

## TOMOGRAFIE DI RESISTIVITA' PER LA DEFINIZIONE DELLO SPESSORE E DEL CONTENUTO D'ACQUA DELLE COPERTURE PIROCLASTICHE A MT. DI VEZZI (ISOLA D'ISCHIA)

### RESISTIVITY TOMOGRAPHIES TO DEFINE THICKNESS AND WATER CONTENT OF PYROCLASTIC COVERS AT MT. DI VEZZI (ISCHIA ISLAND, ITALY)

ROSA DI MAIO(\*), ESTER PIEGARI(\*\*), CINZIA SCOTELLARO(\*) & MARIA GRAZIA SOLDOVIERI(\*)

(\*) Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Napoli "Federico II". Largo San Marcellino 10, 80138 Napoli, Italy. Email: dimaio@na.infn.it

(\*\*) Dipartimento di Scienze Fisiche, Università degli Studi di Napoli "Federico II". Via Cintia, 80126 Napoli, Italy

#### RIASSUNTO

Le colate rapide sono movimenti franosi generalmente indotti da eventi meteorici. Questi fenomeni si verificano di frequente nella Regione Campania, i cui rilievi montuosi sono quasi uniformemente ricoperti dai depositi piroclastici derivanti dalla passata attività vulcanica. I metodi di indagine geofisica possono avere un importante ruolo nell'analisi di versanti potenzialmente instabili, poiché sono in grado di fornire un'immagine di estremo dettaglio della distribuzione in profondità di queste strutture. In questo lavoro sono presentati e discussi i risultati di tomografie di resistività elettrica applicate allo studio di un'area a rischio frana dell'isola di Ischia. L'attività di ricerca è stata sviluppata nell'ambito di un progetto multidisciplinare proposto dal Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Napoli "Federico II", in seguito al recente evento calamitoso dell'Aprile 2006, ed è volto essenzialmente a definire *i*) le condizioni fisiche e geostrutturali dell'area interessata dalla frana, *ii*) suggerimenti per la stesura di linee guida per il monitoraggio di aree a potenziale rischio idrogeologico. Le tomografie sono state eseguite lungo due profili mutuamente perpendicolari situati nella parte sommitale del Monte di Vezzi, dove si è verificato il citato evento. Al fine di caratterizzare le strutture superficiali dell'area investigata, è stata raggiunta una profondità di esplorazione di circa 20 metri dal piano campagna. In particolare, l'elevata risoluzione delle sezioni di resistività elettrica ha consentito di descrivere in dettaglio la geometria dei depositi piroclastici che ricoprono il basamento lavico. L'interpretazione congiunta dei dati geofisici e geologici ha permesso la stima degli spessori della copertura piroclastica e, conseguentemente, dei volumi di materiale che potrebbero eventualmente essere coinvolti in futuri eventi franosi. Inoltre, l'integrazione ed il confronto dei risultati presentati con quelli ottenuti da analisi di laboratorio eseguite su materiali piroclastici analoghi, ha permesso di fornire una stima indiretta del contenuto d'acqua che, se messa in relazione con le pendenze locali, può fornire utili indicazioni sulle condizioni di stabilità dell'area.

**PAROLE CHIAVE:** Tomografie di resistività, Terreni piroclastici, Colate rapide, Contenuto d'acqua, Fattore di Sicurezza

#### ABSTRACT

Flowslides are mass movements generally rainfall-induced. These phenomena are very frequent in the Campania Region, whose mountains are diffusively covered with pyroclastic deposits derived from the past volcanic activity. Geophysical techniques may play an important role in investigations of potentially unstable slopes since they provide an accurate knowledge on the in depth distribution of these structures. In this paper, we present and discuss the electrical resistivity tomographies obtained from measurements performed in a landslide area of the Ischia island. This research activity is developed in the frame of a multidisciplinary project by the Earth Science Department of the University of Naples "Federico II" and is motivated by the recent calamitous event of April 2006. It is mainly aimed to define *i*) the geostructural and physical conditions of the landslide involved area, *ii*) the guidelines for the monitoring of potential risk areas. The tomographies were performed along two profiles perpendicular each to other and located on the summit portion of Mt. di Vezzi, where the dangerous event of April happened. In order to characterize the shallow structures of the investigated areas, we reached an exploration depth of about 20 m below the ground level. In particular, the high resolution of the electrical tomographic images let us to accurately describe the geometry of pyroclastic deposits overlapping the lava basement. A joint interpretation of geophysical and geological data allowed estimation of the thickness of the pyroclastic covers, and, consequently, the material volumes that could be eventually involved in future flowslide events. Moreover, integration and comparison of our results with other geophysical data coming from laboratory analyses on similar pyroclastic soils allowed an indirect estimation of the water content that, if it is connected to the local slopes, may supply an indication of the stability of the area.

**KEY WORDS:** Resistivity Tomography, Pyroclastic Soils, Flowslides, Water Content, Safety Factor

## INTRODUZIONE

Le colate che coinvolgono i terreni piroclastici spesso risultano particolarmente pericolose perché in grado di causare perdita di vite umane ed ingenti danni economici, in virtù delle grandi distanze percorse e delle alte velocità che possono raggiungere. Negli ultimi secoli, questi fenomeni, che spesso si verificano in seguito ad eventi meteorici critici, hanno periodicamente interessato diverse aree della Regione Campania. Come indicato dai risultati di una ricerca storica sugli eventi a partire dal XVI secolo (O.U. 2.38b, 1998) sino ad oggi, sono più di 200 le località Campane danneggiate da colate rapide. Ad ogni modo, solo dopo gli eventi calamitosi verificatisi negli ultimi anni, tali fenomeni hanno ricevuto una più adeguata attenzione da parte della comunità scientifica, con particolare riguardo ai fattori geologici e di innesco dell'evento. In particolare, in relazione alla storia geologica dell'area campana, sono state individuate due principali tipologie di assetto geologico-strutturale suscettibili di instabilità (Calcaterra *et alii*, 2003): la penisola Sorrentina e le zone interne dell'Appennino campano, dove le coperture piroclastiche ricoprono complessi carbonatici fortemente fratturati e carsificati, e l'area flegreo- napoletana e l'isola di Ischia, dove depositi piroclastici ricoprono un substrato costituito da tufi vulcanici e lave. In quest'ultimo caso, le condizioni di stabilità sono particolarmente sensibili al grado di saturazione degli strati piroclastici più superficiali, che sono maggiormente esposti al cambiamento delle condizioni climatiche. Pertanto, misure di resistività elettrica dei terreni in gioco possono risultare di enorme importanza per il monitoraggio di aree a rischio frana, essendo la resistività elettrica una grandezza fisica strettamente legata al contenuto d'acqua.

