

## **Il sistema carsico della Grotta del Ciabattino (Monti Lessini nordoccidentali -Verona): nuove scoperte e caratterizzazione geofisica dell'area**

LUCIANO MARASTONI<sup>1</sup>, LAURA AGOSTINI<sup>2</sup>, MATTEO COLLAREDA<sup>3</sup>, NASSER ABU ZEID<sup>4</sup>

1. Gruppo Speleologico CAI Sezione di Verona – Via Santa Toscana, 11 – 37129 Verona, Italy – lucianomarastoni94@gmail.com

2. Liceo Statale Galileo Galilei – Via S. Giacomo, 11 – 37135 Verona, Italy – laura.agostini1@posta.istruzione.it

3. Studiosisma Indagini Geofisiche – Strada Statale Pasubio, 10 – 36030 Motta di Costabissara, Vicenza, Italy – info@studiosisma.com

4. Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra, Università di Ferrara; CEO Teamgeofisica.ceg, Ferrara, Italy – teamgeofisica.ceg@gmail.com

---

### ABSTRACT

*The Ciabattino's Cave is located in the Lessini Mountains (Venetian Prealps) at an altitude of 1467 m above sea level; it develops in the lithological formation of Rosso Ammonitico Veronese and is one of the paleosinkholes, perhaps the most important, of the Corno D'Aquilio's area, an important karstic sector of the Prealps. The cave is relatively small, but it is extremely interesting for geophysical surveys, also with regard to its proximity to a large abyss: the Spluga della Preta (-877 m deep and about 7 km wide). For this purpose, given the unsuccessful attempts with speleological explorations, we used an electrical geophysical survey methodology, ERT (Electrical Resistivity Tomography), to verify the existence and location of any cavities that can be associated with the Ciabattino's Cave. The models obtained with the experimental apparent resistivity values, using the Wenner configuration, provided important images for our research. On the one hand, they confirmed the applicability of the method; on the other hand, the models provided information on the internal structure of the cave and its possible extension. The speleological exploration also found other geologically important elements, such as: karstic elements and, also, various types of red and yellow sediments mixed with flint, located in the formation of Rosso Ammonitico Veronese.*

**Key words:** *Electrical Resistivity Tomography 2D/3D, Ciabattino Cave, Spluga della Preta Cave, karst, tectonics.*

### RIASSUNTO

La Grotta del Ciabattino si trova sui Monti Lessini (Prealpi Venete) a quota 1467 m s.l.m.; si sviluppa nella formazione litologica del Rosso Ammonitico Veronese e rappresenta uno dei paleoinghiottitoi, forse il più importante, di tutta l'area del Corno D'Aquilio, importante settore carsico delle Prealpi Venete. La cavità è modesta come sviluppo spaziale, ma estremamente interessante come terreno di indagine per ulteriori prosecuzioni, anche per quanto riguarda la sua vicinanza con un grande abisso: la Spluga della Preta, -877 metri di profondità e circa 7 km di sviluppo spaziale. A tale scopo, visti gli infruttuosi tentativi con le esplorazioni speleologiche, abbiamo utilizzato una metodologia di indagine geofisica indiretta di tipo elettrico ERT (*Electrical Resistivity Tomography*) per verificare l'esistenza e l'ubicazione di eventuali proseguimenti della cavità presa in considerazione. I valori sperimentali di resistività apparente, utilizzando la configurazione *Wenner*, hanno restituito – dopo l'inversione dei dati – immagini interessanti per la nostra ricerca. Da un lato hanno confermato l'applicabilità del metodo e dall'altro i modelli acquisiti hanno fornito una ricchezza di informazioni sulla struttura interna della grotta circa la sua possibile estensione. Durante l'esplorazione speleologica sono stati scoperti altri elementi geologicamente rilevanti e originali, come tamponamenti carsici non toccati dalla loro deposizione e vari tipi di sedimenti di colore rosso e giallo misti a selce, localizzati nella formazione media del Rosso Ammonitico Veronese.

**Parole chiave:** *Electrical Resistivity Tomography 2D/3D, Grotta del Ciabattino, Abisso Spluga della Preta, carsismo, tettonica.*

## 1. INTRODUZIONE

Lo studio della Grotta del Ciabattino ha lo scopo di trovare uno sviluppo spaziale più articolato di quello attuale, in quanto si trova in prossimità di una delle più grandi grotte d'Europa: la Spluga della Preta.

I Monti Lessini ospitano grotte di notevoli dimensioni, grazie alla natura delle formazioni presenti nell'assetto litologico (ISPRA-Foglio 35 Dipartimento per il Servizio Geologico d'Italia) e alle condizioni climatiche che ne favoriscono la dissoluzione.

Infatti la formazione litologica in cui si sviluppa la Grotta del Ciabattino è il Rosso Ammonitico Veronese (RAV), un tipo di roccia più carsificabile nella parte intermedia, detta formazione di Fonzaso. Inoltre la genesi della grotta è stata favorita da una complessità di fratture causate per lo più da dislocazioni tettoniche con direzioni diverse.

La grotta, molto conosciuta e facilmente percorribile, è sempre stata visitata per la sua bellezza, soprattutto alla fine dell'inverno quando le concrezioni di ghiaccio creano un'attrazione turistica unica nel nostro territorio. Poiché le ricerche dirette a scopo esplorativo non hanno mai prodotto risultati rilevanti,

si è deciso di utilizzare indagini indirette per cercare di ottenere maggiori informazioni sul suo sviluppo.

Le ragioni che ci hanno spinto a intraprendere questo tipo di indagine si possono riassumere in due punti:

- 1) individuare nuove probabili vie verticali presenti sul fondo della cavità;
- 2) utilizzare metodologie largamente applicate nelle prospezioni, mineralogiche, idrologiche, di siti inquinanti e altro, mediante un'indagine geofisica in campo speleologico.

Per quanto riguarda la prima, va ricordato che numerosi sono stati i tentativi di speleologi che, nel tempo, si sono cimentati in questa impresa, esplorando innumerevoli pertugi orizzontali di questa cavità, ma purtroppo senza successo. Abbiamo quindi deciso di risolvere questa problematica utilizzando metodologie indirette.

A questo punto abbiamo predisposto lunghe linee elettrodiche sopra la grotta individuata trenta metri sotto il tappeto erboso per poterne sondare la profondità. L'area di pascolo sopra la Grotta del Ciabattino è priva di arbusti, quindi perfetta per allestire il campo di misura.

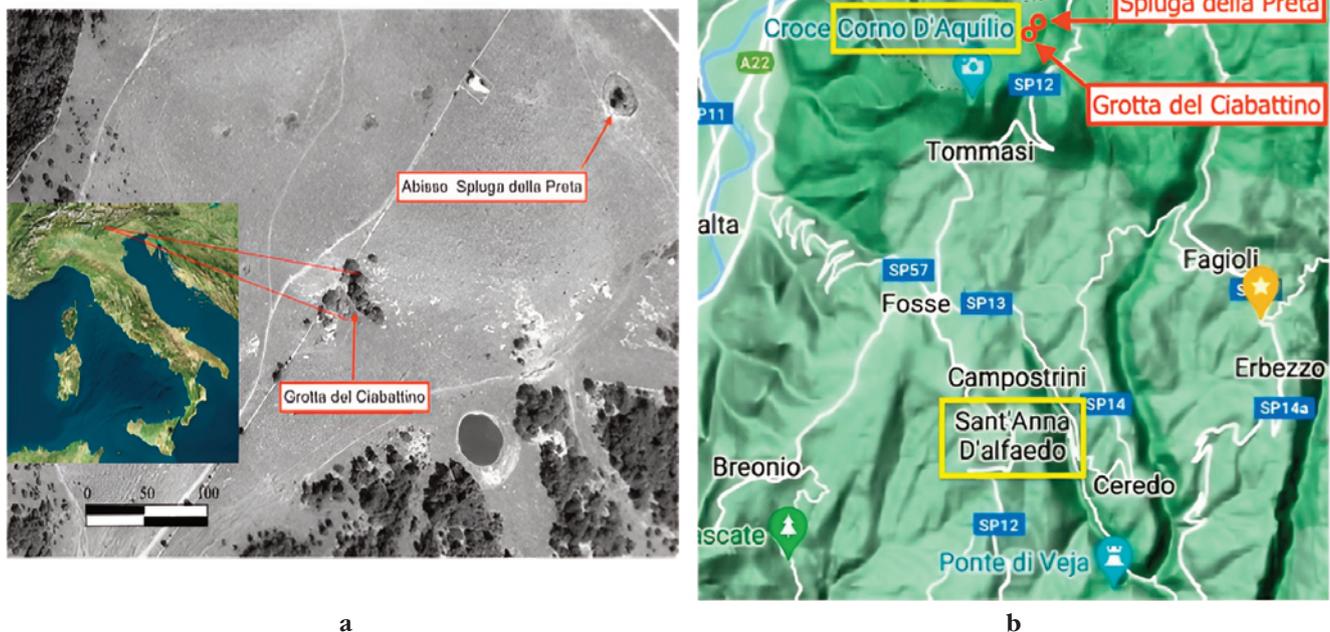


Fig. 1 – Ortofoto delle aree geografiche: (a) Google Earth ;(b) Google Maps

*Orthophotos of geographical areas: (a) Google Earth; (b) Google Maps (modified Marastoni 2023)*

Grotta del Ciabattino:	numero catastale (cadastral number)	V-VR-0081:	45.67653° (N)	10.948254° (E)
Spluga della Preta:	numero catastale (cadastral number)	V-VR-0001:	45.678085° (N)	10.951867° (E)
Corno d'Aquilio			45.671456° (N)	10.943048° (E)
Sant'Anna d'Alfaedo			45.615172° (N)	10.959558° (E)

2. INQUADRAMENTO STRUTTURALE, GEOLOGICO E GEOGRAFICO DELLA GROTTA DEL CIABATTINO

La Grotta del Ciabattino è situata sulla sommità dei Monti Lessini occidentali e precisamente sul rilievo denominato Corno d'Aquilio, in località Fosse nel comune di Sant'Anna d'Alfaedo (Verona, Italia) (Figura 1a–b).

La struttura del Corno d'Aquilio è caratterizzata da un'ampia piega anticlinale, asimmetrica vergente a sud, formata durante la fase compressiva del Neogene (Artoni, Rebesco, 1990), che a causa della sua forma viene denominata "Corno".

