

Indagini geofisiche e geochemiche di un sinkhole in formazione nell'area di Guidonia (Lazio)

Geophysical and geochemical investigations of a developing sinkhole in Guidonia area (Lazio)

ARGENTIERI A. (*), CARLUCCIO R. (**), CECCHINI F. (*****), CHIAPPINI M. (**),
CIOTOLI G. (***), DE RITIS R. (**), DI FILIPPO M. (****), DI NEZZA M. (**),
MARCHETTI M. (**), MARGOTTINI S. (*****), MATERNI V. (**), MELONI F. (*****),
NARDI A. (**), ROTELLA G. (*), SAPIA V. (**), VENUTI A. (**)

RIASSUNTO – Il Bacino delle Acque Albule, di età plio-quaternaria, è già noto per la presenza di *sinkhole*; sin dalla primavera del 2013 è in corso lo studio di un processo di subsidenza in atto che ha sviluppato un'area depressa in prossimità dell'abitato di Guidonia.

Nell'ultimo anno il fenomeno si è intensificato dando luogo a due sprofondamenti lungo il margine orientale della depressione. Sono state, quindi, avviate campagne di indagini geofisiche e geochemiche al fine di comprendere la genesi e l'evoluzione del fenomeno. I risultati dei rilievi hanno consentito una caratterizzazione geologica e strutturale, evidenziando la presenza di travertino ai margini delle depressione e la sua assenza all'interno. Le indagini geofisiche e geochemiche hanno evidenziato lineamenti, con direzione NW-SE e NNE-SSW, riconducibili a una possibile fratturazione della depressione e compatibili con i *trends* strutturali regionali. In base alle analisi fin ora effettuate è stato possibile pianificare ed eseguire indagini geognostiche che consistono in due sondaggi finalizzati alla definizione della stratigrafia all'interno e ai margini dell'area interessata dalla subsidenza.

PAROLE CHIAVE: Bacino delle Acque Albule, *sinkhole*, subsidenza, prospezioni geofisiche, prospezioni geochemiche

ABSTRACT - The Plio-Quaternary Acque Albule Basin is already known for the occurrence of sinkholes; since the spring 2014, it has been ongoing the study of an active subsidence process, which formed a depressed area near the Guidonia village. During the last year, the phenomenon has become more intense giving rise to two collapses along the eastern rim of the depression. Thus, geophysical and geo-

chemical investigation campaigns started in order to understand the genesis and evolution of the phenomenon. Survey results allowed a geological and structural characterization, showing the presence of "travertino" at the depression margins and its absence therein. It has been recognized, by the geophysics, features with NW-SE and NNE-SSW direction ascribable to a possible depression fracturing and consistent with regional structural trends. Thus, it has been possible to plan and perform geognostic investigation consisting in two drillings aimed to define the stratigraphy of the marginal and inner part of the depression.

KEY WORDS: Acque Albule Basin, sinkhole, subsidence, geophysical prospecting, geochemical prospecting

1. - INTRODUZIONE

L'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia e la Provincia di Roma, Servizio Difesa del Suolo, nell'ambito di un protocollo d'intesa finalizzato alla "*Caratterizzazione geologico-tecnica e geofisica di siti interessati da sinkhole e da eventi franosi nell'ambito del territorio della Provincia di Roma*" hanno avviato congiuntamente con la Regione Lazio, l'Università di Roma "Sapienza" e l'Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria del Consiglio Nazionale delle Ricerche, una campagna di indagini multidisciplinari in siti soggetti a sprofondamenti sia naturali, che di origine antropica riconducibili a *sinkhole*.

(*) Città Metropolitana di Roma Capitale - Dipartimento IV "Servizi di Tutela e Valorizzazione dell'Ambiente"- Servizio 1 Difesa del Suolo, viale di Villa Pamphili 84 00152 Roma

(**) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, via di Vigna Murata, 605, 00143, Roma

(***) C.N.R.- Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria (IGAG), Area della Ricerca di Roma1 - Montelibretti, via Salaria Km 29,300, Monterotondo, Roma

(****) Sapienza- Università di Roma, Dipartimento di Scienze della Terra, piazzale Aldo Moro 5 00185, Roma

(*****) Regione Lazio- Area Difesa del Suolo- Servizio Geologico, viale del Tintoretto, 432, 00142, Roma

(*****) Geologia-Prospezioni geofisiche-Topografia, Roma

In quest'ambito si inserisce lo studio descritto nel presente lavoro riguardante il sito di Guidonia, ubicato nel Bacino delle Acque Albule. Tale bacino è situato nel Lazio a circa 25 km a NE di Roma ed è caratterizzato dalla presenza di depositi di Travertino termogenico del tardo Pleistocene (SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA, F°150, 1967) legato all'ultima fase dell'attività eruttiva dei Colli Albani.

Il Bacino delle Acque Albule è circondato dai Monti Cornicolani, Lucretili e Tiburtini e dai distretti vulcanici dei Monti Sabatini e Colli Albani, e si sviluppa tra le quote di circa 70-80 m sul livello del mare. Una tettonica trascorrente destra con direzione N-S interessa le sequenze meso-cenozoiche dei Monti Cornicolani la cui prosecuzione è ipotizzata verso Sud (FACCENNA, 1994; FACCENNA *et alii*, 1994; FACCENNA *et alii*, 2008), dove fratture con direzione N40°E interessano unità litologiche più giovani compresi i depositi di travertino (FACCENNA *et alii*, 1994; SAGNOTTI *et alii*, 1994). Inoltre, nel 2001, eventi sismici di bassa intensità legati a due differenti strutture sismotettoniche, rispettivamente, con direzione N-S e antiappenninica hanno interessato il Bacino delle Acque Albule (GASPARINI *et alii*, 2002).

Il bacino è stato caratterizzato, sin da tempi storici, da fenomeni di subsidenza e sprofondamento (CAPELLI & SALVATI, 2002; NISIO & SALVATI, 2004; MELONI *et alii*, 2012) evidenziati anche dalla formazione di tre piccoli laghi, Colonnelle, Regina e San Giovanni (MAXIA, 1950; PENTECOST & TORTORA, 1989; CARAMANNA, 2002; NISIO, 2003; 2008). L'area è ricca di sorgenti idrotermali sfruttate sin dall'epoca romana e di fenomeni di degassamento, nonché di un'intensa attività estrattiva del travertino litoide. Il Bacino delle Acque Albule è interessato da diverse tipologie di *sinkhole*: *cave collapse sinkhole*, *cover collapse sinkhole* e *deep piping sinkhole* (ANNUNZIATELLIS *et alii*, 2010).

2. - METODI

La Regione Lazio, vista l'alta suscettibilità da *sinkhole* del territorio, ha rivolto, in occasione del D.G.R. 1159/2002 (REGIONE LAZIO, 2002), maggior attenzione alle tecniche di indagine delle aree soggette a sprofondamento (geoelettrica, microgravimetria e prospezione dei gas nel suolo). Attualmente si sta cercando di implementare tali tipologie di indagini per meglio caratterizzare le aree soggette a questo genere di rischio, ed a tale proposito nel sito in esame non solo sono state utilizzate le tecniche geofisiche previste dalla normativa vigente, ma sono state sperimentate anche ulteriori tecniche che sembrano adattarsi bene allo studio di questi fenomeni.