Al fine di caratterizzare l'area oggetto del disastroso evento frano avvenuto ad Ischia lo scorso Aprile 2006 sul Mt. di Vezzi, in questo lavoro presentiamo i risultati delle tomografie di resistività elettrica eseguite lungo due profili posizionati perpendicolarmente e parallelamente all'asse della frana. L'indagine geofisica eseguita ha consentito di stimare lo spessore delle coltri piroclastiche e di individuare la discontinuità tra il materiale suscettibile a franare e il substrato, permettendo, così, una valutazione degli eventuali volumi di innesco. Inoltre, utilizzando un'espressione fenomenologica, recentemente proposta dagli autori (PIEGARI *et alii*, 2007), del Fattore di Sicurezza (*FS*) in funzione della resistività elettrica e degli angoli di pendenza in gioco, si fornisce una stima delle condizioni di instabilità dell'area investigata in termini di contenuto d'acqua. La buona correlazione dei risultati ottenuti con i dati relativi alle indagini geologiche e idrogeologiche eseguite in sito, conferma il metodo geoelettrico usato come valido strumento di indagine per la caratterizzazione di aree a rischio di frana.

## INQUADRAMENTO GEOLOGICO E VULCANOLOGICO

L'Isola di Ischia è ubicata al bordo nord-occidentale del Golfo di Napoli e rappresenta un *horst* vulcano-tettonico, il cui assetto geologico è stato fortemente condizionato dall'intensa attività vulcanica verificatasi nell'area, iniziata oltre 150.000 anni fa e terminata nel

## INTRODUCTION

Flowslides involving pyroclastic soils frequently entail casualties and damage because of the long travel distance and the high velocities reached. These phenomena, often triggered by critical rainfall events, periodically occurred in various areas of the Campania region over the last few centuries. As demonstrated by historical data recorded over the period from the 16<sup>th</sup> century up to the present (O.U. 2.38b, 1998), more than 200 towns in Campania were afflicted by flowslides. However, only after the most calamitous events occurred in recent years such dangerous slope movements have received renewed attention from the scientific community, especially with regard to geological and triggering factors. In particular, owing the different geological histories, it has been possible to individuate two main settings in Campania which are susceptible to instabilities involving pyroclastic deposits (Calcaterra *et alii*, 2003). One setting includes the Sorrento Peninsula and the inner Campania Apennine, where pyroclastic covers overlay highly fissured carbonate bedrock, another setting includes Naples, the Phlegrean district and the Ischia island, where pyroclastic deposits mantle a bedrock made up of volcanic tuffs and lavas. In particular, in the latter setting the hydrological conditions crucially depend on the saturation degree of the upper weathered ashy layers. Thus, electrical resistivity measurements may result crucial for monitoring of landslide hazard as such a physical quantity is strictly related to the water content.

In order to characterise the area in the Ischia island where a calamitous landslide event occurred in April 2006, in this paper we present the results of electrical resistivity tomographies carried out along two profiles positioned in perpendicular and parallel direction to the landslide bodies. The geophysical results provide estimation of the thickness of pyroclastic covers and of the discontinuity between landslide materials and bedrock, allowing an evaluation of potentially mobilising volumes and their water content. By using a recently proposed phenomenological expression of the Factor of Safety (*FS*) of a slope in terms of the electrical resistivity and the slope angle (PIEGARI *et alii*, 2007), the distance of the selected area from the instability condition in terms of water content is estimated. The good correlation of our results with the data coming from geological and hydrogeological surveys confirms the used geoelectrical method as a powerful tool for the investigation of landslide hazard areas.

## GEOLOGICAL AND VOLCANOLOGICAL BACKGROUND

The Ischia island is located in the north-western edge of the Gulf of Naples. It represents a volcano-tectonic horst whose geologic settlement has been strongly conditioned by the intense volcanic activity which took place beyond 150.000 years ago and finished in 1302

1302 d.c. con l'eruzione del Monte Arso. In particolare, sono state distinte cinque fasi di attività vulcanica, che possono essere raggruppate in due cicli temporali: il primo compreso tra 150.000 e 74.000 anni fa e il secondo che va da 55.000 anni fa ad oggi (CHIESA *et alii*, 1987; VEZZOLI, 1988). I due cicli sono separati dalla messa in posto della Formazione del Tufo Verde di Monte Epomeo, risalente a circa 55.000 anni fa (VEZZOLI, 1988). Durante l'evoluzione vulcanica dell'isola, i centri eruttivi hanno subito una migrazione verso il settore orientale, dove si concentrano le morfologie vulcaniche più recenti (<10.000 anni fa). I prodotti lavici del primo ciclo, infatti, affiorano prevalentemente nel settore occidentale dell'isola (Monte Vico, S. Angelo, Capo Negro, Punta Imperatore), mentre i prodotti più recenti, ciclo post-Tufo Verde, sono più diffusi nel settore nord-est dell'isola (CHIESA *et alii*, 1987; VEZZOLI, 1988; MELE & DEL PRETE, 1998). Oltre ai terreni di origine vulcanica, depositi detritici da *debris flow* affiorano prevalentemente nei settori settentrionale ed occidentale dell'isola (GUADAGNO & MELE, 1995; MELE & DEL PRETE, 1998), e hanno mobilizzato le coperture lungo i versanti dei principali rilievi (Monte Epomeo, Monte di Vezzi).

