

ESAME DEL FENOMENO DI SUBSIDENZA DEL BOTTEGONE (GROSSETO)

DEL GRECO OTELLO*, GARBARINO ELENA*, OGGERI CLAUDIO*, PIOLI FRANCO**

* Politecnico di Torino, Dipartimento di Georisorse e Territorio

** Geoprogetti Informatica, Grosseto

1. IL FENOMENO DI SUBSIDENZA DEL "BOTTEGONE"

Nel gennaio 1999, nel volgere di poche ore, una voragine di forma pseudo circolare si è formata nella pianura a Nord di Grosseto, in regione "Bottegone". Tale fenomeno, oltre allo sprofondamento pressoché uniforme della zona interna alla voragine, è stato accompagnato anche da disturbi del regime idrogeologico dei pozzi artificiali e delle sorgenti naturali presenti nell'area circostante. La morfologia e le dimensioni della voragine e la presenza di acqua al suo interno sono poi mutati nel tempo, a seguito dell'esaurimento dell'evento e dell'innestarsi dei naturali fenomeni di rimodellamento (fig.1).



Fig. 1 - Voragine del "Bottegone"

Le cause del fenomeno risultano per alcuni aspetti ancora in fase di approfondimento e in base alle conclusioni finora raggiunte, l'origine dell'evento è da ricondursi a situazioni geologiche naturali, non collegabili in senso stretto ad intense precipitazioni tali da originare un aumento del flusso sotterraneo delle acque, e neppure da addebitarsi alla presenza nella zona di interesse di pozzi di emungimento in grado di innescare fenomeni di subsidenza conseguenti al sovrasfruttamento delle risorse idriche. Tali pozzi sono stati infatti realizzati per usi agricoli e presentano profondità limitate.

L'evento, di per sé piuttosto singolare nell'ambito di tempi storici anche se non esclusivo nell'area geografica della Toscana centro meridionale, è stato accompagnato da interessanti fenomeni collaterali, sicuramente da considerare al fine della sua comprensione.

1.1. Dinamica dell'evento

La superficie del piano campagna è stata interessata da un repentino sprofondamento dei terreni alluvionali della piana grossetana, originando una voragine di forma pseudo circolare di diametro pari a 140 m, con pareti verticali e approfondimenti massimi pari a 15 m nella zona a S-SO (fig.2.a.-b.-f.). Dal lato orientale della voragine si è dipartita una profonda fenditura intersecante la strada sterrata adiacente; tale fenomeno è indicativo dei futuri sviluppi planimetrici (fig.2.d.-e.). La presenza della strada ha permesso di evi-

denziare macroscopicamente gli effetti di richiamo, che hanno reso meno inclinate le scarpate e che hanno prodotto un terrazzamento delle sponde fino al raccordo con le porzioni più profonde e centrali (fig.2.c.). L'assenza di rimaneggiamento ed il carattere scarsamente plastico dei terreni viene sottolineato dalla regolarità mantenuta dai dreni agricoli, che hanno subito essenzialmente una traslazione rigida verticale. La dinamica dell'evento ha indotto a ritenere che la formazione sottostante fosse interessata da una cavità di forma asimmetrica, con dimensioni maggiori nelle porzioni meridionali.

Nelle porzioni settentrionali si è evidenziata la risalita a giorno di acqua termale in pressione, appartenente quindi all'acquifero profondo carsico (fig.2.g.).

I fenomeni minori collegabili con tale collasso sono stati individuati nell'incremento del livello piezometrico e della portata di tre sorgenti termali limitrofe e nella risalita di acqua nei pozzi circostanti, quasi ad indicare un fenomeno di spiazzamento delle acque in profondità (effetto stantuffo), con un deflusso più agevole verso il reticolo superficiale. Ulteriore avallo delle precedenti ipotesi è stata la presenza di conetti limosi allineati in direzione della voragine e posizionati lungo apparenti direzioni preferenziali (fig.2.h.-j.).

Nel tempo la profondità massima della voragine ha raggiunto i 15 m. Il fenomeno non si è evoluto verticalmente, ma in senso planimetrico, facendo assumere alla voragine una forma ellissoidica con asse maggiore di 188 m in direzione NNE-SSO, seguendo la grande frattura osservabile già durante il collasso. Nei tre anni successivi alla manifestazione dell'evento si è assistito ad un processo di rinaturalizzazione con rinverdimento delle sponde e riempimento d'acqua. A seguito di periodi di intense precipitazioni l'aumento del livello idrico nella voragine si è manifestato con un ritardo di circa due mesi. Pertanto si è ipotizzato che l'acqua nella voragine, oltre agli apporti degli acquiferi freatici di scarsa entità, sia in collegamento con l'acquifero profondo carsico, caratterizzato evidentemente da una zona di ricarica posta a notevole distanza dalla regione analizzata.

a) Vista NO-SE



b) Vista S-SO



c) Vista N-S



d) Fenomeni interessanti la strada



e) Profonda frattura



f) Porzione meridionale



g) Risalita d'acqua in pressione



h) Ristagni di acqua nei campi



i) Conetti limosi lungo le linee di flusso



Fig. 2 - Dettagli del fenomeno di subsidenza

1.2. rigine dell'evento ed obiettivi della ricerca

L'origine dell'evento non è stata correlata a periodi di intense precipitazioni tali da originare un aumento del flusso sotterraneo delle acque. Inoltre la regione interessata è scarsamente permeabile e gli acquiferi freatici sono sospesi o, comunque, confinati all'interno di livelli ghiaioso-sabbiosi delimitati dai sottostanti strati argillosi. In tali acquiferi emungono pozzi agricoli che presentano scarsa profondità. Non sono presenti pozzi idropotabili, uniche infrastrutture in grado di originare eventi macroscopici per il sovrasfruttamento delle risorse idriche. Tali considerazioni fanno dunque propendere per un'origine naturale e profonda, generata dal collasso di una cavità carsica nel substrato calcareo. Lo studio si è posto pertanto l'obiettivo di analizzare la tipologia e le cause dell'evento e, conseguentemente, di pianificare le indagini conoscitive e le campagne di misure da svolgere nell'intorno del bacino di sprofondamento.