Le cavità naturali e la fratturazione ad esse associata spesso determinano evidenti contrasti geofisici fino ad una distanza pari a due o più diametri dalla cavità (BISHOP *et alii*, 1997). Al fine di determinare la geometria superficiale e sepolta della depressione, nonché l'eventuale presenza di cavità, sono state ef-

fettuate nell'area di studio (figg. 1, 2) misure di altimetria GPS, gradiente verticale del campo magnetico, microgravimetria, sismica a rifrazione, tomografia elettrica, analisi dei gas del suolo ed indagini tromometriche, misurando quindi la variazione di diverse proprietà fisiche e chimiche a diverse risoluzioni. Alcuni di questi metodi sono particolarmente adatti all'individuazione nel sottosuolo di eventuali cavità riempite d'aria, acqua o materiale non consolidato (MCDONALD & DAVIES, 2003).

Il rilievo GPS è stato effettuato in configurazione differenziale e acquisizione continua, mentre misure "stop and go" sono state eseguite per la localizzazione esatta degli elettrodi impiegati nelle misure di tomografia elettrica. Durante le misure, la distanza tra stazione base e ricevitore mobile si è mantenuta entro un raggio di 400 m.

I dati magnetici sono stati raccolti con un magnetometro scalare (Geometrics G858) con sensibilità di 0.01nT, in configurazione gradiometrica verticale, usando una separazione dei sensori di 80 cm e frequenza di campionamento di 1 Hz. Le misure sono state acquisite lungo profili orientati N°25 e usando una spaziatura di 2 m.

Le misure microgravimetriche sono largamente impiegate per rilevare piccoli volumi di minor densità associati a cavità e/o al loro riempimento. In questo caso 56 stazioni microgravimetriche sono state distribuite omogeneamente nell'area di studio, accuratamente distanziate ad intervalli di 25 m. Per le misure è stato impiegato un gravimetro LaCoste & Romberg. Per stimare con precisione la deriva strumentale è stata impiegata una rete di controllo di 5 stazioni gravimetriche. L'elaborazione dei dati ha compreso la rimozione degli effetti di marea, del carico atmosferico e della deriva strumentale. L'acquisizione delle misure è avvenuta mediante circuiti chiusi e il valore di gravità in ogni stazione è stato calcolato in relazione alle stazioni della rete di controllo. Le letture hanno fornito un errore con scarto quadratico medio inferiore a 5 μ Gal. Questa rete è stata correlata alla Stazione Gravimetrica Assoluta di S. Angelo Romano (DI NEZZA, 2007; D'AGOSTINO *et alii*, 2008) posizionata direttamente sugli affioramenti carbonatici meso-cenozoici dei Monti Cornicolani. Per ottenere l'Anomalia di Bouguer sono state applicate la correzione in aria libera e la correzione di Bouguer con densità di 1900 kg/m³ (MAINO *et alii*, 1969). Per ottenere le Anomalie Residue è stato rimosso dai dati l'andamento del campo regionale approssimato a una superficie semplice planare, in conformità con precedenti studi effettuati nell'area (MAINO *et alii*, 1969; TORO, 1976; DI FILIPPO & TORO, 1980, 1995; DI NEZZA *et alii*, 2012).

Nelle indagini di prospezione sismica a rifrazione, sono stati utilizzati 24 geofoni GS20DX verticali Geospace (frequenza 14 Hz, spaziatura di 10 m e tempo di registrazione totale di 512 ms per ogni colpo di mazza), posti lungo uno stendimento di 220 m con direzione NW-SE. Tale indagine ha fornito una stima delle variazioni verticali e oriz-

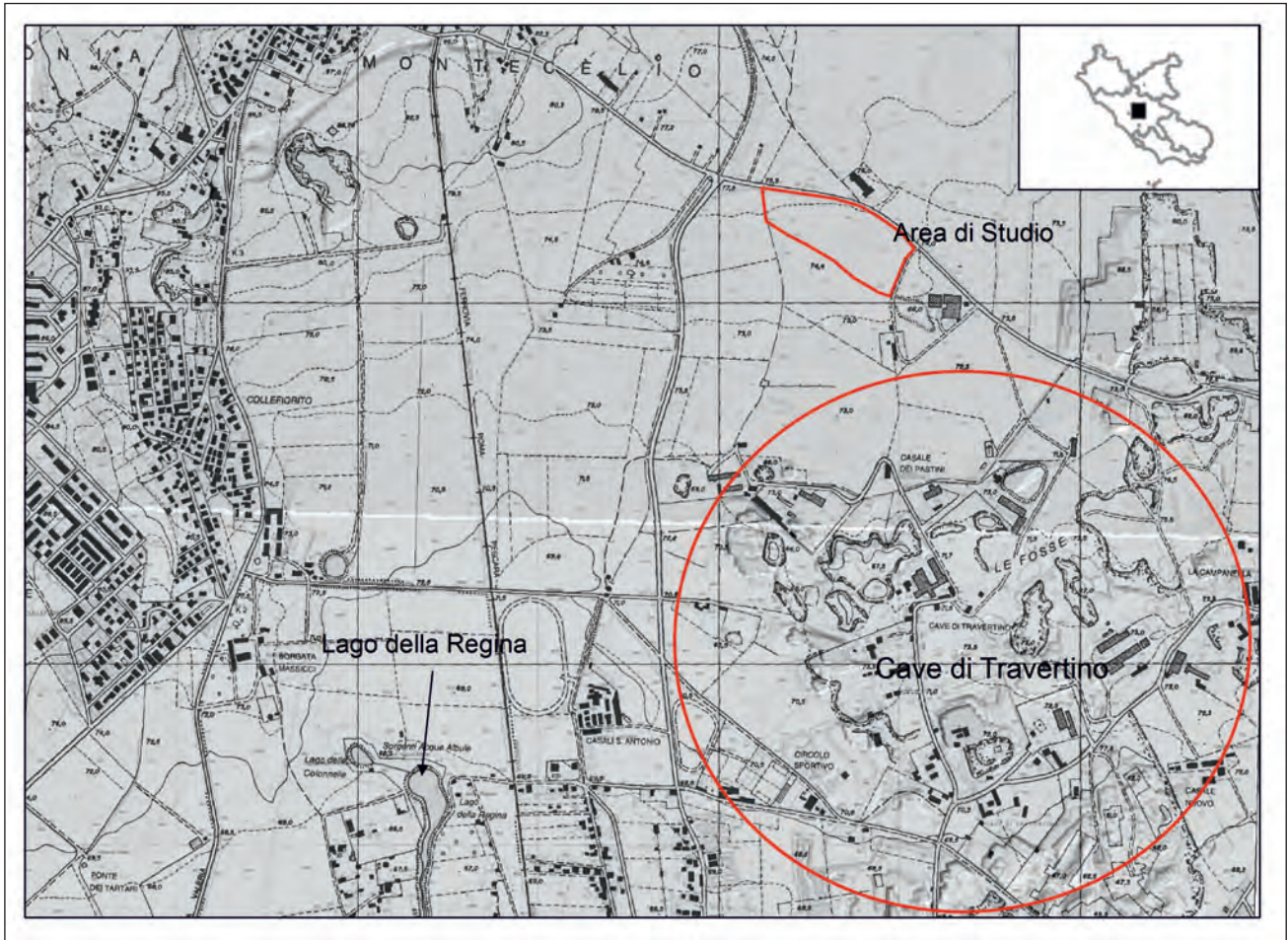


Fig. 1 - Ubicazione dell'area di studio.
- Location of the studied area.