I recenti fenomeni franosi hanno interessato il versante settentrionale del Monte di Vezzi, ubicato nel settore sud-est dell'isola. Questo rilievo appartiene ad una dorsale allungata in direzione antiappenninica, bordata a sud-est da una faglia regionale che individua il Graben di Ischia. La successione degli eventi vulcanici che costituiscono il rilievo (VEZZOLI, 1988), è ben rappresentata da una sezione naturale osservabile in corrispondenza della falesia in località Scarrupata di Barano (Fig. 1). Alla base affiorano duomi e colate laviche risalenti all'attività pre-Tufo Verde (lave de La Guardiola, Formazione di Scarrupata di Barano inferiore e superiore, duomi e colate laviche di Monte di Vezzi). Durante le fasi del ciclo post-Tufo Verde, queste lave sono state ricoperte dai prodotti derivanti da varie eruzioni piroclastiche di altri centri eruttivi (RITTMANN & GOTTINI, 1980). Tali eruzioni hanno causato, nell'area di Monte di Vezzi, la

d.c. with the eruption of the Mt. Arso. In particular, five distinctive phases can be identified in the volcanic history of the island, and can be grouped in two temporal cycles: the first one between 150.000 and 74.000 years ago and the second one from 55.000 years ago up today (CHIESA *et alii*, 1987; VEZZOLI, 1988), separated by the deposition of the Green Tuff Formation of Monte Epomeo, going back to approximately 55.000 years ago (VEZZOLI, 1988). During the volcanic evolution of the island, the eruptive centers have migrated towards the eastern sector, where the more recent volcanic morphologies concentrate (<10.000 years ago): the lava products of the first cycle, in fact, emerge mostly in the western part of the island (Monte Vico, S. Angelo, Capo Negro, Punta Imperatore), while the more recent products, cycle post Green Tuff, are more diffuse in the north-eastern sector of the island (CHIESA *et alii*, 1987; VEZZOLI, 1988; MELE & DEL PRETE, 1998). Beyond to materials of volcanic origin, detrital deposits like *debris flow* crop out mainly in the northern and western sectors of the island (GUADAGNO & MELE, 1995; MELE & DEL PRETE, 1998); they have mobilized the covers along the slides of the main relieves (Monte Epomeo, Monte di Vezzi).

The recent flowslide events have occurred on the northern slope of Mt. di Vezzi, located in the south-eastern part of the island. This relief belongs to a dorsal stretching in anti-Appennine direction that is bordered, to south-east, by a regional fault delineating the Ischia Graben. The succession of the volcanic events that constitute the relief (VEZZOLI, 1988), is well represented by a natural section observable along the Scarrupata di Barano marine cliff (Fig. 1). On the bottom, domes and lava flows of the pre-Green Tuff activity emerge (La Guardiola lavas, upper and lower Scarrupata di Barano Formation, domes and lava flows of Monte di Vezzi). During the phases of the post-Green Tuff cycle, these lavas have been covered by the products deriving from several pyroclastic eruptions of other eruptive centers (RITTMANN & GOTTINI, 1980). These eruptions caused, in the Mt. di Vezzi area, the deposition of: the no-welded

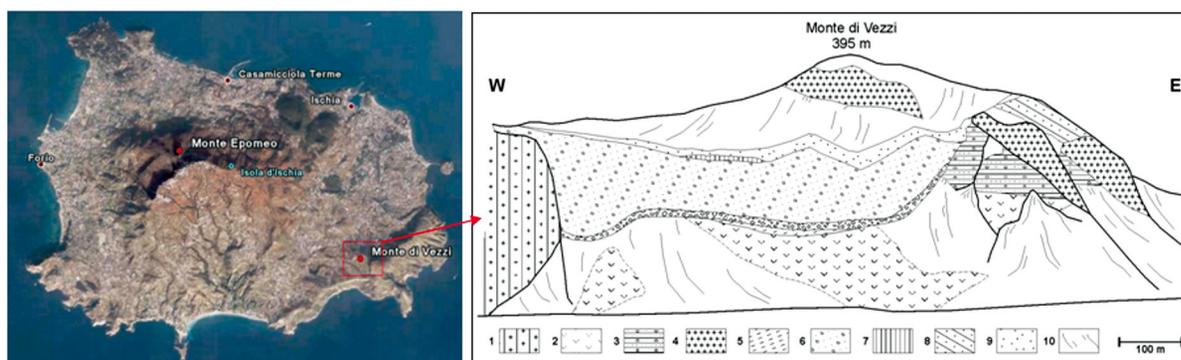


Fig.1 – Rappresentazione della Scarrupata di Barano. LEGENDA: 1) Lave de La Guardiola; 2) Tufo e tufo-breccie della Formazione Scarrupata di Barano inferiore; 3) Tufo e tufo-breccie della Formazione Scarrupata di Barano superiore; 4) Duomi e colate laviche di Monte di Vezzi; 5) Depositi alluvionali; 6) Tufo Verde del Monte Epomeo; 7) Formazione di C.S. Costanzo; 8) Formazione di Monte di Vezzi; 9) Cineriti e pomici da caduta della Formazione di Piano Liguori; 10) Coperto (da VEZZOLI, 1988)  
 - Sketch of Scarrupata di Barano marine cliff. LEGEND: 1) La Guardiola lavas; 2) Tufts and tuff-breccias of the lower Scarrupata di Barano Formation; 3) Tufts and tuff-breccias of the upper Scarrupata di Barano Formation; 4) Monte di Vezzi lava dome and lava flows; 5) Alluvial deposits; 6) Monte Epomeo Green Tuff; 7) C.S. Costanzo Formation; 8) Monte di Vezzi Formation; 9) Fall fine-ash and pumices of the Piano Liguori Formation; 10) Covered (after VEZZOLI, 1988)

deposizione: delle facies pomicee non saldate del Tufo Verde del Monte Epomeo; della Formazione di C.S. Costanzo, costituita da tufi biancastri ben stratificati con intervalli di pomici; della Formazione di Monte di Vezzi, costituita da strati di scorie brunastre e intervalli mal stratificati di pomici; della Formazione di Piano Liguori, costituita da alternanze di ceneri biancastre e livelli di pomici.

