

MARIA TERESA CARROZZO<sup>1</sup>, MARCO DELLE ROSE<sup>2,3</sup>,  
ANTONIO FEDERICO<sup>2</sup>, GIOVANNI LEUCCI<sup>1</sup>, VITTORIO MARRAS<sup>3</sup>,  
SERGIO NEGRI<sup>1</sup>, LUIGIA NUZZO<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Scienza dei Materiali, Università di Lecce

<sup>2</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, Politecnico di Bari, sede di Taranto

<sup>3</sup> Gruppo Speleologico Neretino (G.S.N.) Nardò, LE

## **OSSERVAZIONI GEOLOGICHE E INDAGINI GEOFISICHE SUL CARSIAMO DELLA COSTA NERETINA**

### **RIASSUNTO**

La piana costiera compresa tra S. Isidoro e Serra Cicora (Nardò, LE) è sede di un sistema carsico attivo ed è caratterizzata da morfologie carsiche, tra cui numerose doline di crollo (“spunnulate”), la cui coalescenza causa sprofondamenti di ragguardevole estensione e potrebbe portare alla formazione di insenature costiere.

I fenomeni di dissoluzione chimica preparatori degli eventi di sprofondamento, assumono notevole rilevanza territoriale, dal momento che sono presenti anche in altri tratti delle piane costiere salentine. Di tali processi, oltre all’incidenza nell’evoluzione del paesaggio litorale e delle linee di costa, va considerata anche la pericolosità ambientale, avendo essi interessato nel recente passato infrastrutture viarie e abitative.

Le indagini elettromagnetiche con georadar hanno messo in luce cavità ipogee non individuabili dalla superficie. In particolare, le indagini geofisiche hanno prodotto i risultati migliori in aree con minore presenza di materiale conduttivo (terre rosse, depositi palustri e acqua di falda salmastra), dove maggiore è lo spessore dell’areato e, pertanto, minore è l’assorbimento dell’energia elettromagnetica da parte del mezzo.

### **SUMMARY**

The coastal plain between S. Isidoro and Serra Cicora (Nardò - Lecce), formed by Cretaceous and Pleistocene carbonatic deposits, is seat of an active karstic system. It is characterized by various karstic morphologies, among which there are numerous collapse sinkholes, locally named “spunnulate”, that sometimes reach notable extension because of the coalescence of many sinkholes.

The accelerated chemical dissolution of the carbonatic deposits, at the origin of speleogenetic phenomena responsible for the collapse, assumes remarkable territorial importance, since the preparing conditions are present also in other parts of the salentine coastal plains. Besides the incidence in the evolution of the coastal landscape and coastlines, the environmental hazard posed by these processes must be considered, since in the recent past they interested various road and housing infrastructures.

For a more exhaustive description of the karstic system Ground Penetrating Radar investigations can be very useful; in the specific case such investigations revealed karstic cavities which could not be detected on the base of surface evidences only. Particularly, the geophysical investigations gave the most meaningful results outside the marshy zones, where the presence of conductive material (terre rosse, marshy deposits and brackish water) is lesser, the aerated layer is thicker and, therefore, the electromagnetic energy absorption by the medium is lower and the signal-noise ratio is higher.

## INTRODUZIONE

La piana costiera compresa tra S. Isidoro e Serra Cicora (Nardò, prov. di Lecce) costituisce la porzione meridionale di un'area carsica<sup>1</sup>, omogenea per caratteristiche geomorfologiche, che si estende verso NW sino a Torre Castiglione (riquadro in Fig. 1).

Essa è caratterizzata da varie morfologie carsiche, tra cui particolari doline di crollo localmente denominate "spunnulate", ossia "sfondate" (NOVEMBRE, 1961), la cui formazione, in considerazione dell'antropizzazione del territorio, è causa di pericolosità ambientale. Ad esempio, nel 1992 l'improvvisa formazione di una spunnulata di dimensioni di circa 20 per 15 m sulla sede della strada provinciale Torre Inserraglio-S. Isidoro, solo per caso non provocò vittime umane (DELLE ROSE, 1992; FEDERICO, 1999).