I Monti Lessini sono situati nella fascia prealpina

nel settore più meridionale delle Alpi e sono formati da una serie di strutture plicative con sovrascorrimento SSE (Zampieri, Massironi, 2007).

Queste strutture compressive si sono sviluppate a partire dal Neogene coinvolgendo una fitta successione stratigrafica carbonatica che va dal Triassico al Cretaceo ed è nota come "Piattaforma di Trento" (Bosellini *et al.*, 1967).

A nord del Corno d'Aquilio una faglia sub-verticale, immergente a NE, con un rigetto verticale di molti metri, forma un'area depressa dove si trovano le grotte del "Ciabattino" e della "Spluga della Preta" (Figura 2a–b). Nell'area della Grotta del Ciabattino i sistemi preferenziali di frattura sono orientati W-E e

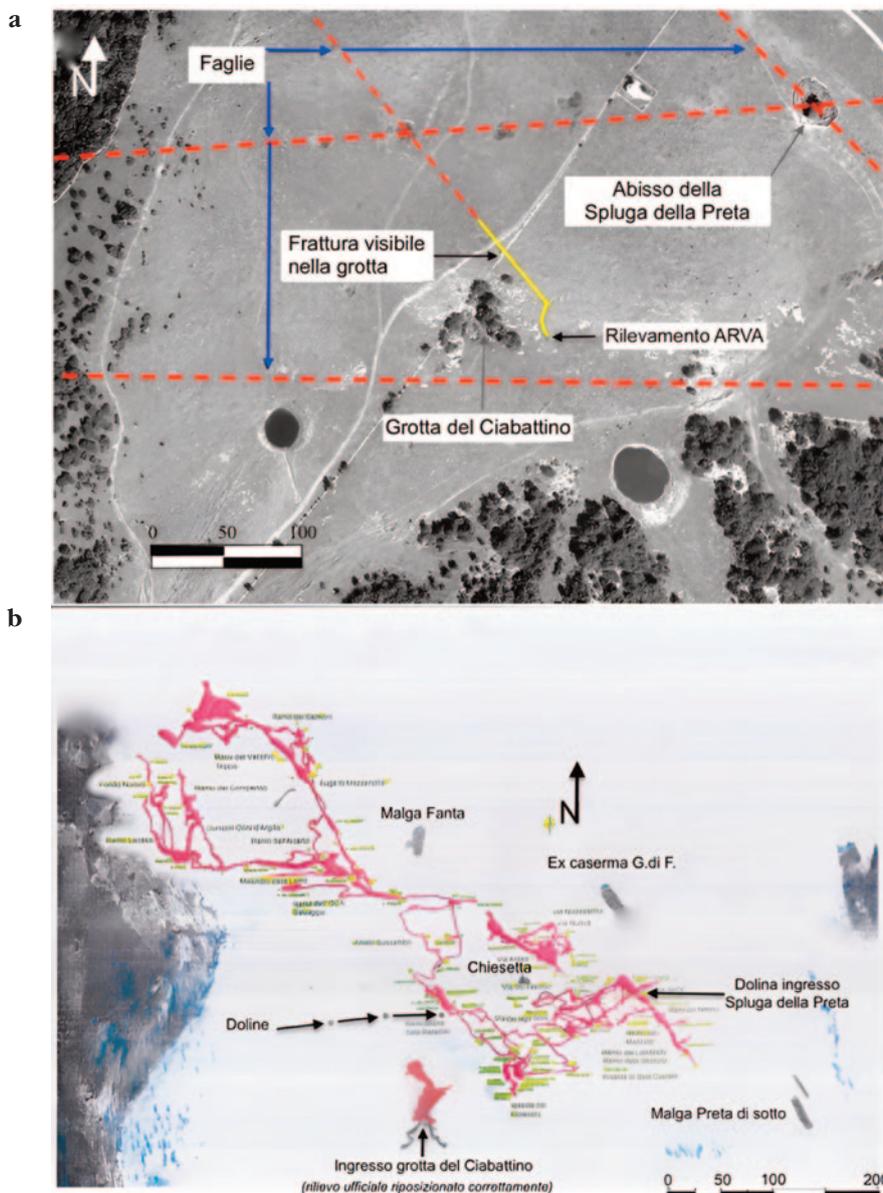


Fig. 2 – (a) Ortofoto (Bing) dell'areale Grotta del Ciabattino e Spluga della Preta con faglie note; (b) planimetrie ufficiali delle grotte (Google Earth) (a) Orthophoto (Bing) of the Grotta del Ciabattino and Spluga della Preta areas with known faults; (b) official cave plans (Google Earth, modified Marastoni 2023)

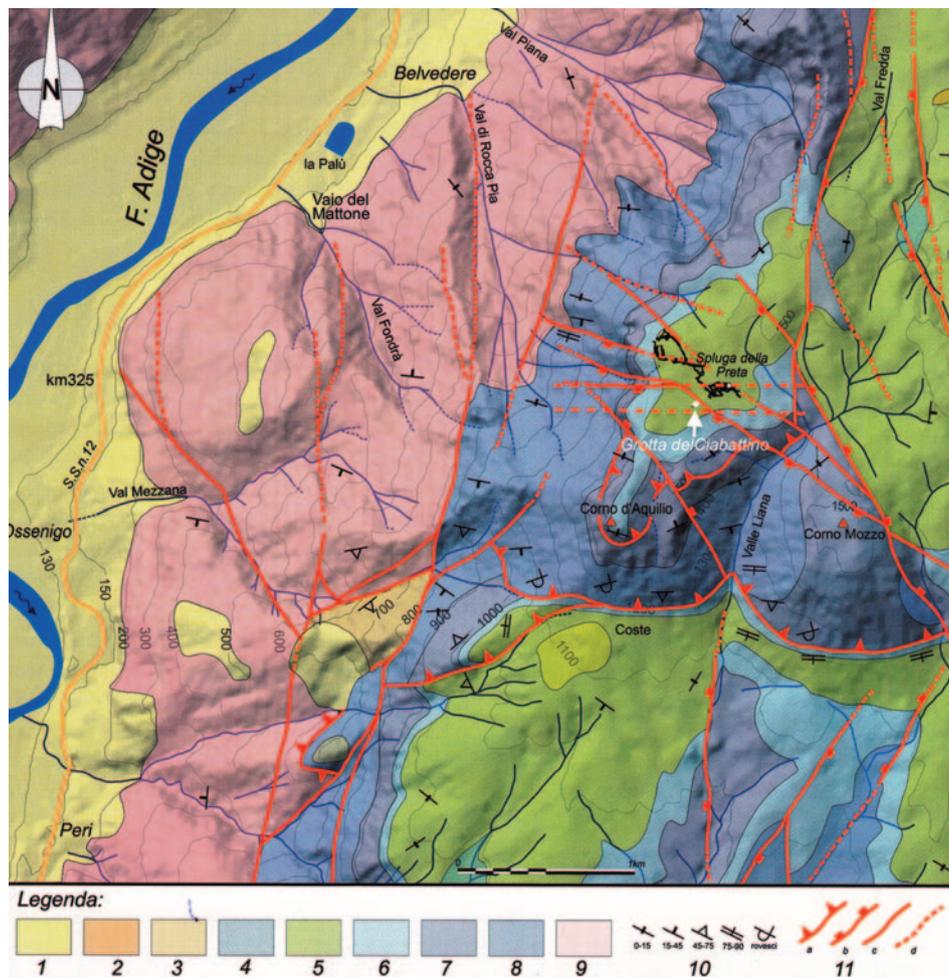


Fig. 3 – Carta geologica dell'area di ricerca. Legenda: 1-Depositi detritici, alluvionali e morenici del Quaternario; 2-Depositi calcarei dell'Eocene; 3-Vulcaniti (Paleogene); 4-Scaglia Rossa (Cretaceo Sup.); 5-Calcare Maiolica (Cretaceo inf.); 6-Rosso Ammonitico Veronese (Giurassico sup.); 7-Gruppo di S.Vigilio (Giurassico Medio); 8-Calcarei Grigi di Noriglio (Giurassico inf.); 9-Dolomia Principale (Trias); 10-giacitura degli strati con classi di inclinazione; 11- a-sovrascorrimenti (i triangoli indicano la parte sovrascorsa); b-faglie dirette (i quadrati indicano la parte ribassata); c-faglie trascorrenti; d-faglie incerte  
*Geological map of the research area. Legend: 1-Detrital, alluvial and morainic deposits of the Quaternary; 2-Eocene calcareous deposits; 3-Vulcanites (Paleogene); 4-Scaglia Rossa (Sup. Cretaceous); 5-Majolica Limestone (Lower Cretaceous); 6-Rosso Ammonitico Veronese (Upper Jurassic); 7-Group of S. Vigilio (Middle Jurassic); 8-Gray Limestones of Noriglio (Lower Jurassic); 9-Dolomia Principale (Trias); 10-arrangement of layers with inclination classes; 11- a-overthrust (the triangles indicate the overthrust part); b-direct faults (the squares indicate the lowered part); c-slip faults; d-uncertain faults (Menichetti et al., 2011; modified after Agostini, Marastoni 2023)*

subordinatamente NW-SE al di sopra di uno dei quali sono stati eseguiti i sondaggi geoelettrici descritti in questo lavoro.

Le formazioni litologiche affioranti nell'area d'indagine sono: Maiolica, un calcare micritico bianco (Cretaceo) con selce in noduli di colore variabile, da rosato, grigio o nero; il Rosso Ammonitico Veronese (RAV) è suddiviso in tre membri (inferiore, medio e superiore) ed è tradizionalmente definito, come calcare condensato, pelagico, rosso, nodulare dove la

litologia presenta noduli chiaro-rossastri inglobati in una matrice marnosa ancora più rossastra, argillosa, formata prevalentemente da *facies* condensate.

Nella cavità si possono osservare due dei tre membri del RAV: quello superiore che è caratterizzato da numerosissimi fossili guida chiaramente visibili sul letto di questa formazione e quello medio costituita da calcare selcioso a strati sottili – formazione di Fonza datato Giurassico medio-superiore – (Menichetti et al., 2011; Martire et al., 2006) (Figura 3).