### ESPLORAZIONE GEOELETRICA

L'area oggetto dell'indagine geoelettrica è stata scelta con l'obiettivo principale di delineare l'unità geologica di Piano Liguori, ovvero ricostruire l'andamento morfologico del piano che si sovrappone al basamento lavico, e di valutare i volumi di materiale che potrebbero essere eventualmente coinvolti in futuri eventi franosi. In secondo luogo, l'intento era anche quello di ottenere, sulla base dei valori di resistività elettrica osservati, una stima indiretta del contenuto d'acqua della copertura piroclastica.

L'indagine geoelettrica è consistita nell'esecuzione di due tomografie di resistività 2D (GRIFFITH *et alii*, 1990; BARKER, 1992; GRIFFITH & BARKER, 1993) lungo i profili *AA'* e *BB'* indicati in figura 2 con linee nere. Come mostrato in figura, i due profili sono perpendicolari tra loro e posizionati nella parte sommitale del Monte di Vezzi, a monte delle aree in frana inaccessibili (linee viola). È stata scelta la tecnica tomografica in quanto consente di ottenere ricostruzioni di estremo dettaglio del modello strutturale del sottosuolo sulla base dei forti contrasti di resistività tra suoli piroclastici (massimo  $10^2 \Omega\text{m}$ , in condizioni umide) e duomi e/o flussi di lava (i cui valori di resistività variano generalmente nell'intervallo  $10^2$ – $10^4 \Omega\text{m}$ ). Le misure sono state eseguite utilizzando il georesistivimetro IRIS-SYSCAL PRO, con un cavo multielettrodo a 24 canali distanziati con un passo di 5 m. Di conseguenza, la lunghezza di ciascun profilo è risultata di 115 m. L'estensione dei profili ha permesso di raggiungere, in base alla configurazione elettrodica scelta, una profondità di indagine di circa 20 m sotto il piano campagna. I dati sono stati invertiti utilizzando l'algoritmo di inversione RES2DINV (LOKE & BARKER, 1996; LOKE & DAHLIN, 2002), tenendo conto degli effetti topografici che caratterizzano l'area indagata.

### ANALISI DELLE TOMOGRAFIE DI RESISTIVITÀ

Le figure 3 e 4 mostrano le sezioni di resistività ottenute dall'inversione dei dati osservati lungo i profili, rispettivamente, *AA'* e *BB'* (Fig. 2). In particolare, il modello relativo al profilo *AA'* (Fig. 3) mostra uno strato relativamente conduttivo (valori di resistività compresi nell'intervallo  $30$ – $100 \Omega\text{m}$ ) lungo quasi tutta la sezione, con uno spessore variabile da 5 a 8 metri. Questo strato (unità *1a* in Fig. 3), si sovrappone ad una struttura molto più resistiva (unità *2* in Fig. 3) caratterizzata da valori di circa  $800 \Omega\text{m}$ . In accordo con i risultati degli studi geologici condotti nell'area da DI NOCERA *et alii* (questo volume), lo strato conduttivo potrebbe essere attribuito alla Formazione cineritica di Piano Liguori, mentre il corpo resistivo sottostante potrebbe essere associato sia alla parte superiore del duomo lavico (unità *3*

pumice-flow facies of the Monte Epomeo Green tuff; the C.S. Costanzo Formation, made up of well stratified, whitish tuff with pumice lapilli set; the Monte di Vezzi Formation, constituted of crudely bedded pumice fall breccias and brown scoriae layers; the Piano Liguori Formation, constituted by interbedded white ash and pumice layers.

### GEOELECTRICAL ESPLOATION

The geoelectrical survey area has been chosen with the main aim to delineate the Piano Liguori geological unit, i.e. to reconstruct the morphological pattern of the plan overlapping the lava basement, and to evaluate the volumes that could be eventually involved in future flowslide events. Secondly, our intend was also to provide, on the basis of the observed resistivity values, an indirect estimation of the water content of the pyroclastic cover of the investigated area.

The electrical prospecting (ERT) has consisted in 2D resistivity tomographies (GRIFFITH *et alii*, 1990; BARKER, 1992; GRIFFITH & BARKER, 1993) along the two profiles indicated in Fig. 2 with black full lines. As it is shown in figure, the two profiles are perpendicular each to other and located in the summit portion of Mt. di Vezzi, above the inaccessible landslide areas (violet lines). The tomographic approach has been chosen since it is able to give a high-resolution image of the subsoil structural pattern on the basis of the high resistivity contrasts between pyroclastic soils ( $10^2 \Omega\text{m}$  at most, in wet condition) and domes and/or lava flows (we estimate varying in the range  $10^2$ – $10^4 \Omega\text{m}$ ). The measurements were performed using an IRIS-SYSCAL PRO System, with a multielectrode cable consisting of 24 automatic switching electrodes at distances of 5 m along the cable. Therefore, the length of the profiles has turned out 115 m. The profiles extend allowed, on the basis of the selected electrodoical configuration, an exploration depth of about 20 m below the ground level. The multielectrode data were inverted by the RES2DINV algorithm (LOKE & BARKER, 1996; LOKE & DAHLIN, 2002). The rough surface topography characterising the profiles was incorporated into the model.

### ANALYSIS OF THE RESISTIVITY TOMOGRAPHIES

Figures 3 and 4 show the two resistivity sections coming from inversion of the data collected along the profiles, respectively, *AA'* and *BB'* (Fig. 2). In particular, the model relative to the *AA'* profile (Fig. 3) exhibits a relatively conductive layer (resistivity values in the range  $30$ – $100 \Omega\text{m}$ ) along almost the whole section, with a thickness varying from 5 m to 8 m. It is overlapped to a much more resistive structure characterised by resistivity values of about  $800 \Omega\text{m}$ . According to the geological studies of the investigated area by DI NOCERA *et alii* (this issue), the conductive stratum (unit *1a* in Fig. 3) can be ascribed to the cineritics of the Piano Liguori Formation, while the in depth resistive pattern (unit *2* in Fig. 3) could be asso-