A seguito di un'analisi bibliografica, si è inquadrato il fenomeno mediante la classificazione di Jennings (1977) come una dolina di sprofondamento carsico, detta anche "sinkhole". L'improvviso sviluppo di uno sprofondamento carsico è causato dal collasso del tetto della cavità, dovuto ai fenomeni di dissoluzione dei minerali solubili, e dalla migrazione verso il basso dei suoli di copertura.

Nello sviluppare la ricerca un riferimento fondamentale, ancorché di natura locale, è stato fornito dai risultati di un sondaggio geognostico eseguito in prossimità della voragine, condotto sino a 170 m di profondità senza incontrare il substrato calcareo, bensì la formazione di copertura di terreni argillosi-limosi ed alcuni livelli di breccia nelle sue porzioni terminali.

Gli obiettivi della ricerca sono delineabili come segue:

- individuazione della profondità del substrato calcareo sottostante la copertura di terreni sedimentari: la volumetria della voragine dipende da tale valore, in quanto all'aumentare della copertura il volume della cavità deve assumere dimensioni maggiori affinché il fenomeno possa estendersi fino in superficie;
- definizione dell'assetto tettonico della regione analizzata, in particolare l'individuazione dei possibili sistemi di faglie interessanti il substrato calcareo, che rappresentano le vie preferenziali per il flusso di acqua termale sotterranea nonché elementi di instabilità strutturale;
- costituzione di modelli interpretativi della fenomenologia, per valutare le dimensioni della cavità sotterranea e la sua possibile morfologia;
- pianificazione territoriale che stabilisca le possibili aree di rischio inseribili nel contesto del piano regolatore generale comunale;
- individuazione di ulteriori prospezioni e monitoraggi per il supporto alla pianificazione territoriale, sulla base dei riscontri forniti nel caso specifico.

2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO ED IDROGEOLOGICO

Nello studio di un collasso profondo, la descrizione dei lineamenti geologici, strutturali ed idrogeologici è fondamentale per un'inquadramento generale della zona all'interno della quale possono ricorrere specifiche condizioni correlabili con la dinamica dell'evento. Nel caso in esame è stata studiata una regione di circa 10 km² nell'intorno dello sprofondamento, delimitata (vedi figura 4):

- a settentrione dalla direttrice Est - Ovest passante per la sorgente termale delle Caldanelle sino alle pendici della dorsale di Montepescali-Roccastrada;
- a meridione dalla direttrice Est - Ovest passante per la sorgente termale di Poggetti Vecchi;
- a ponente dalla direttrice NS costeggiante la Fossa Pisana ed intersecante la strada della Fattoria Acquisti;

- a levante dalla direttrice parallela alla precedente e costeggiante la ferrovia e la sub-parallela superstrada Aurelia. E' rilevante la presenza di tali infrastrutture ad una distanza relativamente ridotta dallo sprofondamento.

I terreni di bonifica (b) costituiscono circa il 90% dell'estensione dell'area e contornano interamente l'area dello sprofondamento. Il calcare cavernoso (cv) si presenta in potenti banchi intervallato da livelli di breccia a cemento andritico-gessoso; è presente sui rilievi nella parte orientale, in cui si mostra molto alterato, friabile con struttura brecciforme. Nella parte meridionale è presente il poggio calcareo di "Poggetti Vecchi", da cui scaturisce l'omonima sorgente termale: qui il calcare si presenta più massiccio e cristallino, simile alla tipologia affiorante a Roselle, località termale posta a SE rispetto all'area indagata.

La condizione idrogeologica è caratterizzata dalla presenza di tre sorgenti termali con temperatura di 38°: la sorgente delle Caldanelle in prossimità del rilievo calcareo di Poggio Calvella, quella di Poggetti Vecchi con numerosi punti di emissione e la sorgente di Roselle, più distante dalla voragine. E' plausibile l'ipotesi che l'acquifero profondo carsico sia interessato da un flusso sotterraneo di acqua termale, che metta in collegamento le tre sorgenti, e che sia assoggettato ad un processo di dissoluzione. Si ritiene che le zone di ricarica di tale acquifero possano essere ad elevata distanza dall'area in esame: a N lungo la dorsale di Monticiano – Roccastrada e a NO sulle alture di Gavorrano.

Al fine di verificare, qui o altrove, la presenza dei presupposti geologico strutturali a livello regionale per la formazione di cavità ipogee e, potenzialmente, di conseguenti subsidenze, occorre in primo luogo raccogliere tutte le informazioni disponibili stante la notevole complessità tettonica del substrato.

3. INDAGINI GEOFISICHE

In situazioni strutturalmente complesse, come quella del "Bottegone", le indagini geofisiche trovano ampio e fruttuoso impiego, soprattutto in considerazione dell'ampiezza dell'area interessata. L'utilizzo delle diverse metodologie impiegabili fornisce informazioni incrociate per ottenere l'interpretazione finale dell'assetto geologico e strutturale cercato.

Sono state quindi impostate e seguite le seguenti prospezioni:

- una campagna di misure TDEM, realizzata dal Dott. F. Barsuglia in collaborazione con l'Università di Parigi. Il TDEM (Time Domain Electro Magnetism) è una tecnica elettromagnetica a sorgente controllata nel dominio del tempo, tramite la quale si può determinare la presenza di strati conduttivi nel sottosuolo. E' stata utilizzata per la sua capacità di raggiungere grandi profondità di penetrazione senza richiedere distanze elevate tra trasmettitore e ricevitore. I limiti di questa tecnica consistono nella sua sensibilità agli strati conduttivi e nella bassa risoluzione a causa dello spessore elevato di terreni di copertura;
- una campagna di misure magnetotelluriche, eseguita dalla Prof. A. Zaja dell'Università di Padova. E' una tecnica che consente di determinare la distribuzione della conducibilità elettrica nel sottosuolo grazie alle misure delle variazioni temporali dei campi elettrici e magnetici terrestri. Il metodo magnetotellurico possiede un elevato potere di penetrazione e permette di raggiungere strati resistivi a grande profondità, fornendo i risultati attraverso modelli interpretativi semplificati. Il suo limite è rappresentato dall'influenza dei rumori antropici, dovuti alla presenza di ferrovie e linee elettriche, e dei rumori elettromagnetici naturali.