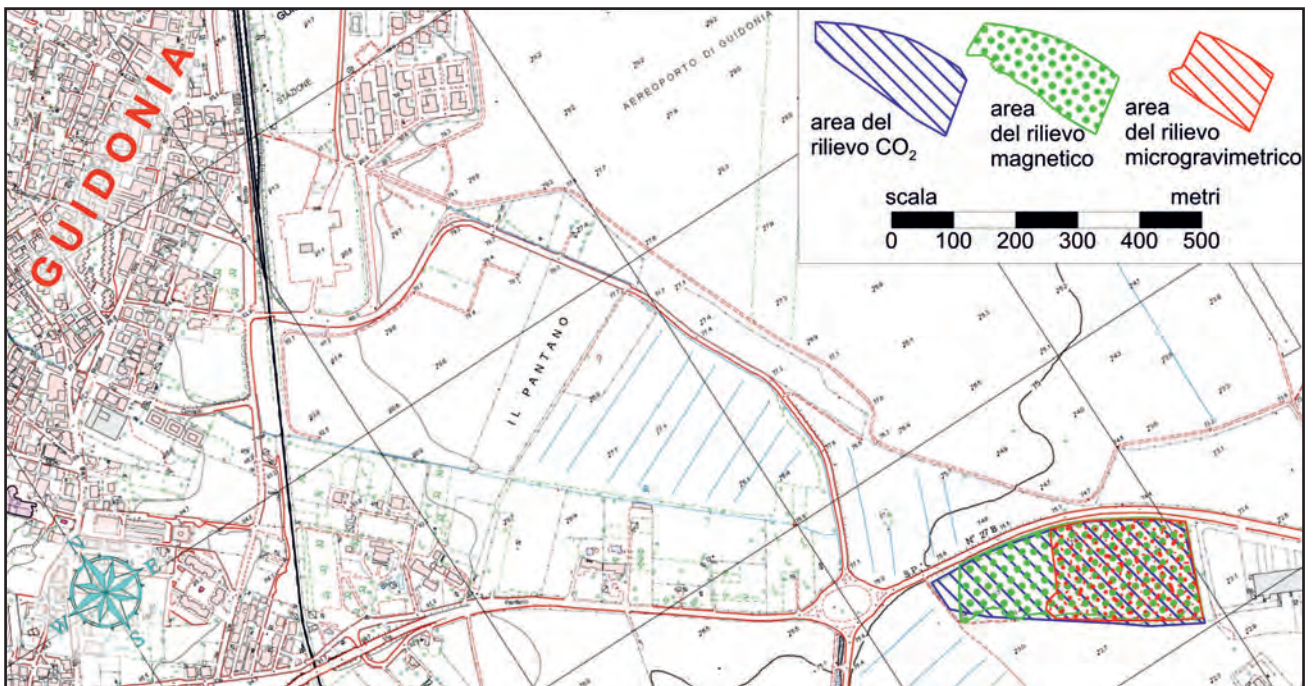


Fig. 2 - Aree dei rilievi microgravimetrici, magnetici e di CO₂.
- Microgravimetric, magnetic and CO₂ survey areas.

zontali delle proprietà elastiche dei sedimenti all'interno ed intorno la depressione (TURKER, 2004; OTHMAN, 2005; TEZCAN *et alii*, 2006). Le travel-time, le corrispondenti sezioni e le velocità delle onde P sono state stimate utilizzando il programma Wavepath Eikonal Tomografia (SCHUSTER & QUINTO-BOSZ, 1993), ed hanno permesso di stimare la morfologia sepolta, i diversi strati di riempimento e composizione fino ad una profondità di 50 m dal piano campagna.

Per quel che riguarda le indagini di prospezione elettrica, sono state effettuate misure 2D di resistività con strumentazione Iris Syscal Pro 72 canali lungo un profilo con direzione E-W, lungo 360 m, utilizzando 48 elettrodi e spaziatura di 5 m. I dati ottenuti sono stati processati per variazioni orizzontali e verticali utilizzando un *array* di misura del tipo Wenner-Schlumberger.

Date le caratteristiche del fenomeno esaminato legate soprattutto alla scala a cui si è manifestato e alla sua rapida evoluzione, è stato effettuato un campionamento dettagliato dei gas del suolo secondo una griglia di circa 50 metri al fine di caratterizzare la zona di fratturazione superficiale che si è formata in questa fase iniziale della formazione del *sinkhole* (ANNUNZIATELLIS *et alii*, 2008; CARAMANNA *et alii*, 2008). È noto in letteratura, che le faglie e le fratture agiscono come vie preferenziali per la migrazione dei gas endogeni verso la superficie (CIOTOLI *et alii*, 2007), e che la formazione dei *sinkhole* è spesso collegata alle zone caratterizzate da un forte degassamento e da acque sotterranee acide arricchite in CO₂ (CARAMANNA *et alii*, 2008; NISIO *et alii*, 2007). Pertanto, la distribuzione superficiale della concentrazione di alcune specie gassose nel suolo può fornire importanti informazioni sulla presenza di faglie e/o fratture anche laddove queste sono sepolte sotto una copertura plastica (CIOTOLI *et alii*, 2013a; 2013b; GIUSTINI *et alii*, 2010; ANNUNZIATELLIS *et alii*, 2008), come i sedimenti argillosi non consolidati. I campioni di gas del suolo sono stati raccolti secondo un protocollo di campionamento ben consolidato (BEAUBIEN *et alii*, 2003; CIOTOLI *et alii*, 2007) inserendo nel suolo una sonda di acciaio di circa 6 mm di spessore, fino ad una profondità di variabile tra i 60-80 cm sufficiente per evitare l'influenza dell'aria atmosferica (HINKLE, 1994). Le analisi sono state condotte direttamente *in situ* collegando direttamente alla sonda un analizzatore di gas portatile (Dräger strumento X-am 7000; precisione <5%), dotato di un sistema di pompaggio e di sensori infrarossi e catalitici per la misura di CO₂, H₂ e H₂S. Nell'area di studio solo la CO₂ è stata rilevata in concentrazioni significative, mentre le altre specie gassose sono al di sotto della sensibilità strumentale (1 ppm sia per H₂ e H₂S).

Le indagini tromometriche eseguite non hanno permesso finora di ottenere dati di buona qualità e ben interpretabili, probabilmente per il forte disturbo legato a sorgenti provenienti dal vicino aeroporto e dalle aree di attività estrattiva.

3. - RISULTATI

3.1. – CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE DEL SITO DI GUIDONIA

Al margine più orientale dell'area di studio (fig. 1), confinante con la s.p. 27b e l'aeroporto militare di Guidonia a N, con le attività estrattive a S e SE e con il canale dell'Acqua Acetosà ad W, si è verificato in tempi recenti, all'interno di un terreno agricolo, un fenomeno di subsidenza (figg. 3, 4, 5) che ha dato luogo nel 2013 alla formazione di due voragini sul margine orientale della depressione morfologica (v. fig. 3). È stata effettuata un'analisi temporale e spaziale della cartografia storica (AA.VV., sec. XVI-XIX, 1655-1667; 1816-1859; I.G.M., 1904) (fig. 6) per valutare la presenza/assenza di *sinkhole* nel sito al fine di definire l'anno di comparsa del fenomeno o di elementi che potrebbero averne favorito l'insorgenza. La cartografia d'epoca non ha fornito informazioni significative riguardo la possibile origine naturale o antropica di questa subsidenza ad eccezione di una zona posta in prossimità del sito. Infatti, la località Le Calcare (ubicata a nord del sito) compare nella cartografia di AMETI, 1693 ed è una segnalazione di una possibile attività estrattiva in corrispondenza della quale in CERMELLI, 1782 vengono riportate le cave di travertino (fig. 6). Già dalle prime carte dell'IGM del 1904, i siti di cavatura si



Fig. 3 - Fotografia dell'area depressa vista da S.
- Photograph of the depressed area taken from S.