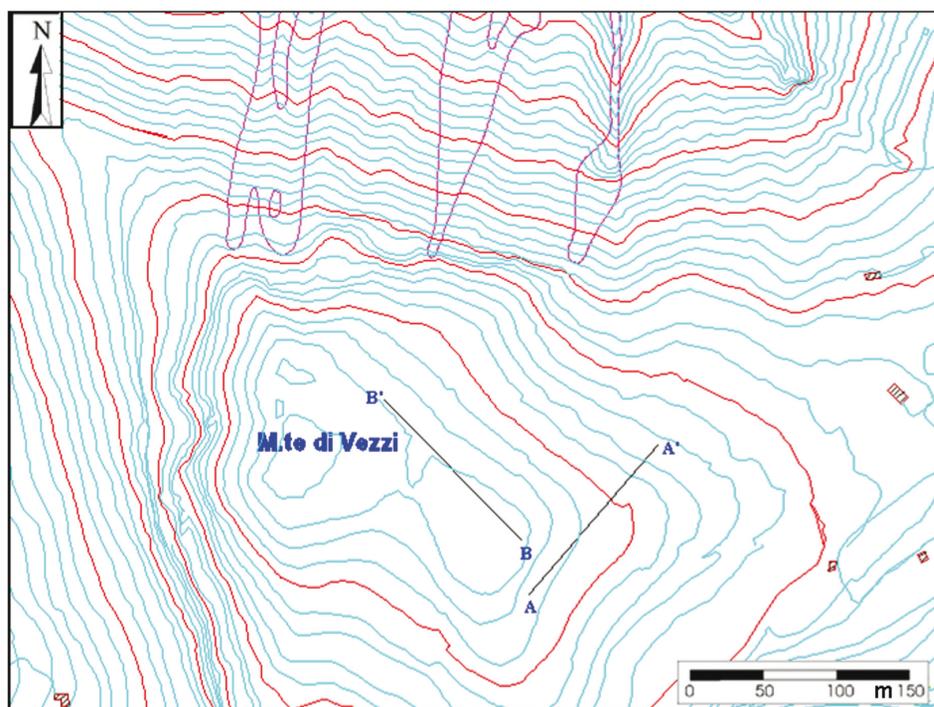


Fig. 2 - Mappa dell'area d'indagine geoelettrica. Le linee nere indicano i profili ERT, le linee viola delineano le aree interessate dagli eventi franosi dell'Aprile 2006 (da IOVINO & PERRIELLO ZAMPELLI, questo volume)  
 - Map of the geoelectrical survey area. The black lines indicate the ERT profiles, the violet ones delineate the landslides occurred on April 2006 (after IOVINO & PERRIELLO ZAMPELLI, this issue)

in Fig. 3), caratterizzata da discontinuità aperte riempite dal materiale sovrastante più fine (DE VITA *et alii*, questo volume) sia alla presenza di depositi pomiceo-scoriacei associati alla fase esplosiva più giovane della Formazione di Monte di Vezzi. Inoltre, lo strato resistivo in affioramento (unità *1b* in Fig. 3), che si osserva nella parte più settentrionale del profilo e fino ad una profondità di circa 2 m, potrebbe essere attribuito a un livello di pomici grossolane a basso contenuto d'acqua appartenente alla Formazione di Piano Liguori. Analoghi valori di resistività, infatti, sono stati osservati su materiali pomicei delle coperture piroclastiche presenti sui versanti del salernitano in località Sarno e Nocera (DE VITA *et alii*, 2006; DI MAIO *et alii*, 2007). Osservando la tomografia di resistività lungo il profilo *BB'* (Fig. 4) che, come possiamo vedere in Fig. 2, è perpendicolare alla massima direzione di pendenza del versante in frana, lo strato cineritico della Formazione di Piano Liguori è ben riconoscibile anche in questa sezione, così come il sottostante basamento lavico. Tuttavia, è opportuno sottolineare che lo strato conduttivo, attribuito alla Formazione di Piano Liguori, in questa sezione presenta spessori più piccoli (2 m÷6 m) e variazioni di pendenza meno significative rispetto a quelle osservate nel modello relativo al profilo *AA'*. In ogni caso, poiché la direzione del profilo *AA'* coincide con la direzione di immersione degli strati, la morfologia di Piano Liguori è verosimilmente associabile all'andamento dello strato conduttivo superficiale evidenziato dal modello di Fig. 3.

Infine, è importante osservare che, sebbene le misure di resistività siano state eseguite nella stagione estiva (circa 4 mesi dopo l'evento franoso), i valori di resistività che caratterizzano i materiali cineritici sono alquanto bassi (v. Figg. 3 e 4), chiara indicazione della capacità di questi materiali di ritenere acqua.

ciated either to the upper part of the dome flow (unit 3 in Fig. 3), characterised by open discontinuities (DE VITA *et alii*, this issue) filled by the overlapping finer material, or to the presence of pumice-scoriaceous deposits associated to younger explosive Mt. di Vezzi Formation. Moreover, the outcrop resistive layer (unit *1b* in Fig. 3), which we observe in the northernmost portion of the profile until to a depth of about 2 m, could be ascribable to a dry coarse pumice level belonging to the Piano Liguori Formation. Indeed, analogous resistivity values have been observed on pumice materials of pyroclastic soils characterising the Sarno and Nocera (Salerno, Italy) slope areas (DE VITA *et alii*, 2006; DI MAIO *et alii*, 2007). Looking at the resistivity tomography across the *BB'* profile (Fig. 4) that, as we can see in Fig. 2, is perpendicular to the maximum landslide slope direction, it is possible to recognise, also in this section, the cineritic layer of the Piano Liguori Formation as well as the underlying lava basement. Nevertheless, it is worth to highlight that the conductive layer, attributed to the Piano Liguori Formation, appears here to have smaller thicknesses (from 2 m to 6 m) and less significant slope variations with respect to those observed on the model along the *AA'* profile. Anyway, as the direction of this profile coincides with the layer dip direction, the Piano Liguori morphology is very likely associabile to the pattern of the shallow conductive layer outlined by the model of Fig. 3.

Finally, it is important to note that although the resistivity measurements were carried out in the summer season, about 4 months after the landslide events, the resistivity values characterising the cineritic materials are quite low (blue colours in Figg. 3 and 4); this is a clear indication of the aptitude of these materials to retain water.