Inoltre l'ampliamento della ricerca ha portato all'esecuzione di ulteriori prospezioni, di cui si riportano i risultati ottenuti per poter fornire un quadro d'insieme delle varie tecniche utilizzate. Sono state quindi eseguite:

- una campagna di misure geoelettriche e tomografiche, realizzata dal Dott. Rizzo con la collaborazione dell'Università La Sapienza di Roma. I metodi geoelettrici forniscono indicazioni sulla resistività dei litotipi interessati dalla prospezione e, quindi, sulle loro caratteristiche di porosità totale e saturazione;
- una campagna di misure gravimetriche realizzata dal Prof. Toro e dal Prof. Di Filippo dell'Università La Sapienza di Roma. Con queste misure sono state studiate le differenze di densità delle formazioni stratigrafiche caratterizzanti l'area in esame;
- una campagna di misure geochimiche dei gas emergenti; realizzata dalla Dott.ssa N. Voltattorni dell'Università La Sapienza di Roma. Tale analisi si basa sul campionamento superficiale di gas caratteristici di origine endogena, quali il radon, l'elio, il metano e l'anidride carbonica. La presenza di tali gas è legata alla permeabilità dei terreni, sia superficiali che profondi, ed alla presenza di faglie: una zona altamente fratturata del substrato può essere caratterizzata, in superficie, da un'ampia fascia di anomalia nella concentrazione di questi gas;
- una campagna di misure di sismica a riflessione e a rifrazione, realizzata dal Dott. Sozzi. Sono stati realizzati profili di sismica a riflessione e a rifrazione nell'intorno dell'area della voragine. Gli obiettivi di tale prospezione sono la definizione della profondità del substrato e l'individuazione di strutture tettoniche in prossimità dello sprofondamento.

I sondaggi geofisici hanno riguardato un'area estesa, non concentrandosi semplicemente nel ristretto intorno della voragine, ma prendendo in considerazione un ambito in cui la possibile presenza di faglie possa aver interagito con lo sviluppo del fenomeno, ed avendo come obiettivo l'individuazione dell'andamento del substrato.

I dati della campagna di misure TDEM sono stati interpretati sia mediante un modello monodimensionale a strati piano-paralleli, sia mediante la conversione nello schema magnetotellurico tramite l'inversione di Niblett-Bostick, permettendo di ottenere valori di resistività reale in funzione della profondità lungo tre profili. L'interpretazione delle misure ha indicato una condizione di uniformità sottostante la voragine, dove i sondaggi hanno raggiunto profondità di circa 80 m, ed ha evidenziato la presenza dei soli terreni di copertura con i loro tipici valori di resistività. I sondaggi hanno invece individuato il substrato calcareo a bassa profondità nei pressi della sorgente termale delle Caldanelle (vedi fig.4).

I risultati delle indagini avvalorano l'ipotesi geostrutturale del basamento calcareo con configurazione di graben ad asse parallelo alla direzione appenninica, delineato da un sistema di faglie parallele di direzione NNO-SSE in grado di approfondire il calcare cavernoso dalle colline di Montepescali fino ad una profondità massima in prossimità della voragine.

L'interpretazione dei risultati magnetotellurici è avvenuta tramite l'elaborazione di sezioni di resistività lungo due profili, ottenute mediante modelli monodimensionali, e la determinazione di mappe di isoresistività alle profondità di 100-150-250-300 m (fig.3). Tramite questi risultati si è osservato l'abbassamento del substrato verso la zona della voragine, in particolar modo, in direzione SO e la risalita del basamento in direzione della sorgente di Poggetti Vecchi, portando al superamento dell'ipotesi di un graben.

In seguito all'esecuzione di tale campagna è stata avanzata l'ipotesi del successivo approfondimento del basamento calcareo dalle colline calcaree verso la costa tirrenica dovuto ad un sistema di faglie parallele ad asse appenninico secondo una schema tettonico distensionale.

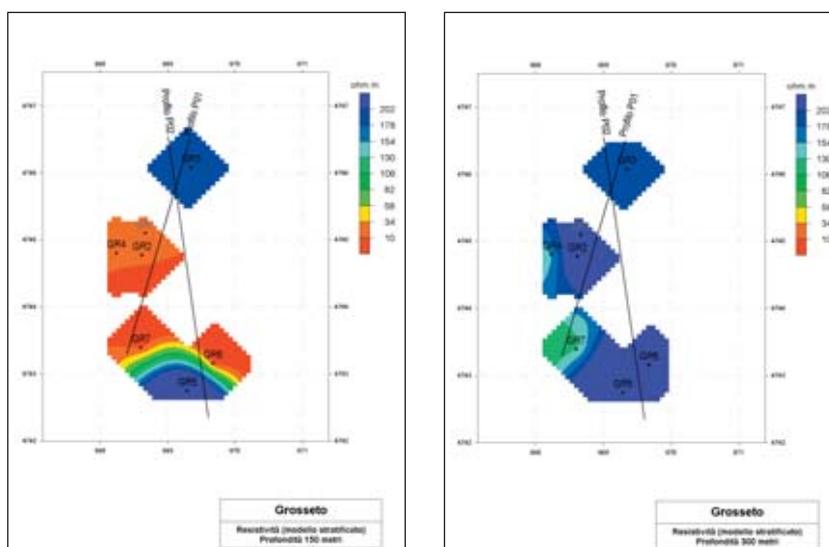


Fig.3 - Mappe di isoresistività alle profondità di 150 e 250 m dal piano campagna

Le successive campagne di misure geoelettriche e gravimetriche hanno confermato la successione elettrostratigrafica evidenziata dai risultati magnetotellurici e compatibile con le caratteristiche dei terreni.

Per quanto riguarda la prospezione tomografica, sono stati realizzati due profili in prossimità della voragine i quali hanno individuato un'anomalia circolare posta a 40 m di profondità sotto la porzione SO della voragine, di diametro pari a 100 m ed interessante terreni rimaneggiati di porosità maggiore; tale anomalia sembra aver individuato il camino di collasso del sinkhole.

