BUCHIGNANI V., DI FILIPPO M. & DI NEZZA M. (2009) - *In-*

- dividuaazione di zone a rischio sinkhole, metodologie operative A camaiore (lu)*. 2° International workshop on "Sinkholes. The catastrophic sinking in natural and anthropic environments", pp. 94.
- COOPER A. (2007) - *Gypsum dissolution geohazards at Ripon, North Yorkshire, UK*. Conference proceedings Engineering geology for tomorrow's cities IAEG (International Association for Engineering).
- CREMONINI S. (2009) - *An Initial Overview Of Sinkholes In The Emilia-Romagna Region (ITALY)* - 2° International workshop on "Sinkholes. The catastrophic sinking in natural and anthropic environments", pp. 94, Roma.
- CUCCHI F., ZINI L., CALLIGARIS C. & STEFANELLI N. (2009) - *Gypsum's Role In The Friuli Venezia Giulia Sinkholes*. 2° International workshop on "Sinkholes. The catastrophic sinking in natural and anthropic environments", pp. 94, Roma.
- DECIMA A. & WEZEL F.C. (1971) - *Osservazioni sulle evaporiti messiniano della Sicilia centro-meridionale*. Rivista Mineraria Siciliana, pp. 130-132.
- DELLE ROSE M., FEDERICO A. & PARISE M. (2004) - *Problematice connesse a fenomeni di subsidenza carsica e sinkholes in Puglia*. Atti del Convegno "Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio", pp. 377-388.
- DI MAGGIO C., DI TRAPANI F.P., MADONIA G., SALVO D. & VATTANO M. (2009) - *First report on the sinkhole phenomena in the sicilian evaporates (southern italy)*. 2° International workshop on "Sinkholes. The catastrophic sinking in natural and anthropic environments", pp. 94, Roma.
- GALVE J.P., BONACHEA J., REMONDO J., GUTIÉRREZ F., GUERRERO J., LUCHA P., CENCRERO A., GUTIÉRREZ M., SANCHEZ J.A. (2008) - *Development and validation of sinkhole susceptibility models in mantled karst settings. A case study from the Ebro valley evaporite karst (NE Spain)*. Engineering Geology, **99**, pp. 185-197.
- GUTIÉRREZ F. (1996) - *Gypsum karstification induced subsidence: effects on alluvial system and derived geohazards (Calatayud Graben, Iberian Range, Spain)*.
- GUTIÉRREZ F. (2010) - *Hazard associated with karst*. Geomorphological Hazard and Disaster Prevention, Cambridge Univ Press, pp. 161.
- GUTIÉRREZ F., GALVE J.P., GUERRERO J., LUCHA P., CENCRERO A., REMONDO J., BONACHEA J., GUTIÉRREZ M. & SANCHEZ J.A. (2007) - *The origin, typology, spatial distribution and detrimental effects of the sinkholes developed in the alluvial evaporite karst of the Ebro River valley downstream of Zaragoza city (NE Spain)*. Earth Surface Processes and Landform, **32**, pp. 912-928.
- GUTIÉRREZ F., GALVE, J.P., LUCHA P. & BONACHEA J. (2008a) - *Investigation of a large collapse sinkhole affecting a multi-storey building by means of geophysics and the trenching technique (Zaragoza city, NE Spain)*. Environmental Geology, **58** (5), pp. 1107-1122.
- GUTIÉRREZ F., GUERRERO J. & LUCHA P., (2008b) - *A genetic classification of sinkholes illustrated from evaporite paleokarst exposures in Spain*. Environmental Geology, **53**, pp. 993-1006.
- GUTIÉRREZ F., COOPER A.H. & Jhonson K.S., (2008c) - *Identification, prediction, and mitigation of sinkhole hazard in evaporite karst areas in Environmental Geology*, **53**, pp. 1007-1022.
- LUCHA P., GUTIÉRREZ F. & GUERRERO J. (2008) - *Environmental problems and geological implication derived from evaporite dissolution in the Barbastro salt anticline (NE Spain)*. Environmental Geology, **53**, pp. 1045-1055.
- LIGUORI V. & GUGLIOTTA C. (2009) - *Disused mines Hazard: Sinkholes in salt mine in Racalmuto area (Sicily)*. 2° International workshop on "Sinkholes. The catastrophic sinking in natural and anthropic environments", pp. 94, Roma.
- LIGUORI V. & MANNO G. (2009) - *Mine sinkholes in Sicily: geomorphologic and environment hazard*. Proceeding of Man and Earth Living with Landscapes: Symposium and Workshop, pp. 47-49. SIWA (Egypt).