Anche altri tratti delle coste salentine presentano situazioni geomorfologiche analoghe, tra cui quello a N dell'area studiata sino a Torre Castiglione, e, sul versante adriatico, il tratto compreso tra Torre dell'Orso e Casalabate. In quest'ultima località, ad esempio, nel 1993 la formazione di una dolina di crollo provocò danni ad interi caseggiati di entità tale da renderne necessaria la demolizione (FEDERICO, 1999).

Le sole osservazioni di superficie non sono di norma sufficienti per la detezione delle cavità carsiche. È perciò necessario affiancare indagini geofisiche allo studio diretto di superficie. A tal fine, è stata effettuata un'indagine elettromagnetica mediante georadar, anche nell'ottica di verificare l'applicabilità del metodo in condizioni svantaggiose per la presenza nel sottosuolo di materiale altamente conduttivo (terre rosse, depositi palustri e acqua di falda salmastra).

## INQUADRAMENTO GEOLOGICO

La zona oggetto di studio, estesa circa 10 km<sup>2</sup>, è delimitata verso ovest da una costa rocciosa frastagliata da numerose insenature e verso est da un gradino morfologico coincidente con un sistema di faglie NNW – SSE (fig. 1). Essa coincide con una piana costiera elevata alcuni metri sul livello del mare e di ampiezza da alcune centinaia di metri (a ovest di Serra Cicora) a oltre un chilometro (in corrispondenza della Palude del Capitano).

Il substrato litico è costituito da calcareniti, calcari macrofossiliferi e breccie carbonatiche (depositi terrazzati, Auct.) del Pleistocene superiore, spessi complessivamente alcuni metri (DAI PRA, 1982; DAI PRA and HEARTY, 1989). Gli strati presentano quattro sistemi di fratture subverticali con direzioni medie (misurate da N verso E) all'incirca: 0°, 45°, 90° e 135°. I depositi pleistocenici giacciono in discontinuità stratigrafica su depositi di età cretacea, costituiti da calcari e calcari dolomitici (Calcari di Melissano e Dolomie di Galatina, Auct.). Gli strati, compatti e con superfici di stratificazione nette, presentano otto sistemi di fratture subverticali orientate all'incirca: 0°, 15°, 45°, 60°, 90°, 115°, 135° e 150°. Le coperture recenti sono costituite da argille e limi palustri, sabbie dunari e di spiaggia e depositi residuali (terre rosse).

Alcune zone della piana sono soggette ad impaludamenti stagionali. La più estesa di esse è la Palude del Capitano, un'area morfologicamente depressa e delimitata da un gradino di altezza inferiore al metro.

I depositi pleistocenici e, in parte, quelli cretacei, sono caratterizzati da morfologie carsiche quali vaschette di corrosione, crepacci, pozzi e, segnatamente, doline di crollo o "spunnulate" (Fig. 1). Queste ultime hanno profondità di qualche metro e forma ellittica o di spezzata in presenza di distacchi perimetrali. Taluni sprofondamenti, formati dalla coalescenza di singole doline, hanno forma allungata secondo direttrici tettoniche e raggiungono estensioni di alcune migliaia di metri quadrati ("subsidenza carsica").

<sup>1</sup> Riportata nel Catasto Regionale della Federazione Speleologica Pugliese come Pu SA 4.

Le doline sono ben osservabili dove le coperture mancano o hanno esiguo spessore, ossia all'interno della Palude del Capitano e in prossimità della linea di costa, dove il substrato litico è denudato dall'azione erosiva delle onde. Al di fuori di queste aree le doline vengono ben presto colmate naturalmente o dall'uomo. In prossimità della costa e all'interno della Palude del Capitano le doline sono allagate da acque salmastre prodotte dal mescolamento di acque di intrusione marina con acque della falda profonda salentina (COTECCHIA, 1956; COTECCHIA *et al.*, 1975; DELLE ROSE *et al.*, 2000). Le acque salmastre formano una falda che si assottiglia dall'entroterra verso costa e individua l'attuale livello carsico di base.