Infine, le analisi dei gas endogeni sono state correlate a quelle geofisiche in modo da poter delineare la configurazione tettonica dell'area di interesse. I gas sono stati campionati intorno alla voragine e lungo tre allineamenti posti ortogonalmente ai possibili fenomeni dislocativi di direzione appenninica. Sia in modo discontinuo nell'intorno dello sprofondamento che in modo più continuo lungo i profili, sono state evidenziate delle anomalie positive di concentrazione di tali gas. Inoltre, la presenza di associazioni gassose caratteristiche, quali quelle del radon e dell'anidride carbonica, hanno fatto desumere che i gas possano avere un'origine endogena e che la loro concentrazione aumenti in corrispondenza delle faglie e delle zone maggiormente fratturate del substrato roccioso.

L'assetto strutturale delineato tramite l'esecuzione di queste prospezioni geofisiche e geochemiche appare assai complesso: la voragine del "Bottegone" risulta collocabile al centro di un'area fortemente disarticolata da sistemi di faglie. E' infatti probabile che il forte gradiente con cui si immerge il substrato verso il Tirreno evidenzi la presenza di una serie di faglie di direzione appenninica.

Viene quindi proposto un inquadramento riassuntivo delle ipotesi geostrutturali avanzate a seguito dei risultati raggiunti (fig.4). Si evidenziano faglie di direzione appenninica caratterizzanti l'area in esame e che appaiono come il proseguimento della faglia del torrente Rigo (Bossio et alii, 1994; Costantini & Terzuoli, 1998), che tange a Nord il raccordo tra le alture di Montepescali e la piana. Inoltre è stata ubicata un'ulteriore faglia di direzione appenninica in corrispondenza della sorgente termale delle Caldanelle, al contatto del complesso calcareo delle alture di Montepescali con i terreni di bonifica: tale fenomeno è congruente con i risultati TDEM ed interessa la zona della ferrovia. Infine l'affioramento di Poggetti Vecchi è delimitato a SO da una faglia orientata in direzione ONO-ESE, che pare raccordarsi con gli affioramenti di Roselle.

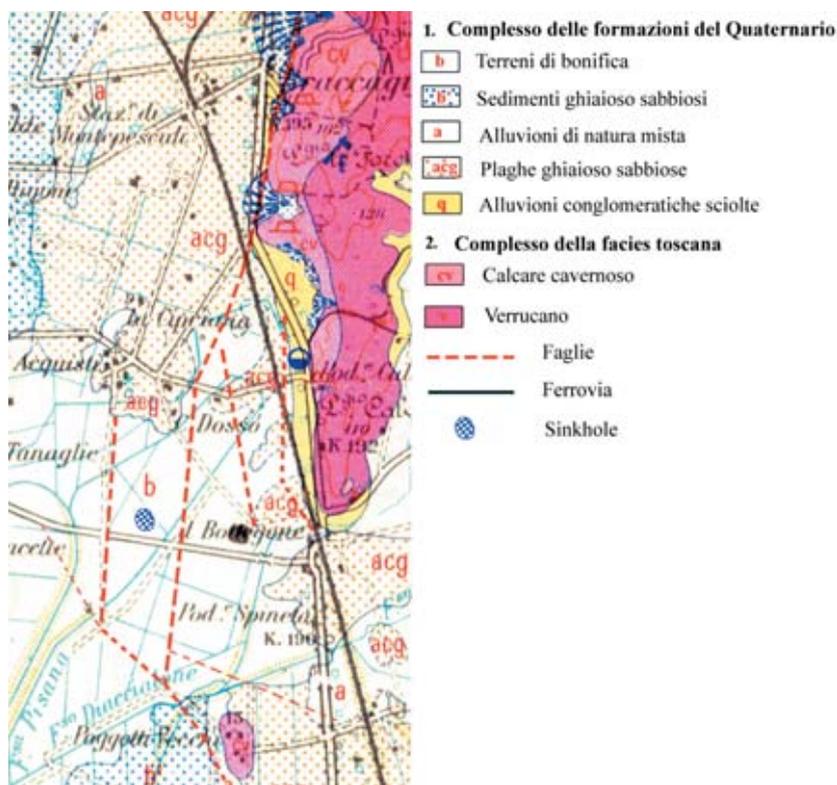


Fig.4 - Carta geologica della regione in esame e ipotesi di andamento del basamento calcareo

Nell'intorno della voragine del "Bottegone" sono state eseguite infine misure di sismica a riflessione mediante la tecnica dell'"optimum offset", particolarmente indicato in situazioni morfologiche pianeggianti. Tali misure sono state integrate a piccola e media profondità da misure di sismica a rifrazione. L'interpretazione di tali dati ha fornito un'ulteriore indicazione sulle caratteristiche degli orizzonti litostratigrafici presenti e sulla profondità del substrato calcareo, con un evidente grado di correlazione con i dati delle precedenti indagini geofisiche, particolarmente per quelli geoelettrici. Il substrato è quindi posizionabile ad una profondità di 200 – 250 m (fig.5).

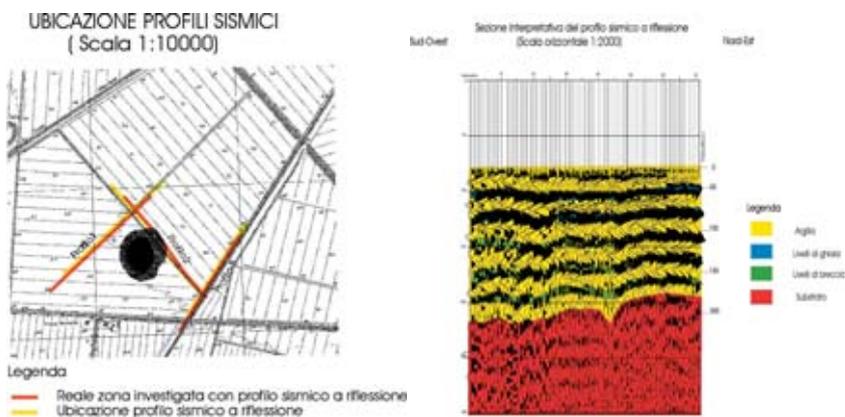


Fig.5 - Ubicazione e sezione interpretativa del profilo sismico n°3

In sintesi l'interpretazione complessiva dei risultati e delle conoscenze sull'area pone il substrato calcareo sottostante la voragine ad una profondità superiore ai 200 m (dato tra l'altro suffragato dal sondaggio geognostico) e a seguito dell'interpretazione dei dati geofisici si è stimato che il basamento sia collocabile ad una profondità di circa 250 m.