- LIGUORI V., MANNO G. & MORTELLARO D. (2008) - *Evaporite karst in Sicily*. Environmental Geology, n. 5, Gennaio **53**, pp. 975-980.
- LIGUORI V., MANNO G. & MORTELLARO D. (2004) - *Rischio nelle aree carsiche in Sicilia: "Case History" Nella Piana Di Cinisi (Palermo)*. Atti del Workshop: Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali nel governo del territorio. APAT, Roma.
- LUDOVICO D. & NISIO S. (2009) - *Fenomeni di sinkhole nella regione molise: Primi casi di studio*. 2° International workshop on "Sinkholes. The catastrophic sinking in natural and anthropic environments", pp. 94, Roma.
- MAY A., CARSANA M., CASTELLANA R., SPADA M., ORLANDI G.M., BIANCHI & BERTOLINI L. (2009) - *Rischi di crollo di cavità antropiche: le gallerie di gesso allagate di santa brigida (BG). Studi, modellazioni ed opere pilota di consolidamento*. 2° International workshop on "Sinkholes. The catastrophic sinking in natural and anthropic environments" Roma.
- MEZZADRI P. (1989) - *La Serie Gessoso Solfifera della Sicilia ed altre memorie geo-minerarie*. Roberto Denicole (Ed.), pp. 900.
- MARKER B.R. (2010) - *Review of approaches to mapping of hazard arising from subsidence into cavities*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, **69** (2), pp.159-183.
- NEAL J.T. & MYERS R.E. (1995) - *Origin, diagnostic and mitigation of salt dissolution sinkhole at the US Strategic Petroleum Reserve storage site, Weeks Island, Louisiana*. Proceedings of the Fifth International Symposium on Land Subsidence, IAHS n. 234.
- NEAL J.T. (1997) - *Mine-induced sinkholes over the US Strategic Petroleum Reserve (SPR) Storage Facility at Weeks Island, Louisiana: geological mitigation and environmental monitoring*. Sandia National Labs., Albuquerque, NM (US).
- NISIO S. (2009) - *I sinkholes nelle aree di pianura italiane: I risultati del "progetto sinkhole"-Ispra*. 2° International workshop on "Sinkholes. The catastrophic sinking in natural and anthropic environments", pp. 94, Roma.
- NISIO S. & SCAPOLA F. (2009) - *I sinkholes nel frusinate*. 2° International workshop on "Sinkholes. The catastrophic sinking in natural and anthropic environments", pp. 94, Roma.
- NISIO S. & VENTURA G. (2009) - *Le ricerche storiche nello studio dei fenomeni di sprofondamento. Alcuni esempi cartografici e documentali*. 2° International workshop on "Sinkholes. The cat-

- astrophic sinking in natural and anthropic environments*", pp. 94, Roma.
- POYADJI EL., HADJICHARALAMBOUS KL., SAMPATAKAKIS P., KARMIS P., DEMETRIADIS AL., NIKOLAOU N. & STERGIPOULOS K. (2009) - *Sinkholes due to gypsum dissolution. Genetic mechanism - definition of sinkhole prone areas. A case study in Cyprus*. 2^o International workshop on "Sinkholes. The catastrophic sinking in natural and anthropic environments", pp. 94.
- KENNETH S.J. (1985) - *Hydrogeology and recharge of a gypsum-dolomite karst aquifer in southwestern Oklahoma, USA*. Karst Water Resources, Gultekin Gunay and A. Ivan Johnson, 1st, IAHS Publications USA.
- KENNETH S. J. (1996) - *Gypsum karst in the United States*. International Journal of Speleology., **25** (3-4), pp. 183-193.
- KENNETH S.J. (2005) - *Salt dissolution and subsidence or collapse caused by human activities*. Engineering Geology, **16**, pp. 101-110.
- KENNETH K.S. (2005) - *Subsidence hazard due to evaporite dissolution in the United States*. Environmental Geology, **48**, pp. 395-409.
- TOLMACHEV V.V., IKONNIKOV L.B. & LEONENKO M.V. (1999) - *Experience with karstological monitoring in Dzerzhinsk, Nizhgorod Oblast*. Soil Mechanics and Foundation Engineering, **36** (5), pp. 187-190.
- VALORE C., ZICCARELLI M., GAMBINO C. (2011) - *The Dissolution of Gypsum of Disueri Reservoir Left Bank*. Proceedings of the 15th European Conference on soil mechanics and geotechnical engineering. Anagnostopoulos (Eds.).