Lungo il perimetro delle doline sono presenti solchi di dissoluzione profondamente incisi e cunicoli, in genere allagati, orientati secondo le fratture tettoniche. Anche lungo la costa si aprono numerose condotte carsiche: alcune fungono da sorgenti; altre, denominate estavelle o polle-inghiottitoi, esplicano alternativamente la funzione di sorgenti e di inghiottitoi in dipendenza dall'altezza di marea (CARLIN *et al.*, 1968), con l'effetto di incrementare i mescolamenti tra l'acqua di falda e quella marina e di determinare il continuo "ringiovanimento" delle acque salmastre.

In base all'età dei depositi pleistocenici, compresa tra circa 800.000 e 156.000 anni (DAI PRA, 1982), e considerando le variazioni della linea di costa per cause glacioeustatiche e tettoniche (DAI PRA and HEARTY, 1989), il carsismo della piana costiera neretina deve essersi evoluto nell'Olocene e, in parte, nell'interglaciale Riss-Würm. Pertanto, per la genesi delle forme

carsiche è pertinente parlare di ipercarsismo non solo nell'accezione "chimica" (CIGNA, 1983; FORTI, 1991), ma anche in quella "morfológica", ossia di forme generate da "rapidi" processi di dissoluzione. A tal proposito, si segnala la presenza di solchi di dissoluzione profondi oltre 10 cm lungo canali di bonifica realizzati nel 1910. L'aggressività delle acque salmastre è dovuta a vari fattori tra cui particolare rilevanza dovrebbero assumere la presenza di ioni cloro e la variazione della forza ionica conseguente ai mescolamenti tra l'acqua di falda e quella marina.

A processi ipercarsici tutt'ora attivi è, quindi, da attribuire l'attività speleogenetica all'origine della formazione delle doline di crollo e degli sprofondamenti più estesi aventi carattere, talora, di vera e propria subsidenza carsica. D'altra parte, il fatto che questi ultimi si presentano allineati secondo direttrici tettoniche, al pari delle insenature che frastagliano la costa, suggerisce che tali forme del paesaggio rappresentino stadi evolutivi differenti di un unico processo geomorfologico. In altre parole, le insenature costiere – o almeno alcune di esse – possono ritenersi originate dal crollo dei "diaframmi" di substrato roccioso tra gli sprofondamenti e la linea di costa.

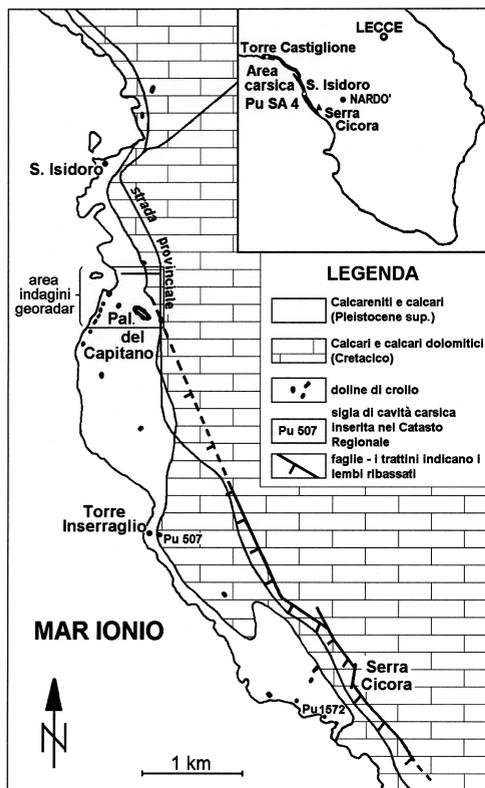


Fig. 1 - Inquadramento geografico e carta geologica con ubicazione delle principali doline.

Inoltre, in base all'estensione della falda di acque salmastre, il sottosuolo potenzialmente soggetto alle azioni speleogenetiche potrebbe essere più esteso di quanto suggerito dalle evidenze di superficie e lasciato intravedere dalle infrastrutture antropiche.