4. INDAGINI GEOTECNICHE

Sono state eseguite prove di laboratorio sui materiali presenti nella colonna stratigrafica del sondaggio eseguito a lato della voragine e spintosi fino a 170 m; la maggior parte di tali materiali risulta formata da terreni a prevalente componente argillosa. Considerando la stratigrafia del sondaggio sono state evidenziate delle zone di omogeneità dei materiali presenti, da cui è stato prelevato un campione rappresentativo su cui sono state eseguite l'analisi granulometrica, la determinazione dei limiti di Atterberg e la classificazione mediante la Unified Soil Classification. Inoltre su una carota di breccia proveniente dalla porzione terminale del sondaggio e su campioni di calcare reperito in prossimità della sorgente di Poggetti Vecchi e sulle colline calcaree, sono state eseguite alcune prove qualitative monoassiali (fig.6).

	C_0 (MPa)
CALCARE CAVERNOSO	5 – 10
BRECCIA	13 – 18
CALCARE MASSICCIO	50 – 60

Fig.6 - Prove di compressione monoassiale

5. INDAGINI IDROGEOCHIMICHE

Il fenomeno di sprofondamento si è verificato in un'area di elevata circolazione di acque termali profonde, situazione messa in evidenza dalla presenza di tre sorgenti limitrofe. E' stata svolta una caratterizzazione preliminare delle acque sorgive della zona in esame: le tre sorgenti presentano facies chimica primaria solfato calcica e pertanto appartengono allo stesso acquifero.

L'obiettivo primario dovrebbe essere quello di determinare l'estensione dell'acquifero carsico con un'indagine geochemica ampia, in quanto la zona di ricarica è presumibilmente posta a grande distanza dall'area esaminata. Poiché il fenomeno carsico deve aver subito un'accelerazione dovuta ad un aumento dell'aggressività delle acque, si devono cercare delle correlazioni con i cambiamenti dell'assetto idrogeologico. Nonostante siano difficilmente determinabili le correlazioni con la chiusura delle attività minerarie della regione, alcune analisi potrebbero essere fatte nella zona di Gavarrano, dove la cessazione dell'attività mineraria può aver assunto un peso determinante nella dinamica locale degli acquiferi, e lungo la dorsale di Monticiano-Roccastrada.

6. MODELLI INTERPRETATIVI

I modelli interpretativi della fenomenologia in esame sono stati realizzati tramite modelli analitici e metodi empirici elaborati nell'ambito di problemi minerari, con la finalità principale di valutare le dimensioni del vuoto.

Nel caso della voragine del "Bottegone" l'origine del vuoto non è di tipo antropico, né

sono note le sue caratteristiche geometriche, ma l'impiego delle soluzioni elaborate per le situazioni minerarie permette comunque di fornire una valutazione delle dimensioni del vuoto e di impostare quindi una modellazione numerica della struttura per simulare l'evoluzione del fenomeno.

Sia nei casi di collassi naturali sia in quelli minerari, si formano dei camini di subsidenza la cui evoluzione avviene per successive rotture al tetto della cavità e franamento dei terreni soprastanti, con un aumento di volume degli stessi ed un'estensione del fenomeno fino in superficie. La cavità permane in condizioni di stabilità fintanto che le sollecitazioni, che si distribuiscono nell'intorno del vuoto secondo uno schema ad arco, non superano la resistenza del tetto (fig.7).



Fig. 7 - Evoluzione del camino di subsidenza e meccanismi di rottura al tetto della cavità (da Karfakis M.G.- 1993)

6.1 Morfologia della cavità originaria

Le ipotesi di lavoro per la costituzione dei modelli interpretativi della fenomenologia hanno previsto un modello bidimensionale, considerando sia l'ipotesi di una cavità isometrica che quella di una cavità di direzione principale NNE-SSO. I lineamenti della cavità sono stati analizzati sia in condizione di regolarità, in cui l'altezza della cavità rimane costante per tutta la sua estensione, sia in condizioni di irregolarità, in cui l'altezza della cavità assume valori maggiori nella porzione sottostante l'area SO della voragine, dove si sono manifestati gli abbassamenti più netti. Inoltre è stato valutato il volume della voragine, pari a 250.500 m³.

6.2 Modellazione analitica

6.2.1. Il modello analitico di Lehmann

La teoria di Lehmann consente il calcolo previsionale degli spostamenti in superficie in conseguenza di scavi minerari. Questo genere di analisi è applicabile al caso di giacimenti stratificati, ma viene preso comunque in considerazione nel caso in esame in quanto si vuole ricercare un ordine di grandezza indicativo della geometria della cavità mediante un calcolo a ritroso basato sui dati di subsidenza superficiale.

Considerando un punto del soprasuolo perturbato, si osserva che l'entità del suo sprofondamento è funzione dei vuoti sotterranei che si trovano all'interno di una superficie di influenza. Pertanto l'abbassamento del punto, provocato da scavi minerari, sarà più o meno grande a seconda della posizione della coltivazione stessa rispetto al punto considerato. La zona di influenza è compresa in un cono con il vertice coincidente con il punto del soprasuolo e le generatrici che si spingono fino alla profondità della coltivazione; in pianta le zone di influenza sono delimitate da cerchi concentrici.