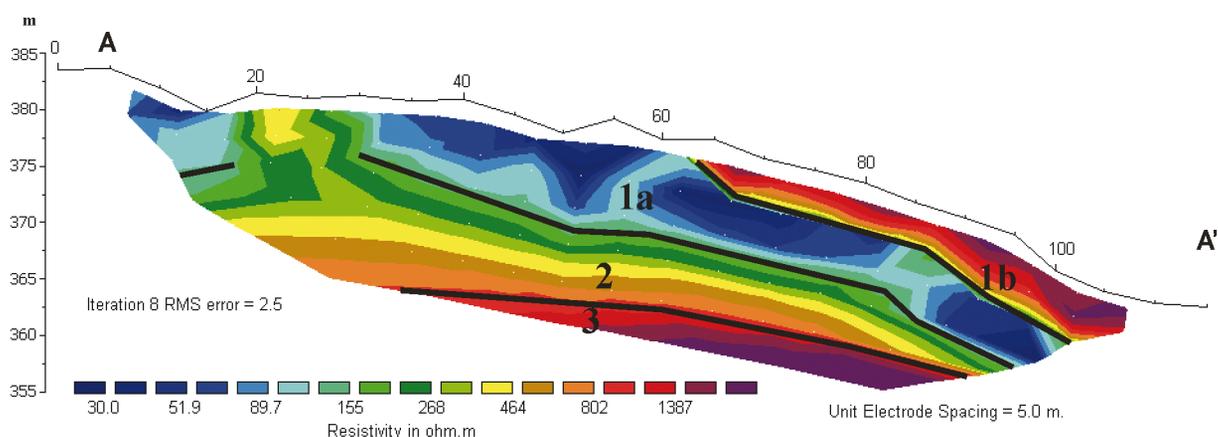


Fig. 3 – Tomografia di resistività lungo il profilo AA' di Fig. 2. Le linee nere delineano un possibile andamento delle unità geologiche che caratterizzano l'area investigata. LEGENDA: 1a) Depositi cineritici; 1b) Livello pomiceo; 2) Livello superiore alterato del duomo lavico oppure depositi pomiceo-scoriacei della Formazione di M.te di Vezzi (v. testo); 3) Duomo lavico  
 – Resistivity tomography along the AA' profile of Fig.2. The black lines sketch a possible pattern of the geological units characterising the investigated area. LEGEND: 1a) Ashy deposit; 1b) Pumice level; 2) Upper part of the dome flow or pumice-scoriaceous deposits of Mt. di Vezzi Formation (see text); 3) Dome flow

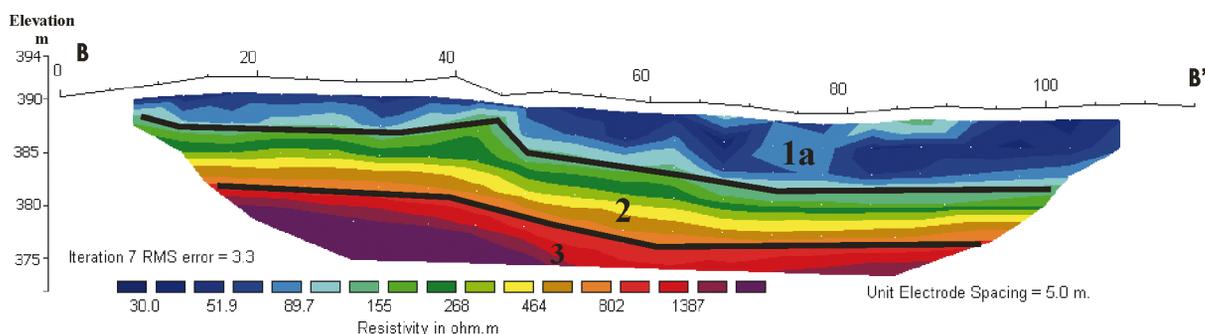


Fig. 4 – Tomografia di resistività lungo il profilo BB' di Fig. 2. Le linee nere delineano un possibile andamento delle unità geologiche che caratterizzano l'area investigata. LEGENDA: 1a) Depositi cineritici; 2) Livello superiore alterato del duomo lavico oppure depositi pomiceo-scoriacei della Formazione di M.te di Vezzi (v. testo); 3) Duomo lavico  
 – Resistivity tomography along the BB' profile of Fig.2. The black lines sketch a possible pattern of the geological units characterising the investigated area. LEGEND: 1a) Ashy deposit; 2) Upper part of the dome flow or pumice-scoriaceous deposits of Mt. di Vezzi Formation (see text); 3) Dome flow

## DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Dall'analisi delle tomografie di resistività è stato possibile identificare i volumi di materiale piroclastico che ricoprono il sottostante basamento lavico. In particolare, all'interno della copertura piroclastica mostrata dalla sezione di Fig.3, è stato possibile individuare due differenti litologie: uno strato cineritico (*layer 1a*) e uno strato pomiceo (*layer 1b*). Osservazioni in sito e analisi di laboratorio rivolte alla caratterizzazione di eventi franosi in terreni piroclastici (CALCATERRA *et alii*, 2003; DE VITA *et alii*, questo volume), sembrano indicare che, generalmente, l'innesco dell'evento franoso è da attribuire alla saturazione di strati pomicei superficiali di modesto spessore (~ 2 m). Questi, in virtù dell'elevata porosità e della naturale esposizione ai cambiamenti climatici, sono frequentemente soggetti a variazioni del contenuto d'acqua, che può rivelarsi un fattore determinante nell'innesco di un evento franoso.

Al fine di stimare la percentuale di contenuto d'acqua nelle coperture piroclastiche investigate, i valori di resistività elettrica misurati in situ

## DISCUSSION AND CONCLUSIONS

From the analysis of the resistivity tomographies it has been possible to identify the volumes of the shallow pyroclastic materials overlapping the lava basement. In particular, within the pyroclastic cover of Fig. 3, two different lithologies have been outlined: a cineritic layer (*layer 1a*) and a pumice level (*layer 1b*). Field observations and laboratory analyses, aimed to characterise landslide events involving pyroclastic soils (CALCATERRA *et alii*, 2003; DE VITA *et alii*, this issue), seem to indicate that the triggering mechanism is generally caused by saturation of shallow pumiceous levels of very low thickness (~ 2 m). These layers are frequently subjected to changes in water content due to their high porosity.