La grotta oggetto delle nostre ricerche è una cavità di limitata estensione e sviluppo orizzontale, a quota 1467 m s.l.m. Il suo ingresso si trova a circa 250 metri circa a sud-ovest dalla famosa Spluga della Preta (quota 1485 m s.l.m.). Questo abisso, esplorato negli anni Venti del secolo scorso, è stato considerato per moltissimi anni la grotta più profonda del pianeta e una delle più difficili da percorrere (Troncon *et al.*, 2011). Ora è declassata al 161° posto nella classifica mondiale di profondità (fonte web), ma con i suoi 877 m di profondità e 7 km di sviluppo spaziale, resta una cavità mitica che a tutt'oggi attira schiere di speleologi da tutto il mondo.

La Grotta del Ciabattino, nel primo salone, si sviluppa nella formazione superiore del Rosso Ammonitico Veronese, mentre la galleria finale, con orientamento NW-SE, risulta interamente scavata nella formazione intermedia (Fonzaso).

Lo sviluppo complessivo della parte esplorata è di circa 250 m con un'altezza media di circa 6/8 m nel primo vano, e di circa 4 m nel secondo. La cavità è stata modificata dai fenomeni di collasso riscontrabili sul fondo della prima parte della grotta costituita per lo più da RAV superiore (Figura 4).

### 3. MATERIALI E METODI

Come accennato in sintesi, per questa ricerca si è scelto un rilievo di tipo geoelettrico con inversione tomografica (ERT) e, nel caso in esame, un misuratore di georesistività della Micromed s.r.l. modello ELECTRA in configurazione *Wenner*, con matrice geometrica come da tabella seguente con i relativi parametri di acquisizione e la posizione dei rilievi (Figura 5).

Di seguito i dettagli relativi ai parametri di acquisizione e alla localizzazione dei rilievi.

La localizzazione dell'area di indagine è stata predisposta dopo un meticoloso lavoro di campagna, individuando alcuni capisaldi nodali all'interno della grotta, per poi riposizionarli sui rispettivi lati della poligonale chiusa (interna-esterna) sulle stesse verticali (Marastoni *et al.*, 1993) (Figura 6). Questo metodo mirava a predisporre il campo di misura (*array*) in maniera tale da investire in toto, con il campo elettrico generato dal georesistivimetro, quella parte di grotta ritenuta più interessante, ovvero il cunicolo-laminatoio compreso tra il letto del RAV Superiore e i sedimenti di riempimento sottostanti; uno spazio di

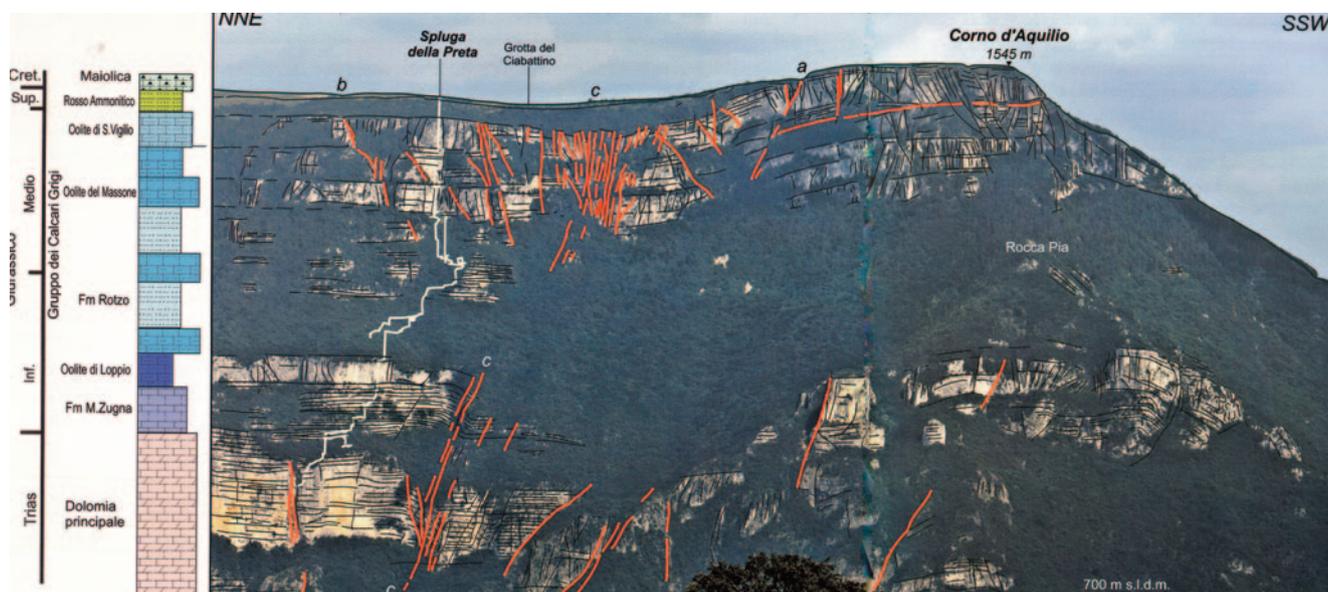


Fig. 4 – Foto del versante occidentale del Corno d'Aquilio, allineato con la sequenza stratigrafica lungo la Valle dell'Adige. In rosso sono evidenziate le faglie e le fratture più importanti: a) Faglia Val Liana, b) Faglia Preta di Sotto, c) Faglia Torre Azzurra. Il profilo della Spluga della Preta (in bianco) è stato proiettato parallelamente alla battuta del fianco della valle (Troncon *et al.*, 2011)

*Photo of the western slope of the Corno d'Aquilio, aligned with the stratigraphic sequence along the Adige Valley. Faults and fractures are highlighted in red: a) Val Liana fault, b) Preta di Sotto fault, c) Torre Azzurra fault. The profile of Spluga della Preta (in white) was projected parallel to the valley side (Troncon *et al.*, 2011)*

**a**

Nome Linea	N° elettrodi	Interdistanza degli elettrodi [m]	Lunghezza [m]
Linea Geo-elettrica 2D - ELE 1	72	5,0 m	355,0 m
Linea Geo-elettrica 2D - ELE 1	72	5,0 m	355,0 m
Linea Geo-elettrica 2D - ELE 1	72	5,0 m	355,0 m
Linea Geo-elettrica 2D - ELE 1	66	5,0 m	325,0 m

**b**

Linea 1 elettrodo n° 1	- 45.678542°	Lat. N - 10,947969°	Long. E, quota 1478
Linea 1 elettrodo n° 72	- 45.676085°	Lat. N - 10,950886°	Long. E, quota 1464
Linea 2 elettrodo n° 1	- 45.678517°	Lat. N - 10,947828°	Long. E, quota 1478
Linea 2 elettrodo n° 72	- 45.676056°	Lat. N - 10,950837°	Long. E, quota 1464
Linea 3 elettrodo n° 1	- 45.678490°	Lat. N - 10,947883°	Long. E, quota 1478
Linea 3 elettrodo n° 72	- 45.676028°	Lat. N - 10,950784°	Long. E, quota 1464
Linea 4 elettrodo n° 1	- 45.678460°	Lat. N - 10,947832°	Long. E, quota 1478
Linea 4 elettrodo n° 66	- 45.676204°	Lat. N - 10,950488°	Long. E, quota 1467

Fig. 5 – (a) Tabella array geometrico. (b) Coordinate x y z degli elettrodi all'inizio e alla fine dell'array riportate in gradi decimali secondo la posizione standard WGS84

(a) Geometric array table. (b) x y z coordinates of the electrodes at the start and at the end of the array reported in decimal degrees according to the WGS84 standard position (Studiosisma)

circa 50 cm di altezza per circa 10 m di larghezza con orientamento NW.

Come noto, la tecnica di *imaging* elettrico (o tomografia elettrica) adotta una procedura automatizzata sia di acquisizione che di elaborazione e consente la raccolta di dati elettrici del sottosuolo ad alta densità mediante cavi ultraleggeri collegati a moduli con doppia funzione: corrente di ingresso e ricezione del segnale, amplificandolo e digitalizzandolo direttamente agli elettrodi con spaziatura interelettrodica variabile (generalmente da 1-2 m a 10). Nel nostro caso abbiamo impostato una spaziatura di 5 metri sia interelettrodo che tra le 4 linee di diffusione.

L'unità di misura era costituita da un georesistivimetro (Electra) assistito da un *computer* che mediante un *software* dedicato (*Res2Dinv v4.01*) gestisce la configurazione geometrica e la sequenza del grande numero di letture che sono state effettuate in tempi brevi considerando il modello di apparato.

Gli elettrodi da controllare erano 72 per 3 linee (da NE a SO 1°, 2°, 3°); e la linea 4 più corta (66 elettrodi) per via della pozza d'acqua di abbeveramento bestiame a SE. Il rilievo consisteva nel posizionare gli

elettrodi nel terreno secondo *arrays* 2D, quindi nell'effettuare il collegamento ai *take-out* dei cavi che portano il segnale (di *input* ed *output*) all'unità di misura.

Dal *software* è stata impostata la configurazione prescelta (*Wenner*) ed i relativi parametri geometrici (passo di misura, numero di misure, e altro). Da considerare che alla fine di ogni 'lancio' di misura associata al dispositivo elettrodico di cui sopra, tutta la linea, lunga 355 m, è stata traslata verso SW di 5 metri e riposizionata dalla linea 1 alla 2 e a seguire la 3 e 4 nel campo di misura già predisposto e picchettato il giorno precedente. Il numero elevato di collaboratori unitamente alle buone condizioni atmosferiche hanno permesso di completare il lavoro di campagna nella stessa giornata, procedura indispensabile per l'ottenimento di un risultato omogeneo e ottimale.

Le misure sono state ciclicamente ripetute fino ad un massimo di 6 volte fino a raggiungere una buona stabilizzazione della lettura in corrente alternata con periodo di misura compreso tra 0,8s e 0,12s con cicli di alcuni secondi; i voltaggi variavano da un minimo di 0,2mV a massimi di 400V mentre l'intensità di corrente variava da minimi di 0,001mA a massimi di 50mA.