## INDAGINI GEOFISICHE

Allo scopo di meglio definire le condizioni di carsificazione dell'area sono state eseguite indagini elettromagnetiche con georadar. Tale tecnica era stata già efficacemente utilizzata in altre aree del Salento (CARROZZO *et al.*, 1997; 1999).

Purtroppo in presenza di materiali particolarmente conduttivi come quelli presenti nel primo sottosuolo della zona della Palude del Capitano, il georadar non fornisce buoni risultati a causa dell'assorbimento dell'energia elettromagnetica. Le indagini con georadar in quest'area hanno anche avuto lo scopo di verificare le possibilità offerte da questo metodo d'indagine in tali condizioni limite e di mettere a punto le tecniche operative più idonee.

Il rilievo è stato eseguito con strumentazione georadar Sir-System2. Profili test sono stati effettuati con antenne da 500, 200 e 100 MHz per determinare una opportuna taratura dello strumento tesa a valutare la profondità di penetrazione del segnale, la risoluzione e ad ottimizzare il rapporto segnale-rumore. Lungo un tratto della strada provinciale Torre Inserraglio-S. Isidoro, come già detto interessata nel 1992 da uno sprofondamento, sono stati effettuati due profili paralleli (L1 ed L2 in fig. 2). La porzione meridionale di tale tratto stradale attraversa la zona paludosa depressa (1-2m sul l.m.m.), mentre quella settentrionale è al di fuori di essa, in un'area in moderato rilievo altimetrico (3-4m sul l.m.m.). Altri profili sono stati eseguiti nella zona paludosa sia in prossimità della strada che nelle vicinanze di alcune doline (L3, L5 e L6, Fig. 2).

In fase di elaborazione sono state preliminarmente normalizzate le distanze orizzontali tra i marker. Per eliminare il rumore coerente visibile come un disturbo orizzontale si è applicato un "background removal filter" (CONYERS e GOODMAN, 1997); ciò ha consentito di meglio evidenziare anomalie di dimensioni dell'ordine del metro. La presenza di rumore sulle sezioni di alcuni profili ha reso necessaria l'applicazione di opportuni filtri passa-banda.

Al fine di convertire la scala dei tempi in profondità, si sono utilizzati diversi metodi per la stima della velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche (TILLARD e DUBOIS, 1995; FRUHWIRTH *et al.*, 1996). Sia dalle stime di velocità ottenute dai profili WARR ("Wide Angle Reflection and Refraction"), che da quelle ottenute dalle iperboli di diffrazione presenti sulle sezioni radar, si è evidenziata una variazione di velocità con la profondità compresa tra 0.11 m/ns e 0.07 m/ns. Per ottenere una stima qualitativa delle profondità si è utilizzata una velocità media di 0.09 m/ns.

Sulle sezioni radar acquisite lungo la sede stradale (di cui, data la sostanziale somiglianza, si riporta in Fig. 3 solo quella relativa a L2) si nota una chiara riflessione da interfaccia leggermente ondulata (compresa all'incirca tra 10 e 25 ns) associabile alla base del rilevato stradale (I in Fig. 3). Altri segnali non imputabili a caratteristiche naturali del sottosuolo sono: due riflessioni da vuoto (V), tra le ascisse 114 e 116 m e tra le ascisse 389 e 390 m, relative a due canali artificiali e un'iperbole con apice in corrispondenza dell'ascissa 514 m (H) dovuta alla interferenza di un cavo telefonico aereo.

In ciascuna delle sezioni L1 ed L2 la parte settentrionale (ascisse 0:350 m) è caratterizzata da un alto rapporto segnale-rumore e quella meridionale (ascisse 350:550 m) da un più basso valore del medesimo rapporto. Le due parti corrispondono, rispettivamente, alla zona a moderato rilievo altimetrico e a quella paludosa depressa. La parte settentrionale è caratterizzata

dalla presenza di numerose iperboli (indicative di piccole cavità), localizzate specialmente tra le ascisse 130 e 180 m, a tempi compresi tra 20 e 100 ns (Fig. 3).