In order to estimate the water content in the investigated pyroclastic covers, we compare the in situ measured resistivity values with those obtained from laboratory analysis by varying the water content (DI MAIO *et alii*, 2007) in similar samples - saturated with

sono stati confrontati con quelli ottenuti da un'analisi di laboratorio (DI MAIO *et alii*, 2007) su campioni piroclastici analoghi, sia per litologia che per porosità (DE VITA *et alii*, questo volume), al variare del contenuto d'acqua. I campioni, saturati con acqua piovana a pressione atmosferica, appartengono ai versanti piroclastici di Valico di Chiunzi (Salerno).

La tabella 1 riassume i risultati delle misure di resistività in situ sui materiali cineritici dell'area 1a (v. Figg. 3 e 4), mentre la tabella 2 mostra i risultati relativi al livello pomiceo dello strato 1b (v. Fig. 3). In particolare,  $\rho_{m1}$  e  $\rho_{m2}$  indicano i valori di resistività ottenuti mediando i valori osservati a partire dal piano campagna fino ad una profondità  $h$  per i profili AA' e BB', rispettivamente. Considerando che il valore di porosità del materiale piroclastico di Monte di Vezzi, misurato da DE VITA *et alii* (questo volume), è circa 60%, è possibile confrontare i valori di resistività riportati nelle tabelle 1 e 2 con quelli indicati, rispettivamente, nelle tabelle 3 e 4, dove sono sintetizzati alcuni dei risultati dell'analisi di laboratorio. Il confronto permette di stimare un contenuto d'acqua variabile tra il 25% e il 35% per i depositi cineritici (*layer 1a*) e un contenuto d'acqua variabile tra il 35% e il 50% per il livello pomiceo (*layer 1b*). Tali valori indicano una condizione di parziale saturazione dei terreni investigati, in quanto le misure di laboratorio (DI MAIO *et alii*, 2007) hanno mostrato che la completa saturazione si osserva con un contenuto d'acqua maggiore del 60% per terreni cineritici e maggiore dell'80% per quelli pomiceo.

h (m)	$\rho_{m1}$ ( $\Omega\text{m}$ )	$\rho_{m2}$ ( $\Omega\text{m}$ )	$\Phi$ (%)
4.0	50	60	59.66
6.0	70	85	

Tab. 1 - Parametri fisici che caratterizzano i depositi cineritici (unità 1a di Figg. 3 e 4)  
- *Physical parameters characterising the ashy deposits (unit 1a of Figg. 3 and 4)*

$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	$\Phi$ (%)	w (%)
50	62.34	35
85		25

Tab. 3 - Parametri fisici che caratterizzano i campioni cineritici prelevati nell'area di Valico di Chiunzi (Salerno)  
- *Physical parameters characterising the ashy samples collected at Valico di Chiunzi area (Salerno, Italy)*

Il contenuto d'acqua non è l'unico fattore che influenza la condizione di stabilità di un versante. Infatti, come appare evidente dalla sezione di Fig. 4, il contenuto d'acqua della copertura cineritica, anche se aumentasse in seguito ad eventi meteorici critici, non potrebbe ritenersi responsabile di eventuali movimenti franosi a causa del livello pianeggiante dell'area. Pertanto, in virtù della topografia dell'area, delle sezioni di resistività mostrate e di quanto osservato da CALCATERRA *et alii* (2003) e DE VITA *et alii* (2006), si deduce che i volumi di materiale che potrebbero innescare, in condizioni di parziale o completa saturazione, eventuali fenomeni franosi sono quelli relativi al livello pomiceo 1b di Fig. 3. A tal riguardo è stata effettuata una stima

rainy water - of Valico di Chiunzi (Salerno, Italy), which have porosity values comparable with those observed in the Mt. di Vezzi area (DE VITA *et alii*, this issue).

Table 1 summarizes results of the in situ resistivity measurements on the ashy materials of the area 1a (see Figg.3 and 4), while the Table 2 shows the corresponding results for the pumice level of the area 1b (see Fig.3). In particular,  $\rho_{m1}$  and  $\rho_{m2}$  indicate the resistivity values obtained by averaging the values observed from the surface down to a depth  $h$  for the AA' and BB' profiles, respectively. Taking into account that the porosity value measured by DE VITA *et alii* (this issue) for the pyroclastic material of Mt. di Vezzi is about 60%, we compare the resistivity values of Tab. 1 and Tab. 2 with those of Tab. 3 and Tab. 4, where the results of laboratory analysis on pyroclastic samples are reported. Such comparison allows us to estimate a water content varying from 25% to 35% for the in situ ashy deposits (*layer 1a*) and from about 40% to 50% for the in situ shallow pumice level (*layer 1b*). These values indicate a partial saturation of the investigated soils as the complete saturation correspond to a water content larger than 60% for the ashy cover and larger than 80% for the pumice samples, as it has been found from the laboratory measurements (DI MAIO *et alii*, 2007).

h (m)	$\rho_{m1b}$ ( $\Omega\text{m}$ )	$\Phi$ (%)
1.5	1680	59.66
3.5	1340	

Tab. 2 - Parametri fisici che caratterizzano il livello pomiceo (unità 1b in Fig. 3)  
- *Physical parameters characterising the pumice level (unit 1b in Fig. 3)*

$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	$\Phi$ (%)	w (%)
1350	64.00	52
1700		43
2200		35

Tab. 4 - Parametri fisici che caratterizzano i campioni pomiceo prelevati nell'area di Valico di Chiunzi (Salerno)  
- *Physical parameters characterising the pumice samples collected at Valico di Chiunzi area (Salerno, Italy)*