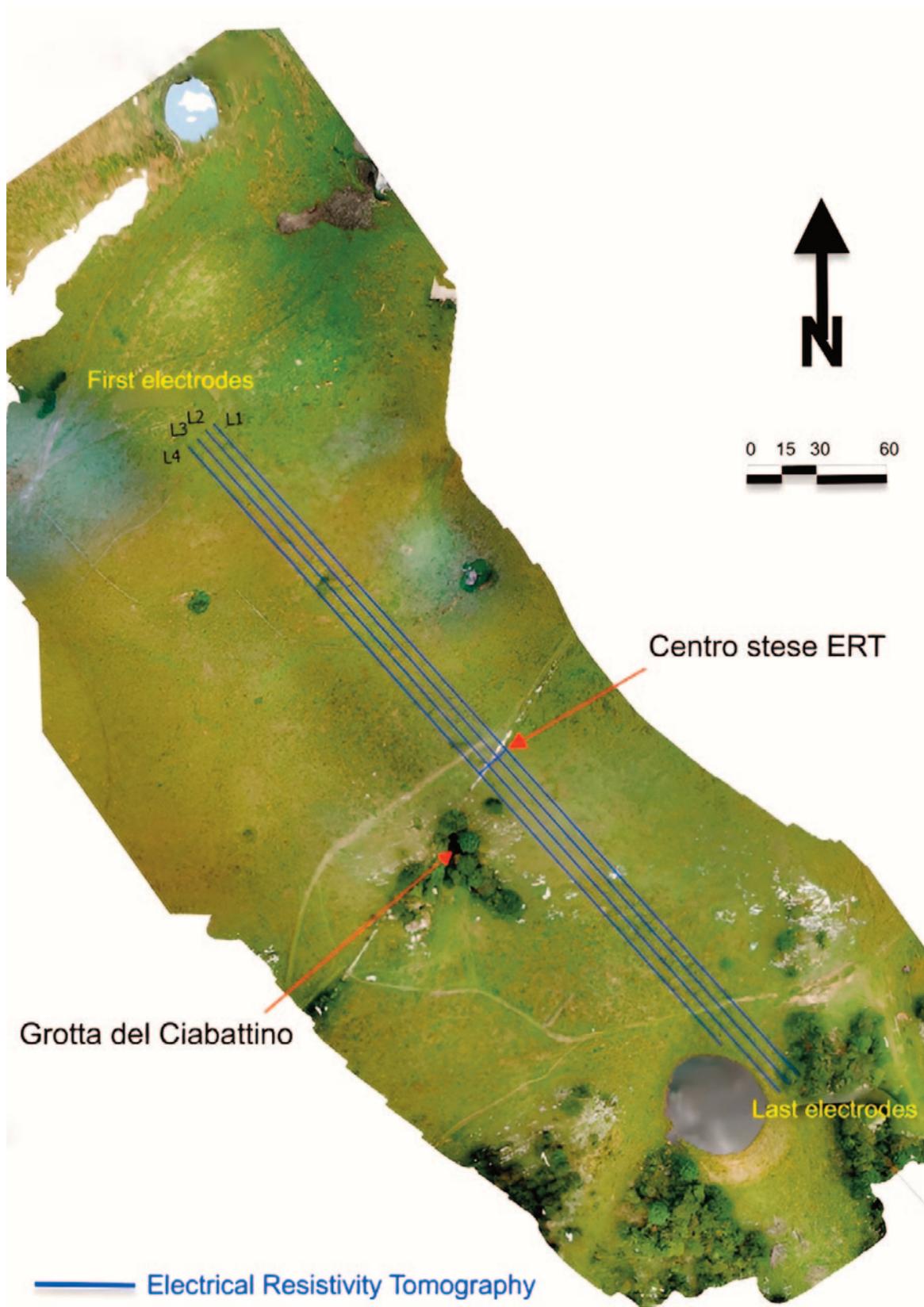


Fig. 6 – Orto immagine con localizzazione array  
*Image ortho with array localization*

Le misure non soddisfacenti sono state comunque salvate nel *data set*, e poi eliminate in sede di analisi. Come è noto, per ottenere una densità di valori idonea alla costruzione di una pseudo sezione di resistività è necessario che il passo di misura non superi la distanza interelettroda.

Il primo risultato dell'analisi è stato costituito, appunto, da una pseudo sezione che era solo rappresentativa della sezione reale. Ritraeva, infatti, l'andamento della resistività apparente, una specie di valore mediato, con la pseudo profondità, calcolata con semplici considerazioni geometriche.

Ogni misura veniva posta convenzionalmente al centro del quadripolo attivo ed alla pseudo profondità che gli competeva.

I dati acquisiti in campagna sono stati rappresentati secondo pseudo sezioni (2D) e sono stati successivamente elaborati per risalire alla elettro-stratigrafia

reale (resistività vera) del volume indagato che si è ottenuto utilizzando la tecnica di inversione.

Nelle indagini geoelettriche è altrettanto noto che è possibile scegliere diversi tipi di configurazioni in base a criteri che considerano, ad esempio, il tipo di *target* da individuare, la profondità massima da raggiungere o la sensibilità delle misurazioni condotte, pertanto nel progetto di indagine ci siamo attenuti a questo criterio di base.

#### 4. RISULTATI ARRAY WENNER

Dall'analisi dei dati ottenuti è stato possibile accertare una buona corrispondenza dei valori di resistività in tutte le misure effettuate, restituendo così un modello elettrostratigrafico del sottosuolo abbastanza robusto ed affidabile (Figura 7a-b).

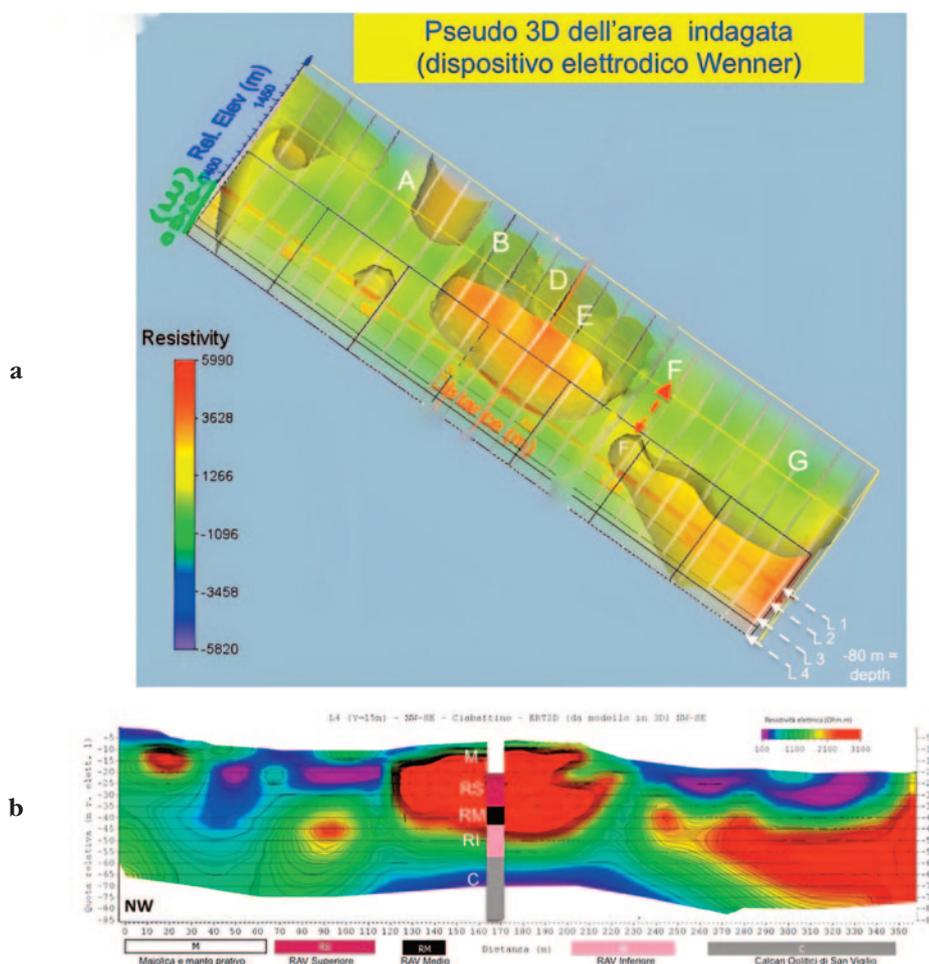


Fig. 7 – (a) Voxler 3D modeling software; (b) Colonna stratigrafica della Grotta del Ciabattino, linea 4  
(a) Voxler 3D modeling software; (b) stratigraphic column of the Ciabattino Cave, line 4