Fig. 4 - Fotografia del margine meridionale della depressione vista da N.
- Photograph of the southern rim of the depression taken from N.



Fig. 5 – Vista da S. - a) In primo piano sprofondamento S2 e sullo sfondo sprofondamento S1. - b) Dettaglio della frattura prossima allo sprofondamento S2.
 - Photograph taken from S. - a) S1 collapse in the foreground, S2 collapse in the background. - b) Detail of the fracture next to S2 collapse.

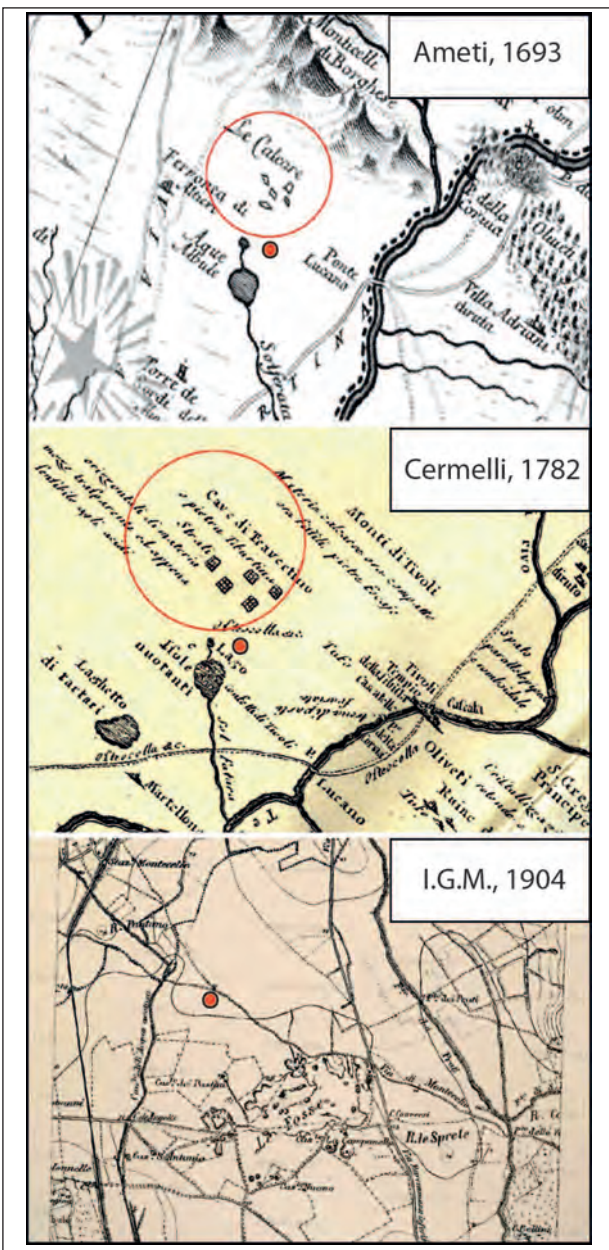


Fig. 6 - Selezione di cartografie storiche dell'area. Il punto rosso indica il sito studiato, mentre il cerchio rosso l'area delle antiche cave.
 - Historical maps selection of the area. The red dot indicates the study site, while the red circle the area of the ancient quarries.

rinvengono a sud dell'area in oggetto in corrispondenza delle attuali aree industriali. I primi indizi di subsidenza, nel sito, si osservano nelle foto aeree del 2000 (REGIONE LAZIO, 1999-2000) e risultano più evidenti in quelle del 2002-2003 (REGIONE LAZIO, 2002-2003).

Nell'Ottobre 2013, attraverso un primo rilievo GPS, è stata rilevata un'area ribassata a geometria ellittica con asse maggiore di 220 m (orientato NNE-SSW) e asse minore di 110 m (fig. 7). Lateralmente sono state individuate due depressioni minori di forma circolare e diametro approssimativo di 80 m.

Lo sprofondamento indicato come S1 (fig. 8) è stato monitorato a partire dal 11 settembre 2013 attraverso fotografie superficiali, video sondaggi profondi, misure metriche dirette. Nell'arco di circa tre mesi è stata osservata un'evoluzione mor-

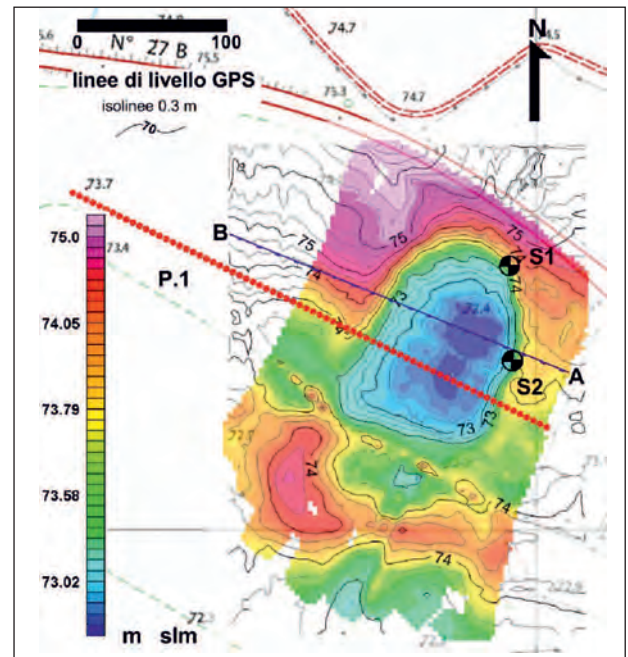


Fig. 7 - Modello altimetrico digitale dell'area in subsidenza. Sono mostrate le tracce dei profili elettrico (P.1), gravimetrico e sismico (AB) e l'ubicazione dei due sprofondamenti S1 e S2.

- Digital elevation model of the subsiding area. It has been showed the traces of the electrical (P.1), microgravimetric and seismic profiles (AB), and the location of the two collapses, S1 and S2.

fologica sia superficiale che interna del pozzo, che attraversa suolo e materiali non litoidi. In superficie è presente una piccola depressione allungata in direzione NW-SE. La cavità interna di S1 è caratterizzata da un condotto dal quale si dipartono due canali verticali attraverso una strozzatura. Quest'ultima viene periodicamente ostruita e disostruita da fenomeni di crollo e dilavamento. La struttura interna di S1 è quindi il risultato di un equilibrio tra erosione della sua parte superiore, ad opera degli agenti atmosferici, e dell'accumulo di suolo nella

parte inferiore favorito dalla circolazione delle acque piovane. In sezione la strozzatura risulta anch'essa allungata in direzione NW-SE.

Il secondo sprofondamento chiamato S2 (figg. 5, 7), posizionato a sud rispetto al primo, ha un diametro e profondità di circa un metro; a partire da febbraio 2014 si sono sviluppate intorno ad esso delle fratture anulari. Nel successivo periodo estivo (2014) la cavità si è approfondita ed ampliata evidenziando una parete subverticale in corrispondenza del suo margine orientale.