Questo metodo è applicabile nei casi di coltivazioni minerarie su lunghe fronti e considera gli effetti di subsidenza superficiale come conseguenza della potenza del giacimento, senza tenere conto delle dinamiche interessanti la copertura. Infine il metodo considera la dimensione perpendicolare alla sezione degli scavi infinitamente estesa e propone una schematizzazione geometrica molto regolare. Tutto ciò si adatta solo parzialmente al caso in esame e si è ritenuto che sottostimi eccessivamente la potenza del vuoto. Si vuole però sottolineare come questo metodo fornisca una configurazione geometrica plausibile, soprattutto per la definizione dell'area di influenza.

L'applicazione del metodo di Lehmann al caso in esame si è basata principalmente sui risultati delle indagini geofisiche e sui dati desunti dal sondaggio eseguito. Si è ipotizzata quindi una profondità media del basamento calcareo di 250 m rispetto al piano campagna, e si è ottenuta una valutazione delle dimensioni della cavità la cui larghezza varia tra 90 e 120 m e l'altezza è compresa tra 24 e 39 m.

6.2.2 Il modello empirico U.K.

Il metodo empirico U.K. permette di valutare la subsidenza prodotta da una cavità ed è basato su osservazioni di situazioni reali di coltivazioni minerarie. Allo scopo si utilizza un abaco (fig.8) che presentano sull'asse delle ordinate il rapporto tra l'entità dello sprofondamento S e l'altezza dello strato coltivato M , e sull'asse delle ascisse il rapporto tra la larghezza dello scavo w e l'altezza della copertura del giacimento h . E' ancora un metodo che utilizza un modello bidimensionale, riferendosi principalmente a coltivazioni su lunga fronte, ma ha il grande vantaggio di basarsi su un'ampia casistica reale. La valutazione ha ancora come ipotesi limitativa quella della regolarità geometrica del vuoto, che non consente di prendere in considerazione l'inclinazione del basamento e le irregolarità della cavità; inoltre non tiene conto dei fenomeni di sviluppo del camino di subsidenza nei terreni di copertura.

Nel caso in esame si è ipotizzato che la larghezza w della cavità cilindrica sotterranea sia compresa tra 90 e 160 m e che la profondità del basamento h vari tra 200 e 300 m. Essendo l'entità dello sprofondamento superficiale nota, l'applicazione del metodo fornisce una larghezza della cavità compresa tra 110 ÷ 140 m, un'altezza variabile tra 43 ÷ 30 m, e la profondità compresa tra 240 ÷ 260 m.

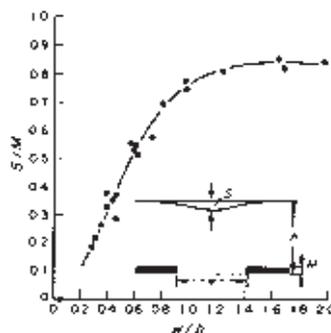
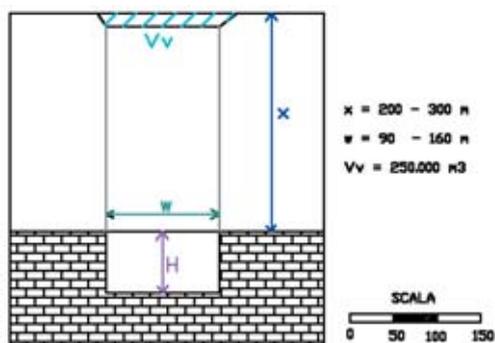


Fig. 8 - Abaco del metodo empirico "U.K." (Forrester and Whittaker, 1976)

6.2.3. Il metodo analitico del camino di subsidenza

Il meccanismo evolutivo di un camino di collasso progressivo è apparso più attinente al caso in esame, in quanto prende in considerazione un franamento successivo dei materiali di copertura ed il loro aumento di volume mediante un coefficiente k , che da analisi bibliografiche risulta essere compreso tra 1.1 – 1.3. Inoltre questo metodo è in grado di considerare un vuoto di dimensioni maggiori rispetto all'entità della voragine superficiale. Il limite maggiore del metodo è la simmetria imposta alla geometria cilindrica del camino, di larghezza prossima all'estensione della zona circolare della voragine (fig.9), e l'inclinazione del substrato viene considerata solo qualitativamente.

Il metodo vede la determinazione del volume del camino di collasso e del suo aumento tramite il coefficiente k . Il volume minimo della cavità sotterranea V_{cav} posto pari alla somma del volume noto della voragine V_v e dell'aumento di volume del camino di collasso DV_{cam} ; in tal modo si è in grado di valutare l'altezza della cavità H , essendo noto il diametro del camino posto pari a quello del vuoto sotterraneo (vedi fig.9).



VOLUME DEL CAMINO DI COLLASSO

$$V_{cam} = \frac{\pi \cdot w^2 \cdot x}{4}$$

AUMENTO DI VOLUME DEL CAMINO

$$\Delta V_{cam} = (k - 1) \cdot V_{cam}$$

VOLUME DELLA CAVITA'

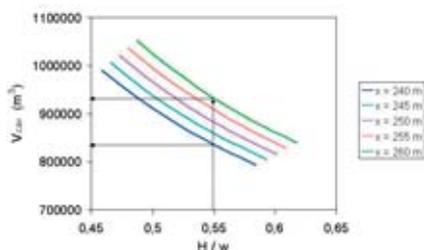
$$V_{cav} = V_v + \Delta V_{cam}$$

ALTEZZA DELLA CAVITA'

$$H = \frac{4 \cdot V_{cav}}{w^2} \cdot x$$

Fig.9 - Configurazione del metodo analitico del camino di subsidenza

La profondità del substrato calcareo è stata fatta variare da 200 a 300 m, l'intervallo di variazione della larghezza w della cavità è posto tra un valore minimo di 90 m, stabilito a seguito dell'applicazione del metodo di Lehmann, ed un valore massimo di 160 m, corrispondente alla dimensione trasversale media della voragine. Applicando il modello, si ottengono valori più probabili delle dimensioni della cavità (fig.10):



AUMENTO DI VOLUME

$$K = 1.2$$

LARGHEZZA CAVITA'

$$w = 120 - 140 \text{ m}$$

ALTEZZA CAVITA'

$$H = 70 - 68 \text{ m}$$

PROFONDITA' CAVITA'

$$x = 240 - 260 \text{ m}$$

VOLUME CAVITA'

$$V_{cav} = 800.00 - 1.060.000 \text{ m}^3$$

Figura 10: Dimensioni più probabili della cavità

6.3. Modelli strutturali

In definitiva in base ai risultati delle indagini geofisiche ed all'applicazione dei metodi analitici sono stati proposti due modelli strutturali, entrambi con la profondità del substrato a 250 m di profondità.