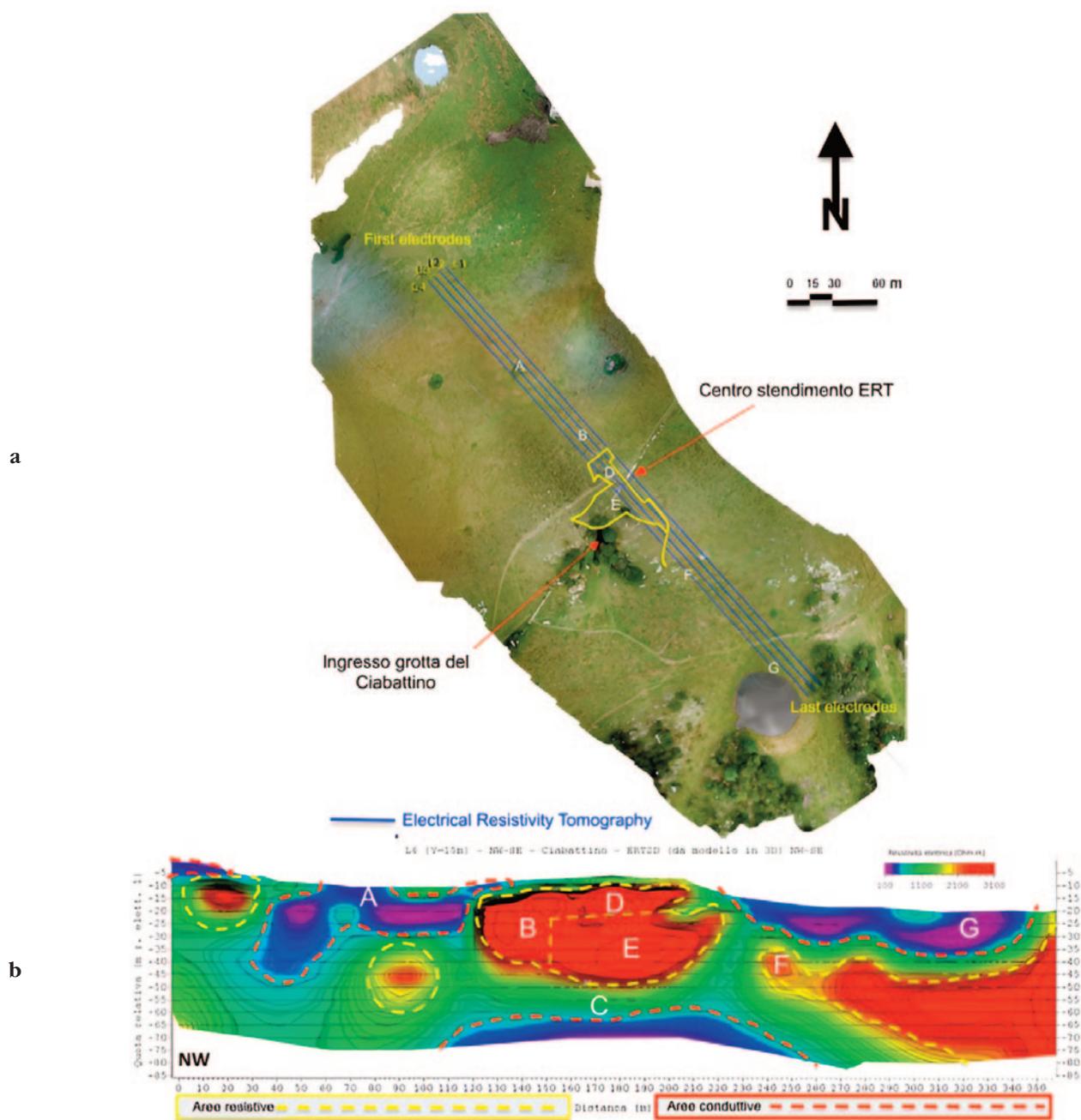


Fig. 8 – (a) Ortofoto con sovrapposizione della Grotta del Ciabattino, le stese ERT e le dislocazioni delle lacune morfologiche sotterranee. (b) Sezione interpretativa ERT: A – Dolina allineata sulla faglia est-ovest: Spulga della Preta – Val d’Adige; B – Zona sconosciuta sotto un’area di doline; C – Bedrock (RAV formazione inferiore – Calcari Oolitici di San Vigilio); D – Zona di faglia dal letto della formazione RAV superiore; E – Parte nota della Grotta del Ciabattino; F – Zona obiettivo esplorativo; G – Area lacustre visibile in ortofoto

(a) Orthophoto with drawn the Ciabattino Cave, the ERT laying and the location of the underground morphological gaps. (b) ERT interpretation section: A – Sinkhole aligned on the east-west fault: Spulga della Preta – Val d’Adige; B – Unknown area under an area of sinkholes; C – Bedrock (lower RAV formation – Oolitic Limestones of San Vigilio); D – Fault zone from the bed of the upper RAV formation; E – Known part of the Ciabattino Cave; F – Exploratory target area; G – Lake area visible in orthophotos

L'osservazione diretta ha permesso di tracciare una stratigrafia attendibile tra le progressive 164–170 della posa elettrica. Informazioni analoghe sugli spessori della Maiolica, RAV superiore, medio, inferiore e Calcari Oolitici di San Vigilio si ricavano anche dal vicino abisso Spluga della Preta (Figura 8a–b).

L'attenta osservazione e analisi delle restituzioni grafiche (*Surfer11* della Golden Software) evidenziano chiaramente lacune simili – per gradienti di resistenza specifica – alla Grotta del Ciabattino E. Infatti B, D, F e la vasta area a SE possono essere associate alle parti note della cavità citata. L'interpretazione data è anche frutto di una buona conoscenza dell'area sovrastante il geosito, delle sue caratteristiche morfologiche di superficie e delle peculiarità antropiche che la caratterizzano (Figure 9 e 10).

RESISTIVITÀ ELETTRICA IN SEZIONI VERTICALI OTTENUTE DAL MODELLO 3D (DISPOSITIVO WENNER ALFA DEVICE)  
(Tutte le quote si riferiscono all'elettrodo n°1 del profilo della Linea 1)

L1: prima sezione (Figura 9 L1), da NW progressivo 0–62 (a-c) è presente un'ampia area fortemente resistiva con un gradiente  $\rho = 4 \text{ K}\Omega/\text{m}$  per uno spessore di  $20 \approx$  alla progressiva 0.

Alla progressiva 54 ( $\Delta -20\text{m}$ ) la zona resistiva ha uno spessore di  $10\text{m} \approx$ . Sempre in corrispondenza di quest'ultima compare una sottostante zona idratata e conduttiva  $\rho = 500 \text{ }\Omega/\text{m}$  per uno spessore di  $20\text{m} \approx$  tra 35 e 65m di profondità ( $\Delta -45\text{m}$ ).

In corrispondenza dell'area delle doline, in ambienti sotterranei fortemente carsici, progressive 34–270 (b-h), sono presenti notevoli depositi di elementi intrusivi altamente idratati ubicati a varie profondità fino a oltrepassare il *bedrock* e depositarsi nei vuoti sottostanti la parte nota della Grotta del Ciabattino; nelle formazioni del RAV, dei calcari Oolitici di San Vigilio e oltre.

Questi depositi, di natura ancora non ben definita, sono oggetto di studio. Dalla progressiva 126–220 (d-e) si evidenzia una zona resistiva a varie profondità in un'area sconosciuta della cavità. Si può ragionevolmente supporre che qui, il campo elettrico, abbia parzialmente investito la faglia.

Dalle progressioni 220–355 (f-l) è visibile un'ampia superficie altamente idratata e conduttiva (range di gradiente  $\rho = 200/400 \text{ }\Omega/\text{m}$ ) in corrispondenza di una superficie lacustre.

Infine, dai progressivi 294–355 (i-l) si evidenzia un'ampia area resistiva che raggiunge il gradiente

massimo  $\rho = 2,6 \text{ K}\Omega/\text{m}$  in corrispondenza dell'ultima progressiva, fino alla profondità di  $70\text{m} \approx$  (Figura 9 L4 – Figura 10 punto G-55,-60).

L'evoluzione geomorfologica mostrata nei ripristini grafici inerenti le quattro linee evidenziano un progressivo aumento della resistività complessiva, soprattutto nella linea 4; quella più vicina alla faglia E-W che caratterizza la cosiddetta conca del Ciabattino

Di notevole importanza è l'inizio della parte resistiva al progressivo 240 ( $\omega$ ) nella quarta sezione (L4). Corrisponde al punto di arrivo più vicino delle indagini dirette (dicembre 2022); esplorazione speleologica, tesa a raggiungere il presumibile vuoto sottostante.

L'aumento dei gradienti di resistività, chiaramente visibile dai rilievi grafici, è dovuto all'aumento verso SW dei volumi noti della Grotta del Ciabattino; cioè quell'area investita in pieno dal campo elettrico.

Per quanto riguarda le aree conduttive, non si riscontrano grosse differenze di resistività a SE, mentre c'è una diminuzione a NW a media profondità.

Le masse altamente idratate oltre il *bedrock*, sono quasi identiche in tutte le sezioni.

RESISTIVITÀ ELETTRICA IN SEZIONI ORIZZONTALI DEL MODELLO 3D (DISPOSITIVO WENNER ALFA)

Le sezioni seguenti orizzontali (*slices*) sono relative all'altezza del primo elettrodo del profilo 1 di L1, quindi sono quote relative. Le lunghezze delle prime 2 sezioni sono inferiori rispetto al resto delle sezioni a causa della topografia superficiale. Le sezioni mostrate nelle grafiche sono:

-10m, -15m, -20m, -25m, -30m, -35m, -40, -45m,  
-55m, -60m

## 5. DISCUSSIONE

Dall'attento studio delle sezioni ERT, dalla morfologia della grotta nell'area considerata – meandro intasato di depositi alluvionali impostato in faglia – la scelta operativa volta al raggiungimento del vuoto è stata obbligata. Abbiamo creato un varco a seguito di un duro lavoro di disostruzione, iniziando dalla progressiva 210 dello stendimento ERT in prossimità della Linea 3 (Fig. 11; 12; 13) dopo avere superato una bassa strettoia a *laminatoio* di una decina di metri alla quota di -32m in riferimento all'elettrodo n° 1 della linea 1 e a -22m dalla superficie. In seguito abbiamo rilevato un punto chiave planimetrico di su-