Le cavità, di cui non si hanno evidenze in superficie, hanno per lo più dimensioni dell'ordine del metro e si estendono anche ai lati della strada come rilevato dai profili C1-C5 e T1 (Fig. 2). In Fig. 4 sono riportate le sezioni relative a parte dei profili L2, L1 e al profilo C1. Per facilitare il confronto e tener conto della differenza di quota, per la sezione relativa a C1 sono state adoperate le stesse ascisse dei profili L1-L2 e sono state applicate delle correzioni statiche assumendo come riferimento l'interfaccia I. Le profondità sono date rispetto al piano stradale assumendo, come detto in precedenza, un valore di velocità media di 0.09 m/ns. Nonostante la sezione relativa a C1 sia caratterizzata da una maggiore presenza di rumore (a causa della ruvidità della superficie di misura), si nota chiaramente l'analogia di comportamento del segnale radar nelle due situazioni, ed in particolare la maggiore concentrazione di iperboli nella parte meridionale (a partire da circa 135 m in corrispondenza di L2, da circa 128 m in corrispondenza di L1 e da circa 120 m in corrispondenza di C1).

Nella parte meridionale delle sezioni L1 ed L2, il forte assorbimento del segnale non consente l'individuazione di eventuali cavità del sottosuolo. Fa eccezione la forte anomalia compresa tra 485 e 505 m (C in Fig. 3) corrispondente alla dolina di crollo formatasi nel 1992. La cavità fu successivamente riempita con materiale di riporto con caratteristiche elettromagnetiche differenti da quelle del sottosuolo naturale.

Anche nelle sezioni radar relative a profili eseguiti con antenne da 100, 200 e 500 MHz all'interno della zona paludosa (a ridosso di doline con livello dell'acqua a circa 0.5 m dal piano campagna), il basso rapporto segnale-rumore e la presenza di un segnale "ringing" non permettono, in genere, di evidenziare iperboli associabili ad eventuali cavità. Fa eccezione la sezione L4 (Figg. 2 e 5) relativa ad un profilo eseguito con l'antenna da 500 MHz a ridosso di una dolina (con livello d'acqua a 0.8 m dal piano campagna), in cui è individuabile una riflessione relativa ad una cavità la cui imboccatura si apre alla base della stessa dolina. In quest'ultimo caso, la detezione della cavità è stata favorita dalla coincidenza di più fattori (dislivello tra superficie topografica e livello di falda di quasi un metro, assenza di depositi palustri, sottile copertura di terra rossa, cavità parzialmente areata).

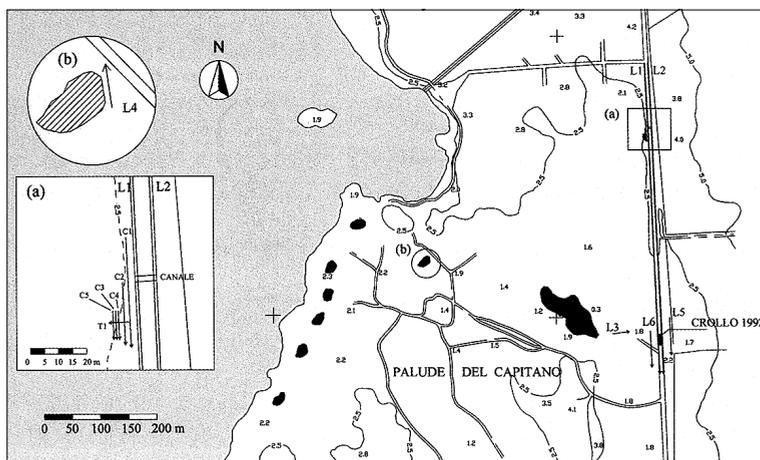


Fig. 2 - Planimetria dell'area di indagine: L1, ..., L6, C1, ..., C5, T1, profili georadar.