Il primo modello propone una cavità con il basamento suborizzontale, di larghezza pari al diametro del camino di subsidenza ed di altezza pari a 70 m. Il secondo modello appare più attinente della situazione reale e considera l'inclinazione del substrato (fig.11): si è ipotizzato che la cavità presenti profondità maggiori nella porzione a SO del bacino di sprofondamento.

6.4. Modellazione numerica

E' stata infine eseguita una modellazione numerica ad elementi finiti delle configurazioni ipotizzate, mediante l'utilizzo del codice di calcolo Phase2. Tale codice non permette di analizzare spostamenti di entità pari a quelli reali, non consentendo di risolvere i sistemi di equazioni secondo un'impostazione euleriana.

Durante la modellazione è sorto, inoltre, il problema della caratterizzazione geomeccanica

dei materiali di copertura, i cui parametri sono stati assegnati con un intervallo di variabilità, osservando le condizioni in corrispondenza delle quali la configurazione si avvicinava maggiormente alla situazione strutturale proposta. I risultati ottenuti hanno validità qualitativa; la modellazione (fig.14) è riuscita soltanto ad evidenziare la tipologia degli spostamenti verticali ed orizzontali, anche se la loro entità è risultata inferiore ai valori reali. Inoltre, nella simulazione del fenomeno non compaiono gli effetti dovuti al rigonfiamento del terreno, peraltro probabilmente di entità contenuta (nell'approccio analitico valutato nell'ordine del 20%) viste le caratteristiche parzialmente coesive dei terreni. Per concludere, l'esecuzione di una modellazione più completa dovrebbe essere realizzata con codici di calcolo maggiormente indicati, capaci di valutare i grandi spostamenti attraverso la deformazione del reticolo di discretizzazione; inoltre sarebbe di estrema utilità una caratterizzazione più precisa e mirata dei materiali di copertura presenti.

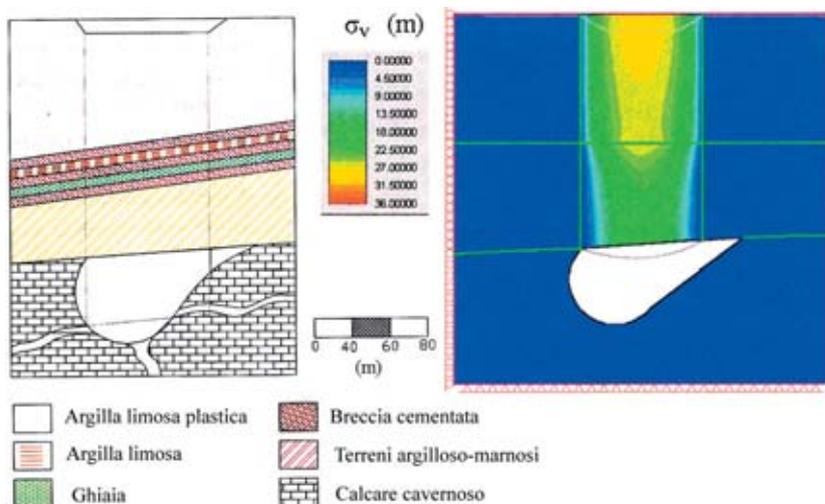


Fig. 11 - Modello strutturale e andamento degli spostamenti verticali

CONCLUSIONI

La subsidenza studiata è risultata ascrivibile a cause di tipo naturale. Non vi sono evidenze particolari che facciano propendere per un collasso di una cavità ipogea simmetrica: le condizioni geologico strutturali a livello regionale e le fenomenologie carsiche evidenziabili in strutture poco profonde in genere sono concomitanti a fasce carsificate lungo zone di faglia o in prossimità dell'incrocio di lineamenti tettonici.

Da un punto di vista generale, l'obiettivo dello studio è stato rivolto all'estensione dell'indagine in un'ottica di pianificazione territoriale che, a seguito dell'inquadramento preciso dell'assetto geologico e strutturale dell'area e della possibile presenza di ulteriori cavità sotterranee, stabilisca le possibili aree di rischio ed assegni le classi di uso del territorio nel contesto amministrativo del Piano Regolatore Comunale.

L'area analizzata è prevalentemente agricola con piccoli insediamenti abitativi ed alcuni allevamenti di bestiame. Gli elementi di maggiore impatto sono la linea ferroviaria ad alta frequenza di transito e la parallela superstrada Aurelia. Queste due infrastrutture sono posizionate in prossimità delle alture di Montepescali a circa 2 km di distanza dalla voragine del Bottegone (fig.4).

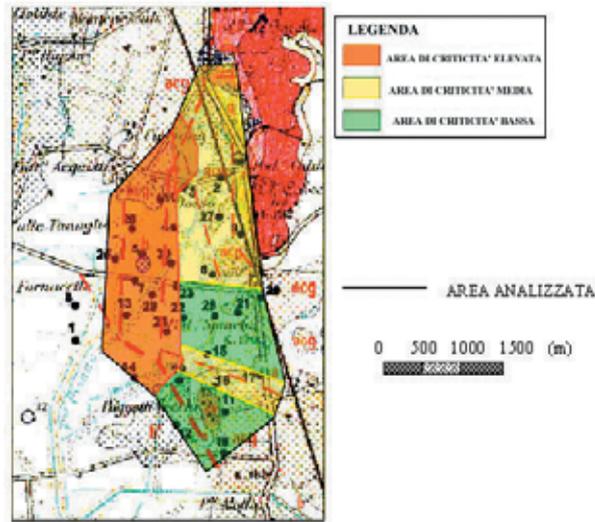


Fig.12 - Definizione qualitativa delle aree di criticità all'interno della zona studiata