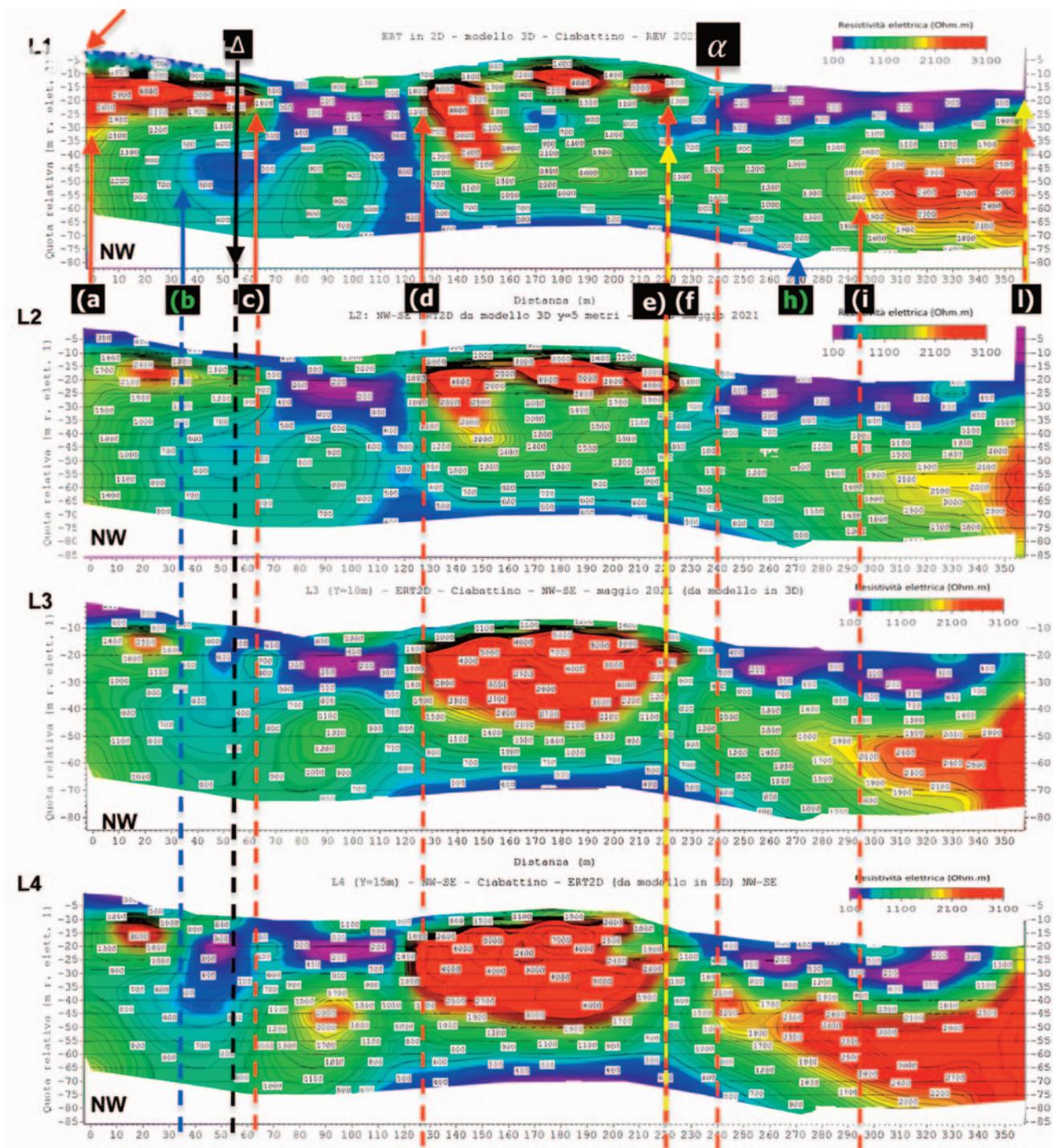


Fig. 9 – Sezioni verticali del modello 3D (Wenner alpha device) relative alle linee 1, 2, 3  
 Vertical sections of the 3D model (Wenner alpha device) relating to lines 1, 2, 3, 4

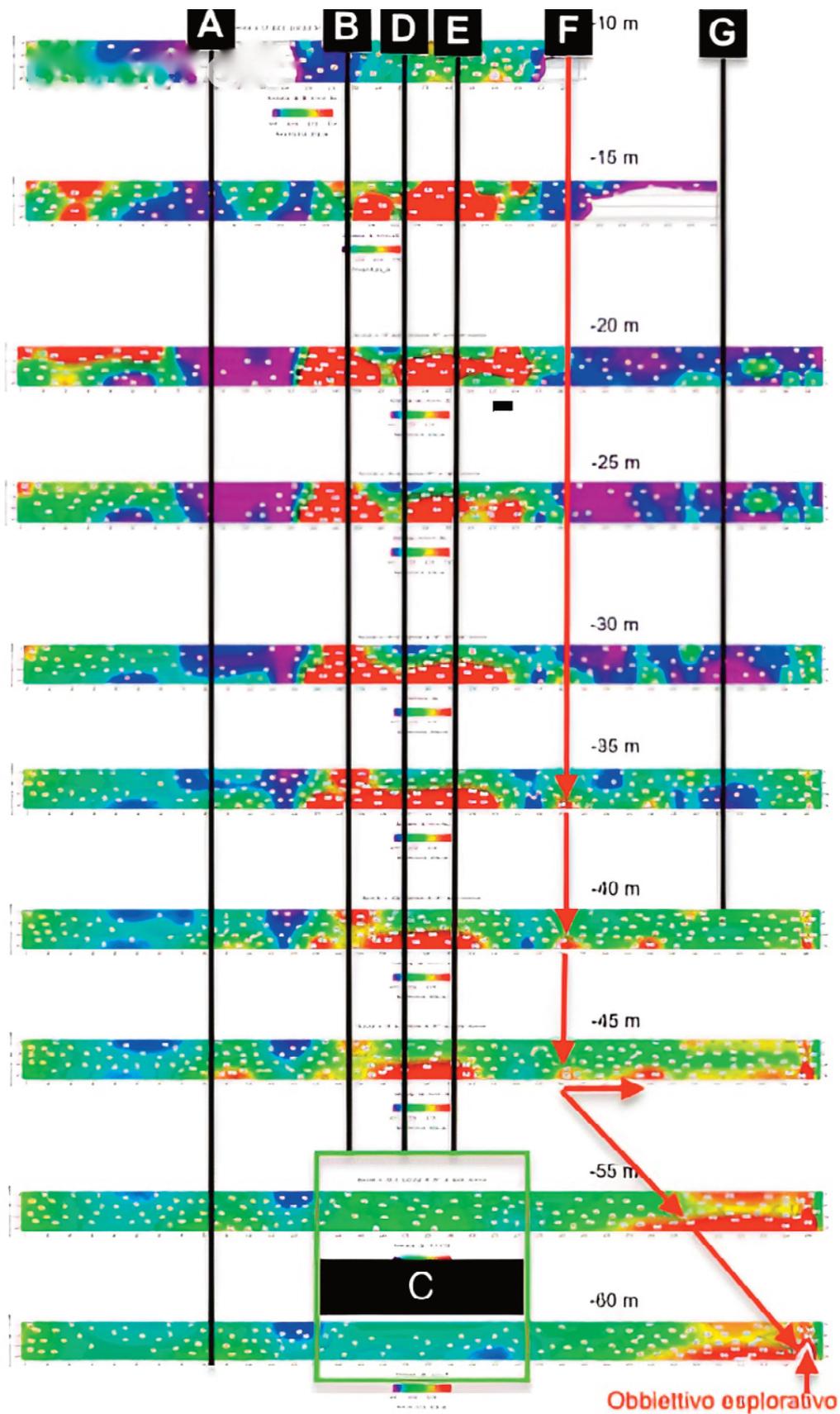


Fig. 10 -Sezioni plantari  
*Plantar sections*  
(slices)

perficie corrispondente a un punto noto all'interno della cavità esplorata, punto molto vicino al vuoto presunto sulla verticale: progressiva 236.

Ciò è stato reso possibile mediante l'utilizzo del noto dispositivo di ricerca travolti in valanga ARVA (Fitre). La profondità non eccessiva unita alla conformazione del meandro posto sulla frattura e piuttosto vuoto verso l'alto ha consentito il posizionamento dell'apparato di trasmissione in posizione ottimale, tale che il rilevamento ottenuto (trasmissione in grotta, ricezione all'esterno) risultasse molto affidabile.

Come si vede chiaramente dalla planimetria – *zoom slice* a -30 rispetto alla L1 elettrodo 1 – la svolta decisiva della frattura a Sud di  $54^\circ$  rispetto alla faglia visibile nell'ampia galleria della grotta con azimut di  $138^\circ$  concorda con la direzione degli stendimenti ERT, quindi nel punto di massima esplorazione, la reale visione grafica della situazione è preclusa poiché resta al di fuori dal campo di indagine geoelettrica.

L'immagine precedente evidenzia una parte limitata del campo di misura, il rilievo schematico della grotta e il punto di rilevamento ARVA (estremo esplorativo raggiunto finora), il tutto sovrapposto a ortofoto.

Da tale immagine si evince chiaramente che il campo elettrico generato dal georesistivimetro ha investito solo parzialmente la cavità, principalmente le Linee 3 e 4. Infatti le sezioni 1 e 2 riportate in grafica evidenziano solo parzialmente alti livelli di resistività più accentuati nelle parti alte in prossimità della faglia che si proietta verso l'alto inclinata a NE con immersione SW.

Pertanto l'analisi dei dati si deve focalizzare sulle linee 3 e 4, dove una parte notevole della nuova prosecuzione si colloca fuori campo, e quindi deve intendersi traslata di  $8\text{ m} \approx$  verso SW ortogonalmente alla linea 4.

Da un'attenta osservazione delle sezioni verticali si può dedurre un aumento di resistività molto elevata sia in relazione alle progressive verso SE, sia ortogonalmente alle quattro catene di stendimento in NE direzione SW e, per quanto di nostro interesse principale, dalla progressiva 240 alla 355 esima.

Altrettanto informativo è lo studio delle fette (*slices*), dove l'aumento dei gradienti di resistenza specifica sono chiari e confermativi ai processi di inversione. Essi restituiscono i valori di profondità, ben documentati dalle grafiche.

Allo stato attuale delle nostre conoscenze, la frattura in esame (esplorazione) sembrerebbe intersecare in maniera decisa e quasi ortogonale una delle principali faglie del massiccio carbonatico del Corno d'Aquilio.

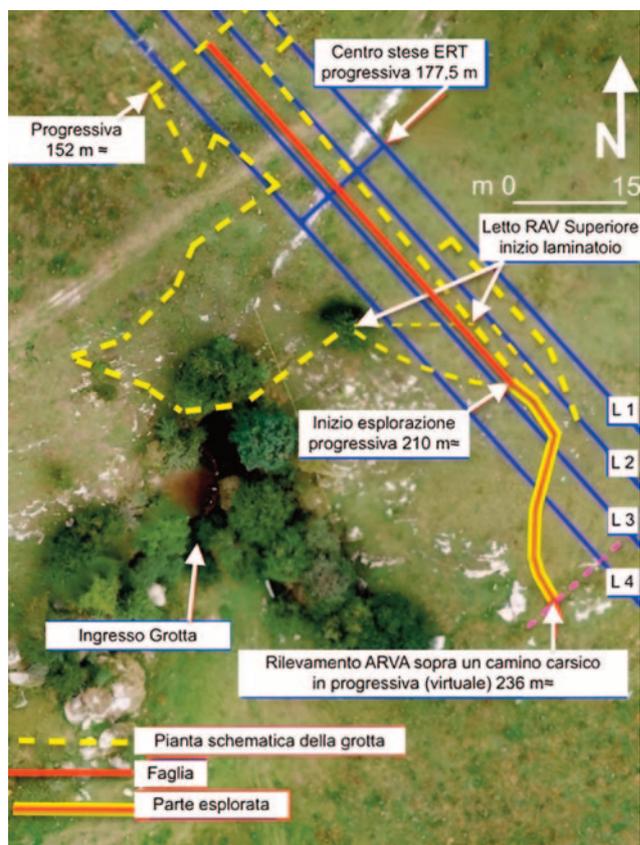


Fig. 11 – Array ERT con rilievo schematico della Grotta del Ciabattino  
ERT array with schematic survey of the Ciabattino Cave

Si potrebbe ipotizzare la presenza di un vasto e profondo Sistema Carsico tale da 'minimizzare' la Spluga della Preta; ridurla a una ramificazione notevole, ma secondaria rispetto al grandioso complesso ipogeo sottostante la conca del Ciabattino.