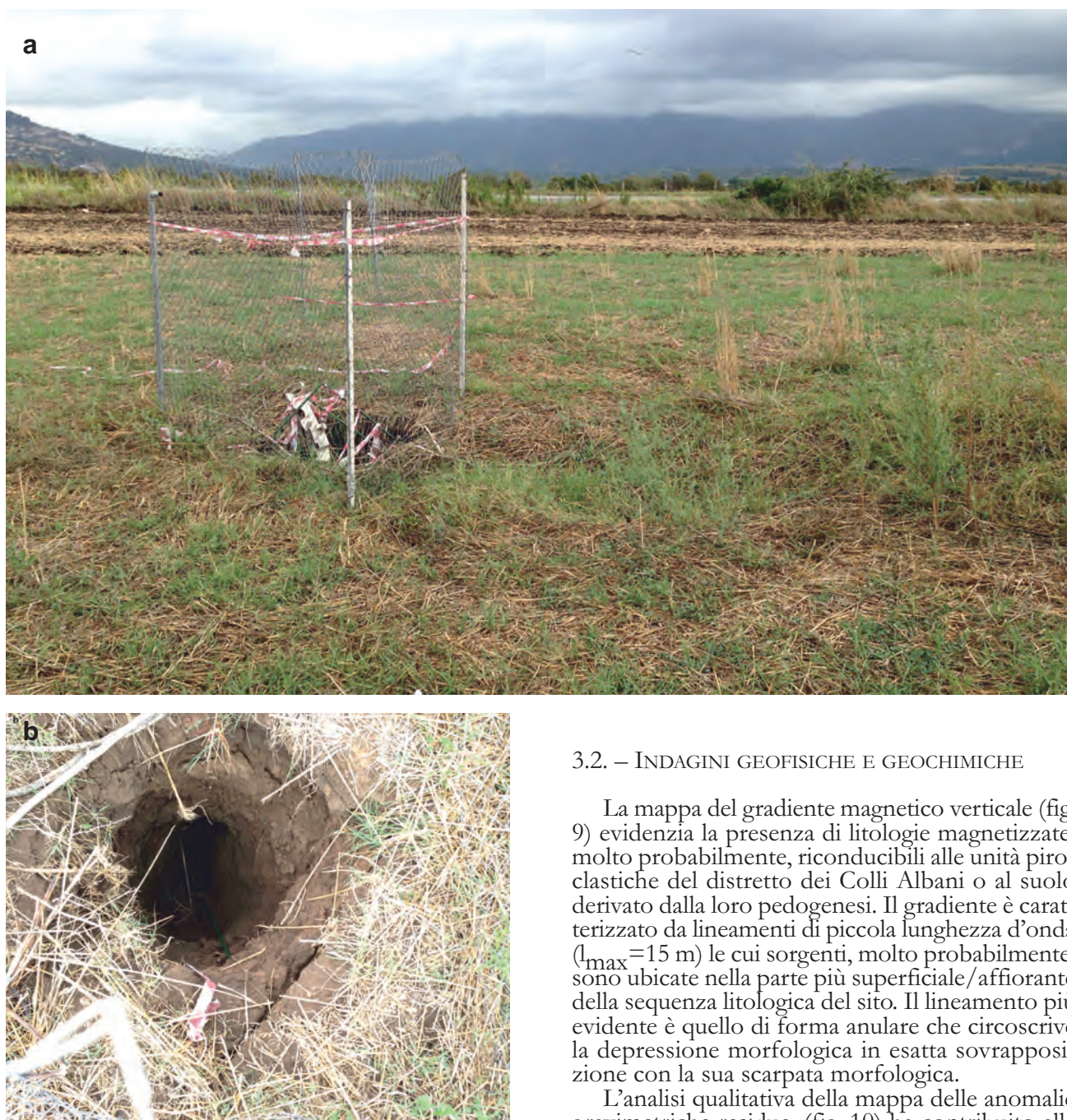


Fig. 8 – Fotografia a) sprofondamento S1. Fotografia b) dettaglio dello sprofondamento S1.

- Photograph a) S1 collapse. Photograph b) detail of the S1 collapse.

3.2. – INDAGINI GEOFISICHE E GEOCHIMICHE

La mappa del gradiente magnetico verticale (fig. 9) evidenzia la presenza di litologie magnetizzate, molto probabilmente, riconducibili alle unità piroclastiche del distretto dei Colli Albani o al suolo derivato dalla loro pedogenesi. Il gradiente è caratterizzato da lineamenti di piccola lunghezza d'onda ($l_{max}=15$ m) le cui sorgenti, molto probabilmente, sono ubicate nella parte più superficiale/affiorante della sequenza litologica del sito. Il lineamento più evidente è quello di forma anulare che circoscrive la depressione morfologica in esatta sovrapposizione con la sua scarpata morfologica.

L'analisi qualitativa della mappa delle anomalie gravimetriche residue, (fig. 10) ha contribuito alla definizione della geometria areale della depressione principale.

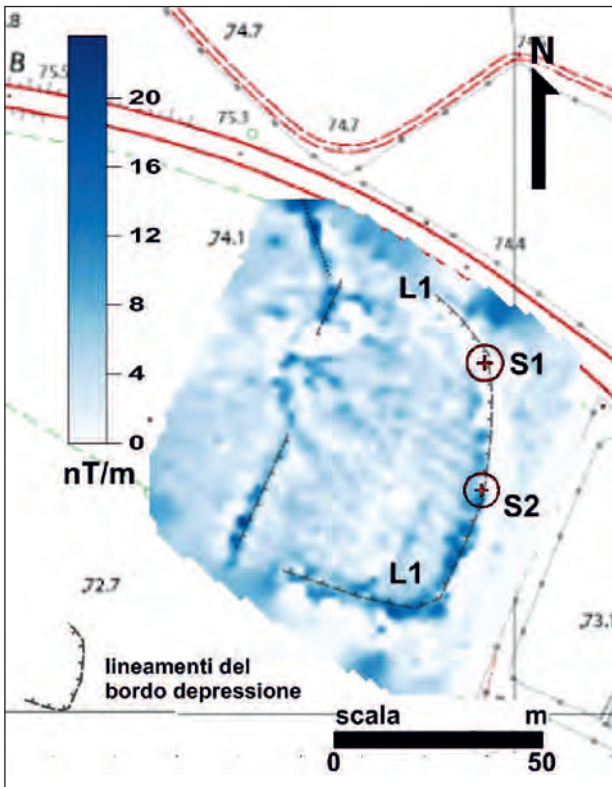


Fig. 9 - Mappa del gradiente magnetico verticale dell'area. Le linee tratteggiate (L1) evidenziano i lineamenti magnetici del bordo della depressione lungo cui sono avvenuti gli sprofondamenti S1 ed S2.
 - Vertical magnetic gradient map of the area. The dashed lines (L1) show the magnetic features of the depression rim along which the S1 and S2 collapses occurred.

L'interpretazione quantitativa delle anomalie gravimetriche è stata eseguita considerando il modello diretto (TALWANI *et alii*, 1959, 1961) di una sezione gravimetrica (figg. 7, 11) che ben evidenzia la geometria, la struttura e le diverse densità dei corpi geologici. Il calcolo è eseguito attribuendo diversi contrasti di densità ai poligoni rappresentativi delle unità litologiche presenti nel sito di studio.