La suddivisione del territorio studiato in aree a diversa criticità è basata su un criterio qualitativo. L'elemento guida che ha permesso di ritenere che un'area sia in condizioni di maggiore criticità rispetto ad altre è stato l'identificazione delle possibili faglie, che rappresentano elementi di instabilità strutturale e linee di flusso di acqua termale sotterranea. Pertanto appare verosimile che la formazione di cavità sotterranee, originata da fenomeni di dissoluzione, possa essere avvenuta in prossimità dei fenomeni dislocativi. Le esposizioni più problematiche sono state individuate nelle porzioni occidentali dell'area, dove si è verificato il fenomeno di sprofondamento e dove si ipotizza l'intersezione di diversi fenomeni dislocativi (fig.22). In queste porzioni il substrato calcareo si trova a più di 200 m di profondità e le dimensioni delle eventuali cavità sotterranee devono essere elevate affinché l'eventuale fenomeno di collasso possa estendersi fino in superficie. Per questa ragione in tali aree si suppone che l'entità degli eventuali sprofondamenti superficiali possa essere più ingente rispetto alle altre zone.

In prossimità della ferrovia l'esposizione legata al collasso di cavità è mediamente alta. In corrispondenza del contatto tra la pianura alluvionale e le colline calcaree è stato individuato un fenomeno dislocativo, che approfondisce il substrato calcareo fino a profondità di circa 80-100 m. In questa zona si può quindi ipotizzare che i collassi di cavità ipogee, di dimensioni anche inferiori rispetto a quella che ha originato la voragine in esame, abbiano una maggiore probabilità di estendersi fino in superficie, originando fenomeni di sprofondamento più piccoli rispetto al caso del Bottegone.

Al fine di fornire uno strumento premonitore per la gestione delle infrastrutture (Ferrovia e superstrada Aurelia) è possibile realizzare un sistema di monitoraggio che preveda misure della variazione altimetrica di punti di riferimento, a sua volta collegato con un sistema di allerta per superamento di un livello soglia di cedimenti (beninteso che a priori non possono essere costituiti legami causa effetto con fenomeni imponenti quali quello descritto). Nel caso in esame, si può ipotizzare il monitoraggio di un tratto di linea ferroviaria della lunghezza di oltre 4 km dalle porzioni prossime alla località di Poggetti Vecchi verso Nord, oltre la sorgente termale delle Caldanelle. Le misure di controllo potrebbero essere costituite, ad esempio, da capisaldi equipaggiati con antenne GPS, oppure trasduttori di spostamento differenziali applicati sulle rotaie o, ancora, sistemi ottici livellometrici sempre disposti lungo la linea ferroviaria e trasversalmente ad essa.

Infine, si potrebbe progettare un intervento di sistemazione ambientale della voragine: essendo già avvenuta la rinaturalizzazione delle sponde e la creazione di un piccolo lago (fig.13), sarebbe auspicabile l'impianto di specie vegetali sulle sponde e sulla strada sterrata interessata dal fenomeno di sprofondamento.

Sulla scorta dell'esperienza maturata nello studio, è sicuramente possibile rendere sistematica l'adozione di tecniche di prospezione su ampie aree, non disgiunte da correlate analisi numeriche parametriche tali da evidenziare le potenziali concomitanze di situazioni geologico strutturali di rischio. In tale ottica, la modellazione potrebbe essere quindi mirata al superamento delle limitazioni della prima fase dello studio, introducendo i comportamenti tipici dei mezzi granulari: anche con tempistiche non stringenti, si giungerebbe ad una migliore zonizzazione delle aree poggianti sulle formazioni del Cavernoso toscano.

BIBLIOGRAFIA

- A.A. (1971) - La Toscana meridionale. Fondamenti geologico-minerari per una prospettiva di valorizzazione delle risorse naturali Rendiconti della Società Italiana di Mineralogia e Petrologia, Vol. XXVII, Fasc. speciale
- AMBROSETTI P. ET ALII (1978) - Evoluzione paleogeografica e tettonica nei bacini Tosco-Umbro-Laziali nel Pliocene e nel Pleistocene inferiore Mem. Soc. Geol. It., 19(1978), 573-580
- BECK B. F., WILSON W. L. (1987) - Karst hydrogeology: engineering and environmental application Proceedings of the second multidisciplinary conference on sinkholes and the environmental impacts of karst (Orlando, Florida, 9-11/02/1987), Balkema, Rotterdam, Boston
- BENCINI A., DUCHI V., MARTINI M. (1977) - "Geochemistry of thermal springs of Tuscany (Italy)" Geochemical Geology, 19(1977), 229-252, Elsevier Sci. Publ. Comp., Amsterdam
- BOCCALETTI M., COLI M. (1983) - "La tettonica della Toscana: assetto ed evoluzione" Mem. Soc. Geol. It., 25(1983), 51-62
- BRAVETTI L., PRANZINI G. (1987) - "L'evoluzione quaternaria della pianura di Grosseto (Toscana): prima interpretazione dei dati del sottosuolo" Geogr. Fis. Dinam. Quat., 10(1987), 85-92
- GROTHE H., BECKER H., MICHELETTI G. F. (1967) - "Ingegneria mineraria. Volume 4" Lueger, Enciclopedia della tecnica, Edizioni PEM S.p.A., Roma
- KAFARFIS M. G. (1993) - "Residual subsidence over abandoned coal mines behavior of rock structures" Comprehensive Rock Engineering, Vol. 4 (Excavation, Support and Monitoring), Pergamon Press
- KAUFMAN A., KELLER G. (1980) - "The magnetotelluric sounding method" Elsevier, Amsterdam
- VOZOFF K. (1971) - "The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins" Geophysics, 37(1971), 98-141
- WHITTAKER B. N., REDDISH D. J. (1993) - "Subsidence behavior of rock structures" Comprehensive Rock Engineering, Vol. 4 (Excavation, Support and Monitoring), Pergamon Press
- WOODROOF S. (1963) - "Ground Support Methods. Methods of working coal and metal mines. Volume 2" Pergamon Press