Le faglie vicarianti nelle formazioni calcaree (tipiche nel *plateau*) che hanno caratterizzato il processo carsico della Spluga della Preta – sviluppo verticale e orizzontale – potrebbero confermare questa ipotesi.

Le figure seguenti si riferiscono alla sezione della linea 4 e una parte macro, con le indicazioni delle progressive di stendimento e il punto estremo della nostra esplorazione (punto ARVA) in relazione al vuoto sottostante, tenendo presente che, dalla progressiva 224, il tracciato di colore bianco non dovrebbe essere prospetticamente rappresentato in quanto fuori *array* (vedi la Figura 12 e la Figura 13).

Un altro risultato molto rilevante ottenuto dalle analisi e dai confronti dell'indagine geofisica con le osservazioni dirette, riguarda la faglia ben visibile all'interno della Grotta del Ciabattino (Figura 15a–b; 16a).

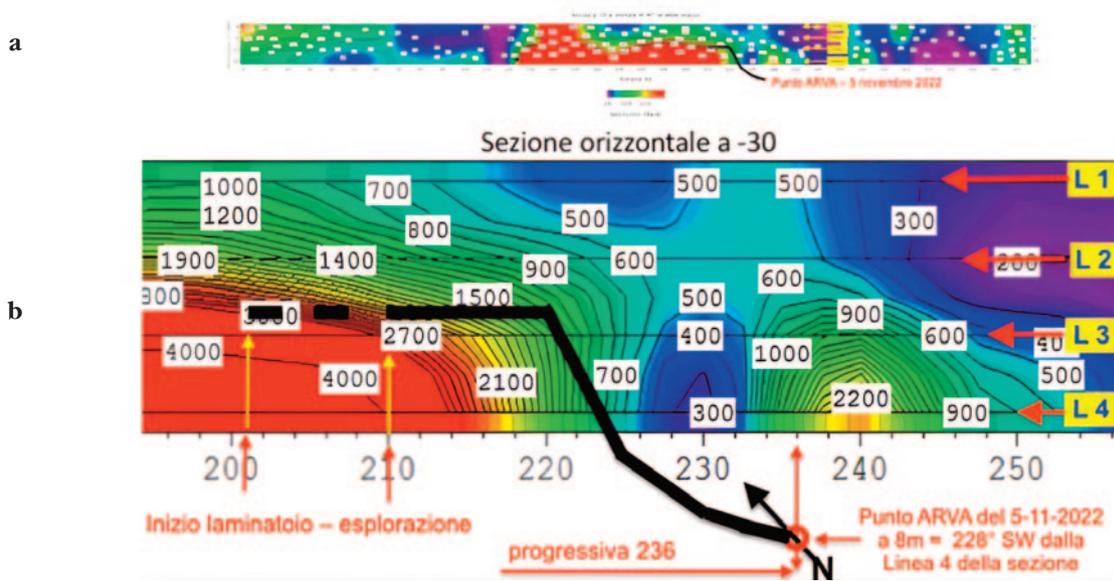


Fig. 12 –(a) Slice a -30m. (b) Particolare della sezione plantare (slice) con il rilievo dell’esplorazione in corso  
 (a) Slice at -30m. (b) Detail of the plantar section (slice) with the survey of the exploration in progress

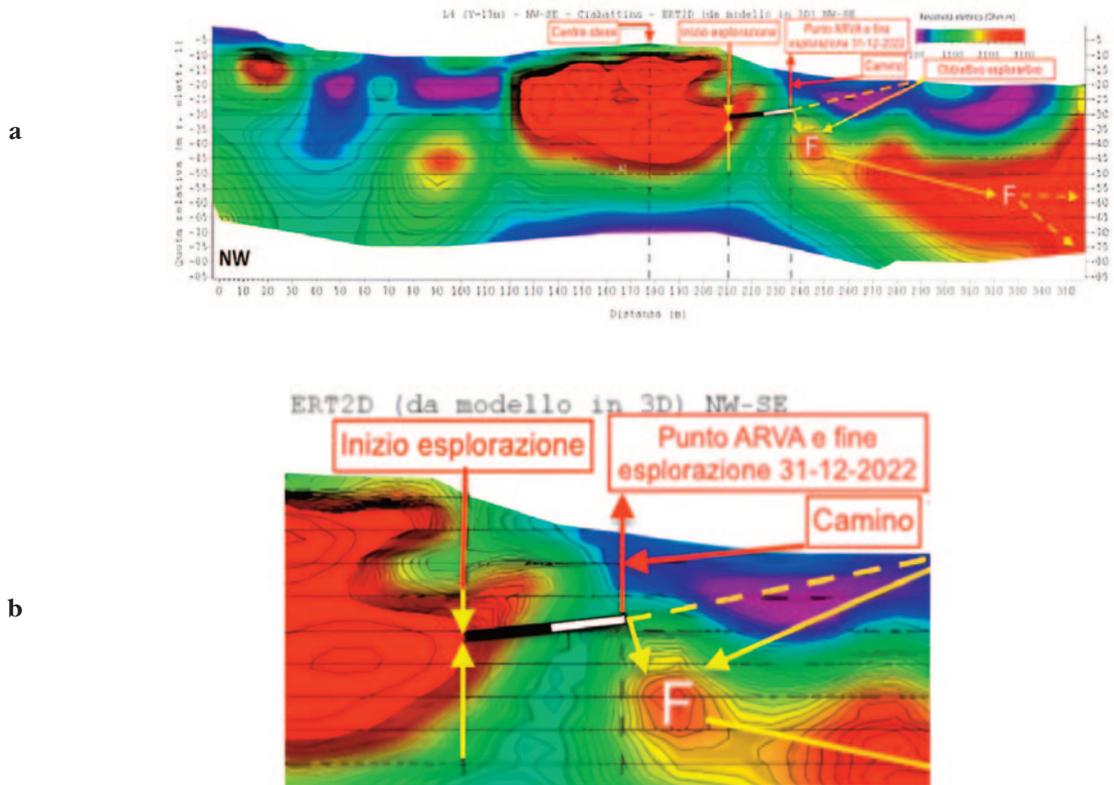


Fig. 13 –(a) Stato dell’esplorazione e obiettivi F. (b) Ingrandimento  
 (a) Exploration status and objectives F. (b) Magnification

Ciò è caratterizzato da alcune caratteristiche tettoniche peculiari attribuibili ad una faglia inversa. Il blocco NE è abbassato e mostra le tipiche striature di ribaltamento compressivo nello specchio rivolto a SW, ma considerando la mancanza di lancio verticale, questa discontinuità appare come una semplice frattura sub-verticale.

Tuttavia, verso SE, tende gradualmente ad allargarsi fino ad oltre 1 metro partendo dalla progressiva 155 alla 240 (85 m). Un altro dato rilevante è rappresentato dal gradino di faglia che raggiunge il suo massimo intorno alla progressiva 180 per poi normalizzarsi completamente nel punto di massima esplorazione speleologica.

Questo andamento anomalo farebbe supporre un collasso dell'ammasso roccioso nella zona centrale della galleria NW-SE, probabilmente dovuto al mancato appoggio del *bedrock* sottostante: RAV inferiore, Calcari Oolitici di San Vigilio in primis e a seguire del Gruppo dei Calcari Grigi (Fugagnoli, 2004; Masetti *et al.*, 2012), litofacies già sottoposte a una fortissima erosione carsica. Questa ipotesi è supportata dall'analisi delle sezioni verticali ERT; infatti è facile osservare come la parte sottostante della grotta, ad una profondità di circa 60 metri, presenti valori di resistività elettrica molto bassi.

Pertanto si può ipotizzare la presenza di tamponature sedimentarie di varia natura, imbevute di acqua meteorica con funzione elettrolitica, che presentano un'ottima conducibilità elettrica.

Osservando le sezioni appare abbastanza evidente che la fase di riempimento ha avuto origine e si è conclusa al termine del processo speleogenetico al di sotto della parte nota della grotta. All'interno della grotta si è generato quello che appare come un grande ventaglio interno di deiezione, recante sulla sommità potenti formazioni clastiche che si sono spostate dalla verticale di qualche metro in seguito al continuo movimento di frana, fino all'interruzione finale, causata dal totale riempimento di sedimenti nel meandro impostato in faglia ora in fase di distruzione.

Dalla natura omogenea del materiale prevalentemente grossolano, con prevalenza di maiolica, emerge che tale frana ha interrotto il deflusso delle acque meteoriche nella grotta grande, assumendo la tipica morfologia di *condotta forzata* sul versante opposto, verso SE.

Dall'analisi dell'ERT sembra ragionevole supporre che questo meandro fosse stato uno degli affluenti dell'enorme massa di materiale altamente conduttivo (limi e sedimenti vari: eluvium-colluviali ed eolici) che giacciono sotto la cavità (60m e oltre) e, come è

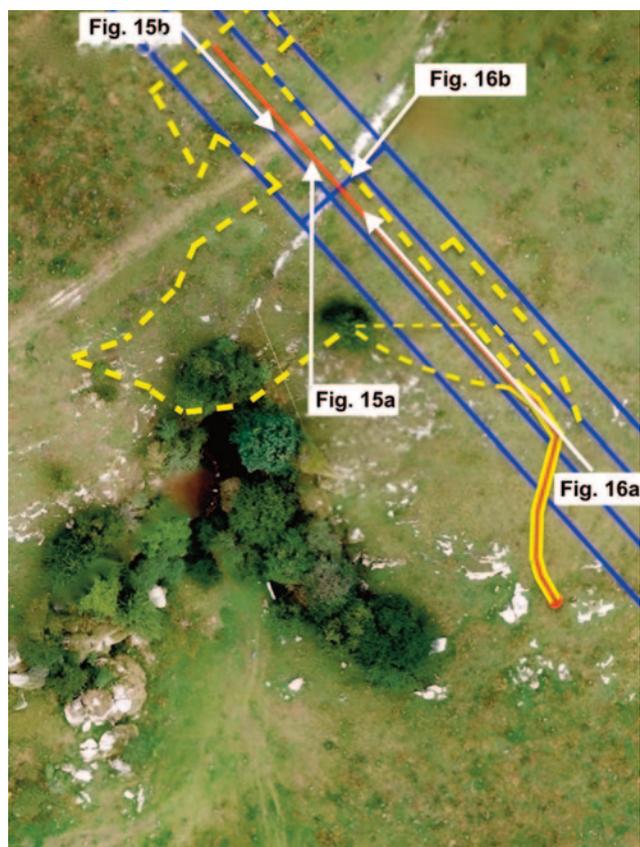


Fig. 14 –Riferimenti fotografici relativi alle Fig. 15a-b; 16a-b  
Photo references relating to Fig. 15a-b; 16a-b

già stato accennato, ben visibili nelle sezioni, infatti, tutti i modelli esaminati mostrano questa anomalia, che si presenta come un enorme riempimento di un vuoto gigantesco al di sotto della cavità nota.