The water content is not the single factor linked to the stability condition of a slope. Indeed, as it can be seen from the section of Fig. 4, the water content of the ashy cover, even if larger after critical rainfall events, could not trigger any mass movement because of the small slope level. Thus, from the analysis of the topography of the area and of the resistivity sections, we argue that the material volumes that could triggering, under saturated condition, future flowslide events are those of the pumice level 1b of Fig. 3. At this aim, we have performed an estimate of the stability condition of this pumice level by using a recently proposed semi-empirical approach (PIEGARI *et alii*, 2007) for the evaluation of the local factor of safety,

del livello di stabilità di questo strato utilizzando un approccio semi-empirico recentemente proposto dagli autori (PIEGARI *et alii*, 2007) per il calcolo del fattore di sicurezza locale,  $FS$ . In sintesi, nel modello proposto si assume che il parametro  $FS$  sia direttamente proporzionale ai valori di resistività misurati per gli ipotetici volumi di innesco e inversamente proporzionale alle pendenze locali in gioco. Utilizzando i valori di resistività e pendenze misurati per il citato livello pomiceo, è stato ottenuto un valore di  $FS=2$ . In conclusione, dallo studio eseguito emerge che la zona di versante esaminata è stabile e che solo una notevole diminuzione dei valori di resistività, corrispondente ad un aumento del contenuto d'acqua superiore al 30%, potrebbe ridurre il fattore di sicurezza a valori prossimi all'instabilità, cioè  $FS=1$ .

### RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano V. D'Isanto, G. Amoruso, A. Loria and R. Rolandi per il notevole aiuto nell'espletamento della campagna di misure in sito. Studio eseguito con finanziamenti dell'Università di Napoli Federico II.

### OPERE CITATE /REFERENCES

- BARKER, R.D. (1992) - *A simple algorithm for electrical imaging of the subsurface* - First Break, **10**: 53-62.
- CALCATERRA D., DE RISO R., EVANGELISTA A., NICOTERA M.V., SANTO A. & SCOTTO DI SANTOLO A. (2003) - *Slope instabilities in the pyroclastic deposits of the Phlegrean district and the carbonate Apennine (Campania, Italy)*. International Workshop on Occurrence and Mechanisms of Flows in Natural Slopes and Earthfills – Iw-Flows2003, Sorrento.
- CHIESA S., CIVETTA L., DE LUCIA M., ORSI G. & POLI S. (1987) - *Volcanological evolution of the island of Ischia*. Rend. Acc. Scienze Fis. e Mat., Special Issue “The volcanoclastic rocks of Campania (Southern Italy)”, P. Di Girolamo eds – Liguori Editore: 69-83.
- DE VITA P., AGRELLO D., AMBROSINO F. (2006) - *Landslide susceptibility assessment in ash-fall pyroclastic deposits surrounding Mount Somma-Vesuvius: Application of geophysical surveys for soil thickness mapping*. Journal of Applied Geophysics, **59**: 126-139.
- DE VITA P., CELICO P., DI CLEMENTE E. & ROLANDI M. (2007) - *Engineering geological models of the initial landslides occurred on 30 April 2006, at the Mount di Vezzi (Ischia Island)*. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, (this issue).
- DI MAIO R., PIEGARI E., SCOTELLARO C., MILANO L., ROBERTI N. (2007) - *Water content evaluation of pyroclastic soils by geophysical measurements for landslide modelling*. Geophysics, SUBMITTED.
- DI NOCERA S., MATANO F., ROLANDI G. & ROLANDI M. (2007) - *Contributo sugli aspetti geologici e vulcanologici di M.te Vezzi (Ischia)*. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, (this issue).
- GRIFFITH D.H., TURNBULL J. & OLAYINKA A.I. (1990) - *Two-dimensional resistivity mapping with a computer controlled array*. First Break, **8**: 121-129.
- GRIFFITH D.H. & BARKER R. D. (1993) - *Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology*. Journal of Applied Geophysics, **29**: 211-226.
- GUADAGNO F.M. & MELE R. (1995) - *La fragile isola d'Ischia*. Geol. Appl. e Idrogeol., **30**(1): 177-187 – Atti I Conv. G.N.G.A., Taormina.
- IOVINO M. & PERRIELLO ZAMPELLI S. (2007) - *Le frane del 30 aprile 2006 del M. Vezzi (Ischia, NA) nel contesto delle frane di scivolamento-valanga-colata nei suoli vulcanici in Campania*. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, (this issue).
- LOKE M.H. & BARKER R.D. (1996) - *Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method*. Geophysical Prospecting, **44**: 131-152.
- LOKE M.H. & DAHLIN T. (2002) - *A comparison of the Gauss-Newton and the quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion*. Journal of Applied Geophysics, **49**: 149-162.
- MELE R. & DEL PRETE S. (1998) - *Fenomeni di instabilità dei versanti in Tifo Verde del Monte Epomeo (isola d'Ischia – Campania)*. Boll. Soc. Geol. It., **117**(1): 93-112.
- ORSI G., GALLO G. & ZANCHI A. (1991) - *Simple shearing block-resurgence in caldera depressions. A model from Pantelleria and Ischia*. Journ. of Volcanol. and Geotherm. Res., **47**: 1-11.
- O.U. 2.38 (1998) - *Ricerca storica sulle colate di fango in terreni piroclastici della Campania*, G.N.D.C.I. – Dept. of Civ. Eng., University of Salerno, Italy.
- PIEGARI E., CATAUDELLA V., DI MAIO R., MILANO L., NICODEMI M. & SOLDOVIERI M.G. (2007) - *Electrical resistivity tomography and landslide modelling: a conceptual approach*. Journal of Applied Geophysics, SUBMITTED.
- VEZZOLI L. (1988) - *The island of Ischia*. CNR QUADERNI DE “LA RICERCA SCIENTIFICA” 114(10): 1-122, ROMA, ITALIA.

$FS$ . Briefly, the proposed model assumes that the  $FS$  parameter is directly related to the  $\rho$  values of the hypothetical landslide volumes and inversely related to the local slope angles. By using the resistivity and slope angle values observed for the quoted layer, we find  $FS=2$ . Thus, the investigated slope area is stable and only a decrease of the resistivity values corresponding to an increase of the water content larger than 30% could reduce the safety factor to values close to the instability, i.e.  $FS=1$ .

### ACKNOWLEDGEMENTS

We thank V. D'Isanto, G. Amoruso, A. Loria and R. Rolandi for the invaluable help in the field work. Study performed with financial support from University of Naples “Federico II”.

Received October 2006 - Accepted February 2007