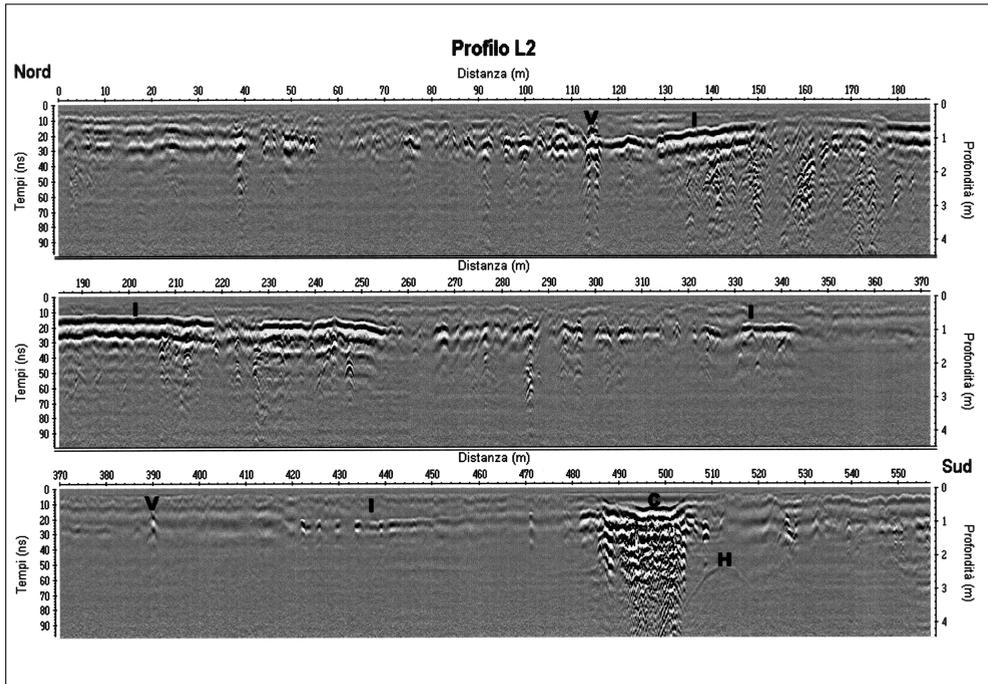


Fig. 3 - Sezione radar elaborata del profilo L2 (antenna: 200 MHz).