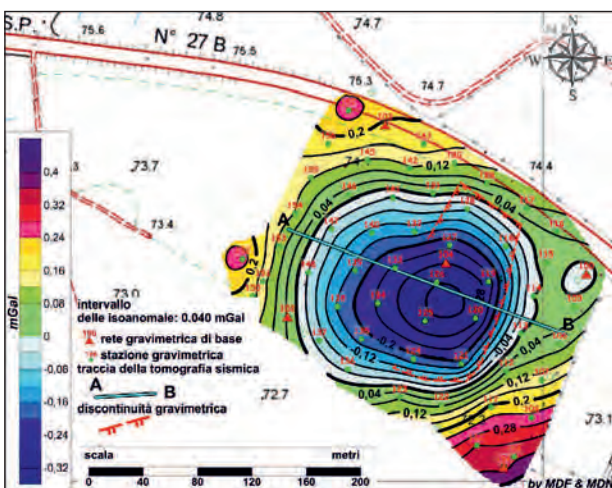


Fig. 10 - Carta delle Anomalie Residue e discontinuità gravimetrica.
 - Residual anomaly map and gravity discontinuity.

La carta delle anomalie Residue (figg. 7, 10) mostra una chiara anomalia negativa subcircolare, lievemente allungata in direzione E-W, che raggiunge i valori più bassi di $-350 \mu\text{Gal}$ non osservati in corrispondenza dei minimi valori altimetrici ai margini della depressione morfologica; i valori più alti ($+400 \mu\text{Gal}$) si osservano nel settore meridionale ed orientale.

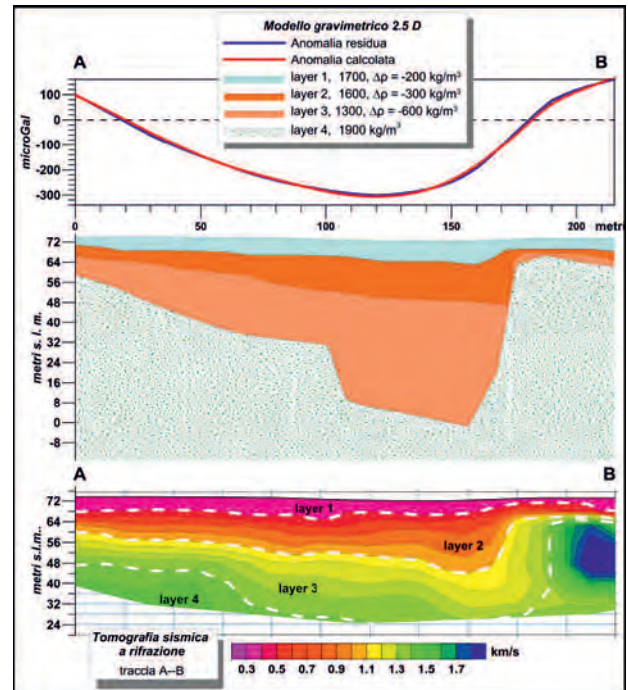


Fig. 11 - a) Modello gravimetrico e b) modello sismico lungo il profilo AB.
 - a) gravity model and b) seismic depth model along the AB profile.

Il gradiente orizzontale della gravità evidenzia una discontinuità gravimetria principale, ad andamento meridiano, nel settore orientale della depressione; altre due discontinuità di minore estensione spaziale risultano, rispettivamente, nel settore meridionale e in quello settentrionale della depressione entrambe ad andamento appenninico.

Il modello gravimetrico proposto (fig. 11) attraversa interamente il minimo gravimetrico e coincide con il profilo sismico, inoltre indaga profondità maggiori rispetto al profilo sismico e geoelettrico. Esiste un'ottima correlazione tra i bassi valori di densità ($\Delta\rho = -700 \div -500 \text{ Kg/m}^3$) e basse velocità ($v_p = 300 \text{ m/s} \div 500 \text{ m/s}$) dei sedimenti che riempiono la depressione. Dai valori dei parametri geofisici ottenuti, i depositi di riempimento non sono riconducibili a travertini litoidi. In entrambe le metodologie, si osserva una discontinuità sub-verticale corrispondente in superficie al versante orientale della depressione dove sono evidenti fratture e un netto ribassamento del suolo di qualche decina di centimetri (figg. 5, 7). I massimi valori di v_p (1800 m/s) riguardano il settore orientale e meridionale e indicano la presenza di

travertino litoide fino a 40 metri di profondità. Questo risultato è compatibile con gli spessori del travertino ottenuti da sondaggi geomeccanici in questo settore del Bacino delle Acque Albule (FACCENNA *et alii*, 1994; FACCENNA *et alii*, 2008).

Anche le indagini geoelettriche sono state eseguite prendendo in considerazione l'andamento delle anomalie gravimetriche. Il profilo P.1 (fig. 12) raggiunge una profondità di circa 50 m ed indica valori minimi della resistività ($r < 30 \text{ W m}$) del terreno in corrispondenza della parte centrale della depressione, di bassi valori di densità e v_p del terreno. A pochi metri dal piano campagna, il passaggio laterale con strati a maggiore resistività ($800 < r < 1000 \text{ W m}$) è caratterizzato da superfici irregolari di contrasto.

Le misure di CO_2 mostrano un valore medio pari 2,98 %, v/v e un valore minimo e massimo pari rispettivamente a 1,2 e 5,4 %, v/v. La distribuzione spaziale delle concentrazioni di CO_2 (fig. 13) mostra un andamento lineare dei valori più elevati ($>3,4 \text{ \%, v/v}$) orientato circa $\text{N}20^\circ\text{-}30^\circ$ nei settori orientale e centrale dell'area di studio in corrispondenza dell'area topograficamente più depressa (distribuzione anisotropa). Una tale distribuzione può essere legata alla migrazione del gas lungo zone fratturate sia a macro- e/o micro- scala (CIOTOLI *et alii*, 2007; ANNUNZIATELLIS *et alii*, 2008). Infatti, le concentrazioni di CO_2 più elevate, che interessano il settore orientale dell'area di studio e sono congruenti con la posizione dei due punti di collasso (S1 e S2), possono essere collegate a zone fratturate poco profonde, che circondano la depressione topografica ben evidenziata dalle misure GPS (v. fig. 5). Una buona relazione è evidente anche tra la distribuzione di CO_2 e i risultati della prospezione magnetica (v. fig. 6).

4. - CONCLUSIONI

Per la prima volta, nel Bacino delle Acque Albule, si osserva e viene monitorata l'evoluzione di un processo di subsidenza con contemporanea

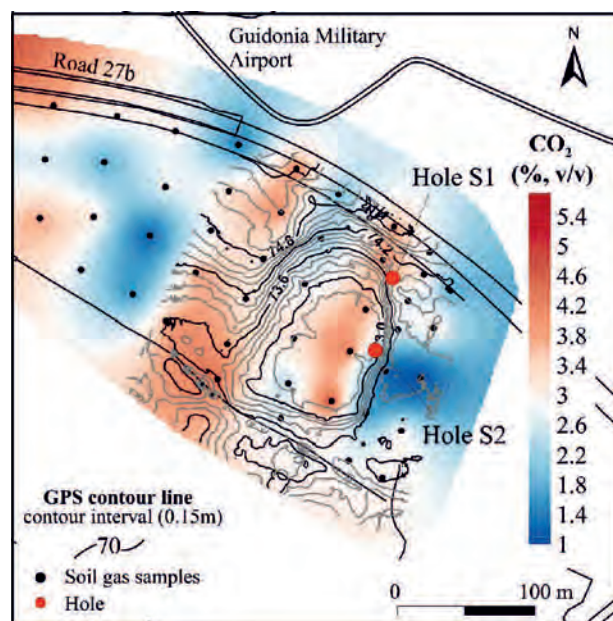


Fig. 13 - Mappa della distribuzione di gas CO_2 nel suolo.
- Map of the CO_2 distribution in soil gas.

formazione di un *sinkhole*. Questo, iniziato nell'anno 2000, ha avuto una lenta evoluzione nel tempo, accelerando nel 2013 con la formazione di due sprofondamenti, ampliatisi considerevolmente nel 2014. L'utilizzazione di diverse metodologie geofisiche, associate a quella geochemica, ha permesso di definire in dettaglio la geometria superficiale e sepolta della depressione e gli associati elementi strutturali, che sembrano condizionare fortemente l'evoluzione del fenomeno. All'interno della depressione morfologica si osserva la mancanza di strati riconducibili a travertino litoide invece evidente lungo i margini. Il monitoraggio del sito sta fornendo elementi utili per poter comprendere la genesi di questa tipologia di *sinkhole* ed eventualmente prevederne le fasi evolutive e ricostruire eventuali scenari di rischio in questa area altamente antropizzata.