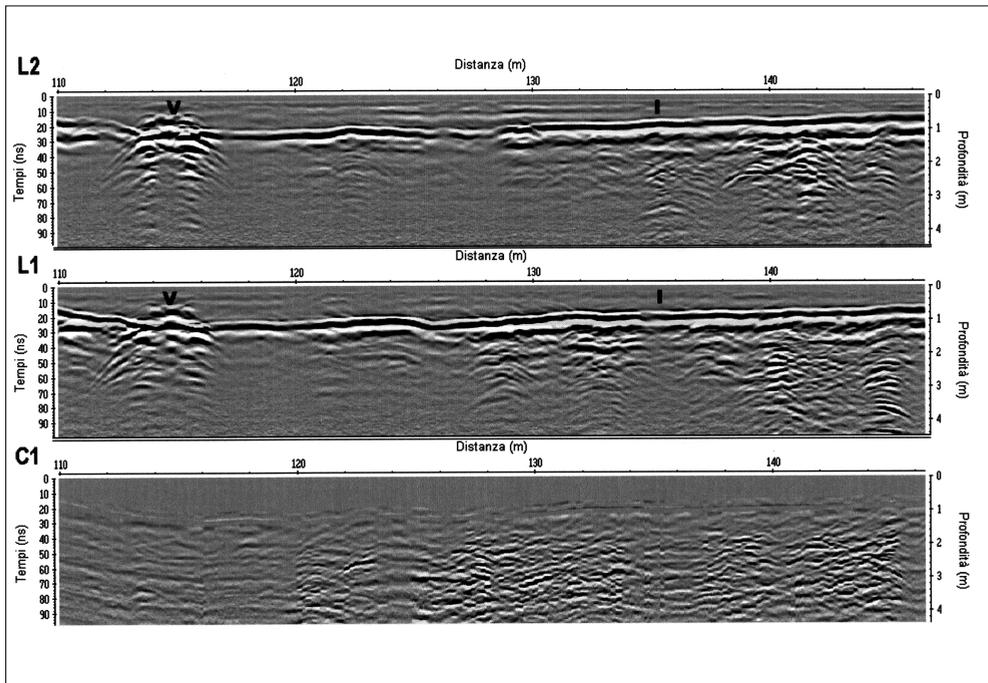
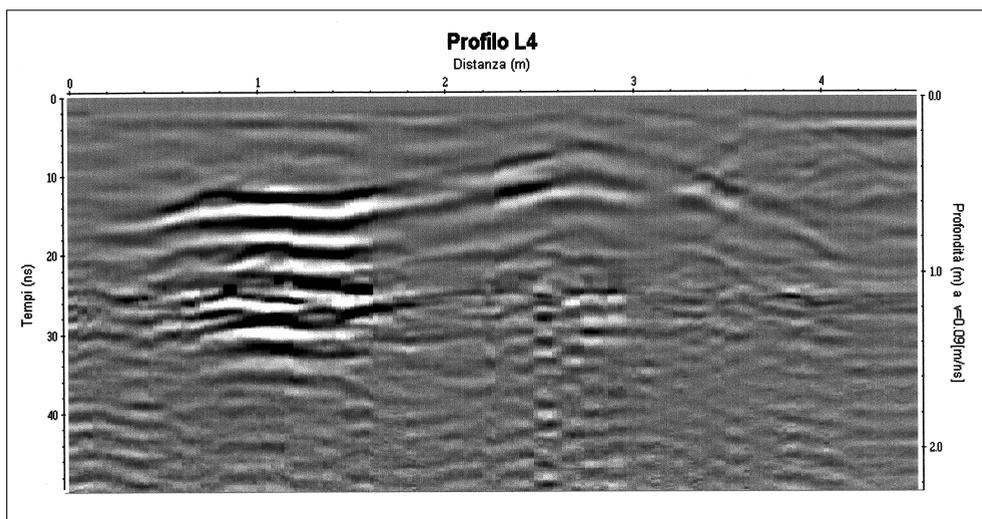


Fig. 4 - Sezioni radar elaborate di parte dei profili L2, L1 e del profilo C1 (antenna: 200 MHz).



**Fig. 5** - Sezione radar relativa al profilo L4 eseguito in prossimità di una dolina di crollo (antenna: 500 MHz).

## CONCLUSIONI

In questo lavoro è stata messa in evidenza l'azione di fenomeni di ipercarsismo all'origine delle doline di crollo (spunnulate) della costa neretina. In particolare, il continuo mescolamento delle acque marine con quelle di falda determina una intensa e continua azione di dissoluzione delle rocce carbonatiche.

Attraverso l'uso del georadar sono state individuate cavità in porzioni di territorio dove le coperture naturali e strutture antropiche mascherano in gran parte le forme carsiche.

Il basso rapporto segnale-rumore è normalmente associabile alla presenza di materiali conduttivi, quali depositi palustri e/o acqua salmastra di falda molto prossima alla superficie topografica, come si verifica nella Palude del Capitano.

Il georadar ha dato risultati significativi nella zona in moderato rilievo altimetrico, dove la falda salmastra è a 2-3 m dal piano campagna. Si evidenzia che le cavità rilevate col georadar non sono individuabili in base alle osservazioni di superficie, probabilmente anche a causa delle modificazioni antropiche del paesaggio.

È opportuno, infine, porre in rilievo che, oltre che nella piana costiera neretina, i medesimi fattori predisponenti i fenomeni di sprofondamento, che creano condizioni di rischio per le vite umane e per le infrastrutture, sono presenti anche lungo altri estesi tratti delle coste salentine, quali quello tra S. Isidoro e Torre Castiglione e, sul versante adriatico, quello tra Torre dell'Orso e Casalabate.

## RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano gli speleologi F. Fiorito, G. Lisi, R. Onorato e F. Orlando per le informazioni fornite sull'ubicazione e su alcuni aspetti morfologici delle spunnulate.

Pubblicazione effettuata con i fondi GNDICI, U.O. n. 2.36 contratto CNR n. 03.00036.GN42.

## **BIBLIOGRAFIA**

- CARLIN F., DAI PRA G., MAGRI G., 1968 – Segnalazione di polle-inghiottitoio marini lungo la costa jonica della Penisola Salentina, *Quad. Ricerca Scient.*, vol. 49: 3-8.
- CARROZZO M.T., DELLE ROSE M., FEDERICO A., NEGRI S., QUARTA T., 1997 – Individuazione con georadar di cavità carsiche nella zona di Nociglia (Lecce), *Atti 15° Congresso Naz. di Geofisica*, Roma: 35-40.
- CARROZZO M.T., ARCUTI S., BASILE V., MARGIOTTA C., PIRO S., NEGRI S., QUARTA T., ROSSO F., 1999 – Metodi geofisici per lo studio del carsismo: indagini nella zona di Porto Badisco-Otranto (LE), *Thalassia Salentina*, 23, suppl.: 21-34.
- CIGNA A.A. (1983) - Sulla classificazione dei fenomeni carsici. *Le Grotte d'Italia*, 11: 497-505.
- CONYERS L. B., GOODMAN D., 1997 – Ground-penetrating radar – An introduction for archaeologists, *AltaMira Press Inc.*
- COTECCHIA V., 1956 – Sulle caratteristiche delle sorgenti e delle modalità di rinvenimento della falda profonda nella Penisola Salentina in rapporto alla struttura dei calcari cretacei della regione. *Ann. Fac. Ing.*, 2: 1-19.
- COTECCHIA V., TAZIOLI G.S., TITTOZZI P., 1975 – Geochimica delle acque della penisola salentina in relazione ai rapporti tra le acque di falda, le acque marine sotterranee e il mare, *Geol. Appl. e Idrogeol.* vol. X, Parte I: 205-224.
- DAI PRA G., 1982 – The late pleistocene marine deposits of Torre Castiglione (southern Italy). *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, vol. 5: 115-119.
- DAI PRA G., HEARTY P. J., 1989 – Variazioni del livello del mare sulla costa ionica salentina durante l'Olocene. Epimerizzazione dell'isoleucina in *Helix* sp., *Mem. Soc. Geol. It.*, 42: 311-320.
- DELLE ROSE M., 1992 – Il rischio geologico nel Salento: cedimento del suolo per crollo di cavità carsiche – il caso di Sant'Isidoro, *Il Leccio*, Anno V - N. 9-12: 16-20.
- DELLE ROSE M., FEDERICO A., FIDELIBUS C., 2000 – A computer simulation of groundwater salinization risk in Salento peninsula (Italy). *Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Computer Simulation in Risk Analysis and Hazard Mitigation*, 465-475.
- FEDERICO A., 1999 – Aspetti geologico-ingegneristici dell'area carsica salentina. *Thalassia Salentina*, vol. 23: 36-46.
- FORTI P., 1991 - Processi carsici e speleogenesi – Prima Parte, *Speleologia*, vol. 24, pp. 42-46.
- FRUHWIRTH R. K., SCHMOLLER R., OBERAIGNER E. R., 1996 – Some aspects on the estimation of electromagnetic wave velocities, *6th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR'96)*: 135-138.
- LOHMANN K.C., 1988 – Geochemical patterns of meteoric diagenetic systems, In *Paleokarst*, Springer-Verlag, James N.P & Choquette P.W. eds.
- NOVEMBRE D., 1961 – Aspetti del carsismo costiero del Salento. *La Zagaglia*, 10: 22-51.
- TILLARD S., DUBOIS J.C., 1995 – Analysis of GPR data: wave propagation velocity determination, *Journal of Applied Geophysics*: 77-91.