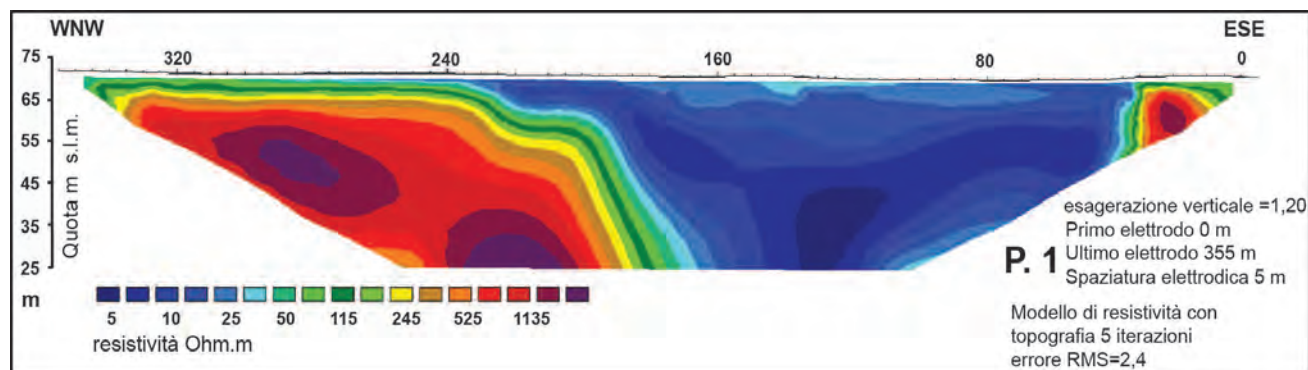


Fig. 12 - Tomografia di resistività elettrica, profilo P.1.
- Electrical resistivity tomography, profile P.1.

Ringraziamenti

Si ringrazia la famiglia Pompili, proprietaria del terreno, per la disponibilità e collaborazione fornita durante lo svolgimento delle indagini.

BIBLIOGRAFIA

- AA.VV. (sec. XVI-XIX) - *Cartografie storiche*. Biblioteca Nazionale Marciana, Venezia, e Biblioteca Soc. Geogr. It., Roma.
- AA.VV. (1655-1667) - *Catasto Alessandrino*. Mappe Acquerellate. Archivio di Stato di Roma.
- AA.VV. (1816-1859) - *Catasto Gregoriano Comarca e Agro*. Archivio di Stato di Roma.
- AMETI G.F. (1693) - *Il Lazio con le sue più cospicue strade antiche e moderne e principali casali e tenute di esso*. Parte I e II, terrestre; Parte I e II, marittima. D. De Rossi (Ed.). Bibl. Soc. Geogr. It., Roma.
- ANNUNZIATELLIS A., BEAUBIEN S.E., BIGI S., CIOTOLI G., COLTELLA M. & LOMBARDI S. (2008) - *Gas migration along fault systems and through the vadose zone in the Latera caldera (central Italy): Implications for CO₂ geological storage*. Int. J. Greenh. Gas Control, **2/3**: 353-372.
- ANNUNZIATELLIS A., CIOTOLI G., GUARINO P.M. & NISIO S. (2010) - *Nuovi dati sui sinkholes del bacino delle Acque Albule (Tivoli, Roma)*. In: Atti del 2° Workshop Internazionale "I sinkholes. Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropizzato", ISPRA, Roma 3-4 Dicembre 2009: 395-412.
- BEAUBIEN S.E., CIOTOLI G., LOMBARDI S., NISIO S. & NOLASCO F. (2003) - *Indagini Geologiche e Geochimiche per lo Studio del Rischio Sinkholes nella Piana di S. Vittorino*. In: Atti Conv. 4° Forum FIST, Bellaria (Rimini), 16-18 Settembre 2003: 357-359.
- BISHOP I., STYLES P., EMSLEY S. J. & FERGUSON N. S. (1997) - *The detection of cavities using the microgravity technique: case histories from mining and karstic environments*. In: MCCANN, FENNING & REEVES (Eds.): "In modern Geophysics in Engineering Geology". Geol. Soc. of London, Spec. Publ. n° **12**: 155-168.
- CAPELLI G. & SALVATI R. (2002) - *Il Progetto Sinkhole del Lazio*. Dip. Sc. Geologiche Univ. Roma TRE & Regione Lazio, Ass.to U.T.V.R.A., Roma.
- CARAMANNA G. (2002) - *I laghetti sorgivi delle Acque Albule*. In: M. GIARDINI (a cura di) Atti: "Il Travertino. Aspetti naturalistici e sfruttamento industriale all'inizio del terzo millennio". Prov. di Roma: 33-43, Tivoli.
- CARAMANNA G., CIOTOLI G. & NISIO S. (2008) - *A review of natural sinkhole phenomena in Italian plain areas*. Nat. Hazards, **45** (2): 145-172.
- CERMELLI P. M. (1782) - *Carte corografiche e memorie riguardanti le pietre, le miniere ed i fossili, per servire alla storia naturale delle Province del Patrimonio, Sabina, Lazio, Marittima, Campagna e dell'Agro Romano*. Napoli.
- CIOTOLI G., LOMBARDI S. & ANNUNZIATELLIS A. (2007) - *Geostatistical analysis of soil gas data in a high seismic intermontane basin: Fucino Plain, central Italy*. J. Geophys. Res - Solid Earth, **112** (B5), B05407.
- CIOTOLI G., ETIOPE G., FLORINDO F., MARRA F., RUGGIERO L. & SAUER P.E. (2013a) - *Sudden deep gas eruption nearby the Rome's airport of Fiumicino*. Geophys. Res. Lett., **40**: 1-5; DOI:10.1002/2013GL058132.
- CIOTOLI G., BIGI S., TARTARELLO C., SACCO P., ASCIONE A., LOMBARDI S. & MAZZOLI S. (2013b) - *Soil gas distribution in the main coseismic surface rupture zone of the 1980, Ms=6.9, Irpinia earthquake (southern Italy)*. J. Geophys. Res., DOI: 10.1002/2013JB010508.
- D'AGOSTINO G., DESOGUS S., GERMAK A., ORIGLIA C., QUAGLIOTTI D., BERRINO G., CORRADO G., D'ERRICO V. & RICCIARDI G. (2008) - *The new IMG-C-02 transportable absolute gravimeter: measurement apparatus and applications in geophysics and volcanology*. Ann. Geophys., **51** (1): 39-49.
- DI FILIPPO M. & TORO B. (1980) - *Analisi gravimetrica delle strutture del Lazio meridionale*. Geol. Rom., **19**: 285-294.
- DI FILIPPO M. & TORO B. (1995) - *Gravity features*. In: R. TRIGILA (Ed.): "The Volcano of the Alban Hills". Tipografia Sgs, Spec. Vol.: 213-219, Roma.
- DI NEZZA M. (2007) - *Struttura e dinamica del distretto vulcanico dei Colli Albani da misure gravimetriche: implicazioni geodinamiche e vulcanologiche*. Tesi di Dottorato. Università "Sapienza" di Roma.
- DI NEZZA M., CECCHINI F., MARGOTTINI S. & DI FILIPPO M. (2012) - *La Struttura dei Monti Cornicolani: un piccolo elemento di una grande struttura nascosta*, In: M. GIARDINI (a cura di) Atti: "Il Travertino. Aspetti naturalistici e sfruttamento industriale all'inizio del terzo millennio". Prov. Di Roma: 80-90, Tivoli.
- FACCENNA C. (1994) - *Structural and hydrogeological features of Pleistocene shear zones in the area of Rome (Central Italy)*. Ann. Geof., **37** (1): 121-133.
- FACCENNA C., FUNICIELLO R., MONTONE P., PAROTTO M. & VOLTAGGIO M. (1994) - *Late Pleistocene strike-slip tectonics in the Acque Albule Basin (Tivoli, Latium)*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., **49**: 37-50.
- FACCENNA C., SOLIGO M., BILLI A., DE FILIPPIS L. & FUNICIELLO R. (2008) - *Late Pleistocene depositional cycles of the Lapis Tiburtinus travertine (Tivoli, Central Italy): possible influence of climate and fault activity*. Glob. Planet. Change, **63**: 299-308.
- GASPARINI C., DI MARO R., PAGLIUCA M.N., PIRRO M. & MARCHETTI A. (2002) - *Recent seismismy of the 'Acque Albule' travertine basin*. Ann. Geophys., **45**: 537-550.
- GIUSTINI F., BRILLI M., CIOTOLI G., LOMBARDI S. & NISIO S. (2010) - *Metodologie geologiche e geochimiche applicate allo studio dei sinkholes della Piana del Fucino (Italia Centrale)*. In: Atti del 2° Workshop Internazionale: "I sinkholes. Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropizzato", ISPRA, Roma 3-4 Dicembre 2009: 525-539.
- HINKLE M.E. (1994) - *Environmental conditions affecting concentrations of He, CO₂, O₂ and N₂ in soil gases*. Appl. Geochem., **9**: 53-63.
- I.G.M. (1904) - *Carta dell'Agro Romano, nel rapporto di 1:8.000, per la zona soggetta al bonificamento agrario*. Fogli 1-77, Firenze.
- MAINO A., MOTTA A. & SEGRE A.G. (1969) - *Considerazioni sui rapporti tra gravimetria e geomorfologia per il F° 150 Roma (Vulcano Laziale) della carta d'Italia al 100.000 dell'I.G.M.*, Boll. Geod. Sc.Aff., **28** (2): 173-188.
- MAXIA C. (1954) - *La geologia dei Monti Cornicolani (Lazio)*. Pubbl. Ist. Geol. e Paleont. Univ. Studi Roma, **11**: 1-98.
- MCDONALD R. & DAVIES R. (2003) - *Integrated geophysical surveys applied to karstic studies*, First Break, **21**: 32-35.
- MELONI F., NISIO S., CIOTOLI G., LIPERI L., TONELLI V. & ZIZZARI P. (2012) - *I Sinkhole nella Regione Lazio alla Scala 1:250.000 Catalogo 2011*. Su carta geologica informatizzata della Regione Lazio (2012).
- NISIO S. (2003) - *I fenomeni di sprofondamento: stato delle conoscenze ed alcuni esempi in Italia Centrale*. Il Quaternario, **16** (1): 121-132.
- NISIO S. (2008) - *I sinkholes nel Lazio*. In: "I fenomeni naturali di sinkhole delle aree di pianura italiane". Mem. Descr. Carta Geol. d'It., **85**: 33-148.
- NISIO S. & SALVATI R. (2004) - *Fenomeni di sprofondamento catastrofico, Proposta di classificazione applicata alla casistica italiana*. APAT, Roma.
- NISIO S., CARAMANNA G. & CIOTOLI G. (2007) - *Sinkholes in*

- Italy: first results on the inventory and analysis.* In: M. PARISE & J. GUNN (Eds.), “*Natural and Anthropogenic Hazards in Karst Areas: Recognition, Analysis and Mitigation*”. Geol. Soc. of London, Spec. Publ. n° 279: 23–45.
- OTHMAN A. (2005) - *Construed geotechnical characteristics of foundation beds by seismic measurements.* J. Geophys. Eng. **2**: 126–138.
- PENTECOST A. & TORTORA P. (1989) - *Bagni di Tivoli (Lazio): a modern travertine depositing site and its associated microorganism.* Boll. Soc. Geol., **108**: 315–324.
- REGIONE LAZIO (1999-2000) - *Foto aeree a colori della Regione Lazio.* Roma.
- REGIONE LAZIO (2002-2003) - *Foto aeree a colori della Regione Lazio.* Roma.
- REGIONE LAZIO (2002) - *Delibera di Giunta Regionale 1159 del 2 agosto 2002 “Integrazione alla Deliberazione 2649/99 Linee guida e documentazione per l’indagine geologica e vegetazionale. Normativa tecnica per le indagini da effettuare nelle zone indiziate di rischio sinkhole”*, BUR Lazio n. 30 del 30/10/2002 18–25.
- SAGNOTTI L., FACCENNA C., FUNICIELLO R. & MATTEI M. (1994) - *Magnetic fabrics and structural setting of Plio-Pleistocene clayey units in an extensional regime: the Tyrrhenian margin of Central Italy.* J. Struct. Geol., **16**: 1243–1257.
- SCHUSTER G. & QUINTUS-BOSZ A. (1993) - *Wavepath eikonal travelttime inversion: Theory.* Geophysics, **58** (9): 1314–1323.
- SERVIZIO GEOLOGICO D’ITALIA - *Carta Geologica d’Italia in scala 1:100.000 - Foglio n. 150 Roma, (1967), Roma.*
- TALWANI M., WORZEL J.L. & LANDISMAN M. (1959) - *Rapid gravity computations for two-dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone.* J. Geophys. Res. **64**: 49–59.
- TALWANI M., WORZEL J.L. & EWING M. (1961) - *Gravity anomalies and crustal section across the Tonga trench.* J. Geophys. Res. **66**: 1265–1278.
- TEZCAN S.S., KECELI A. & OZDEMIR Z. (2006) - *Allowable Bearing Capacity of Shallow Foundations Based on Shear Wave Velocity.* J. Geotech. Geol. Eng. **24**: 203–218.
- TORO B. (1976) - *Gravimetry and deep structure of the Sabatinian and Alban Volcanic Areas (Latium).* Geol. Rom. (Roma), **15**: 301–310.
- TURKER E. (2004) - *Computation of ground bearing capacity from shear wave velocity.* In: D. BERGMAN & E. INAN (Eds.), *Proceedings, 10th International Symposium on Continuous Models and Discrete Systems* 10: 173–180, Kluwer.