Nell'area in esame all'interno della cavità, la potenza del RAV raggiunge, secondo la letteratura esistente, il suo livello massimo. Infatti la Grotta del Ciabattino, è interamente scavata nella sua formazione media di circa 4 metri.

La grotta si apre con una grande sala le cui dimensioni sono dovute principalmente alla potente azione termoclastica.

## 6. CONCLUSIONI

Per il futuro abbiamo deciso di eseguire ulteriori ricerche: *in primis* proseguire con l'indagine diretta al fine di raggiungere la lacuna più volte indicata nelle figure precedenti e, allo stesso tempo, ottenere una visione realistica del presunto vuoto in relazione alla nostra ultima posizione esplorativa. Pertanto si rende necessaria una ulteriore prospezione geoelettrica.

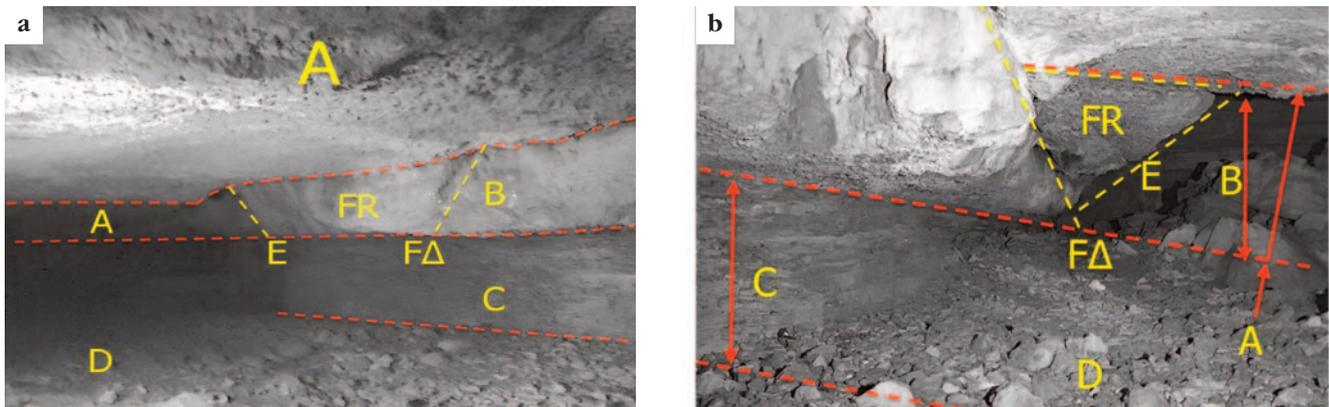


Fig. 15 –Faglia – direzione di acquisizione immagine (a) verso N; (b) verso SE. **AA** – Letto RAV superiore; **B** – Gradino di faglia 1,5 m  $\approx$ ; **C** – Formazione media RAV; **D** – Clasti RAV superiore; **E** – Spigolo irregolare da fratturazione; **FΔ** – Pendenza della superficie di faglia; **FR** – Ammasso roccioso irregolare fratturato e appoggiato sul piano di faglia inversa e sul letto di RAV superiore

*Fault – image acquisition direction (a) towards N; (b) towards SE. AA – RAV Superior bed; B – 1.5 m  $\approx$  fault step; C – RAV median formation; D – Superior RAV roof clastic; E – Irregular edge from fracturing; FΔ – Slope of the fault surface; FR – Irregular rock mass fractured and resting on the fault plane reverse and on the upper rav bed (Image acquisition June 28, 2015 Marastoni, Agostini)*

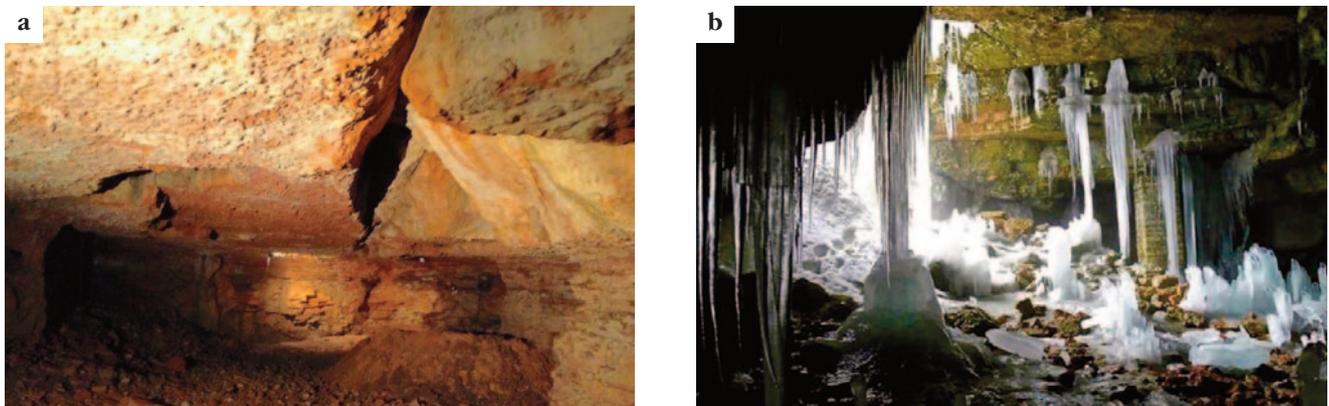


Fig. 16 –Faglia – direzione di acquisizione immagine (a) verso NW; (b) verso SW

*Fault – direction of image acquisition (a) towards NW (June 28, 2015 Marastoni); (b) towards SW (March 18, 2015 Marastoni)*

La scelta di questo metodo d'indagine si giustifica con la nostra esperienza acquisita durante la campagna di misure e di elaborazione dati.

Utilizzeremo gli stessi apparati, semplificando il dispositivo elettrodico al solo *Wenner*. Inoltre il campo di misura già previsto e illustrato qui di seguito, sarà mirato con un array notevolmente inferiore al precedente, sia per motivi di opportunità, che per logistica sul campo (una ulteriore stesa a SW cadrebbe sulla scarpata di ingresso della grotta profonda 11m) (Figura 17).

Tale indagine geofisica, che utilizza le moderne tecnologie per scopi professionali, può essere ugual-

mente finalizzata a diversi obiettivi e, in questo caso, alla ricerca speleologica.

La Grotta del Ciabattino, infatti, si è rivelata un ottimo laboratorio per questo tipo di ricerche, integrando perfettamente le finalità di una classica ricerca speleologica in ambiente sotterraneo, con una indagine indiretta.

Abbiamo evidenziato una struttura carsica molto complessa, prevista dagli studiosi da molti decenni, ma solo dal punto di vista teorico.

Abbiamo sfruttato le condizioni geomorfologiche superficiali straordinariamente favorevoli dell'area prescelta per l'esperimento scientifico, con un ecce-

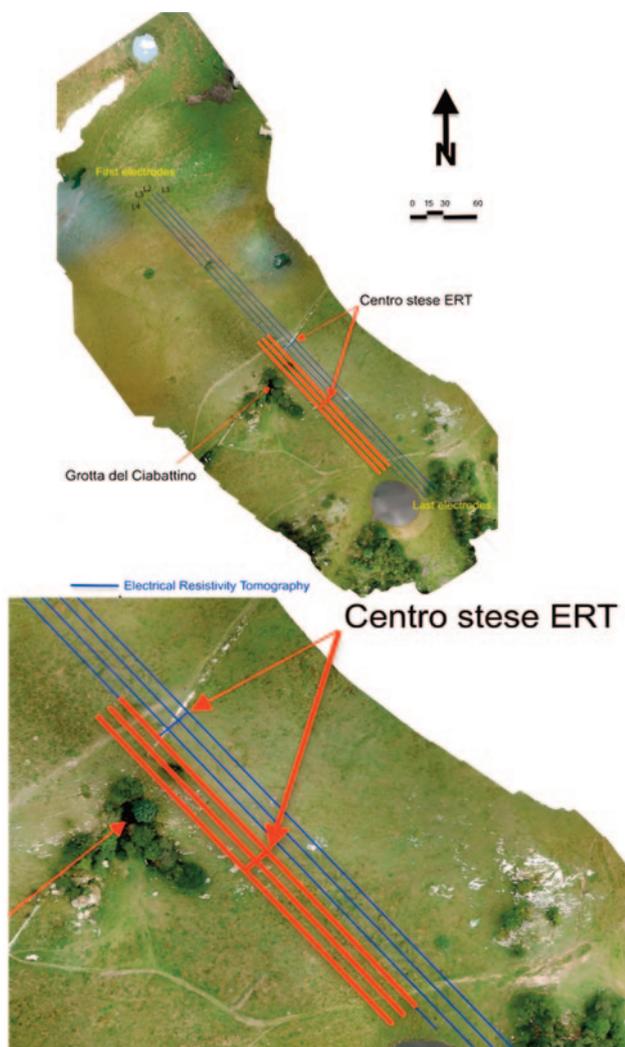


Fig. 17 –(a) Prossima prospezione geoelettrica (in rosso); (b) particolare  
 (a) Next geoelectric prospecting (in red); (b) detail

zionale campione di riferimento: la Grotta del Ciabattino, cavità molto nota dal punto di vista turistico, ma molto meno dal punto di vista geologico e situata in una posizione geografica perfetta per i nostri scopi.

L'esplorazione speleologica avrà il compito di confermare i risultati del lavoro di ricerca scientifica, svolto tecnicamente con metodologie professionali; gli alti valori di resistività potrebbero aiutare a localizzare i principali percorsi idrici (abbiamo prelevato campioni agli estremi NW e SE della grotta, ora sotto esame).

In fase esplorativa, oltre alla ristrettezza degli ambienti sotterranei che aumenta le difficoltà di avanzamento, vi è una forte influenza di eventi atmosferici improvvisi che talvolta rendono impossibile l'avanza-

mento all'interno del meandro intasato da sedimenti che franano dall'alto, creando problemi di sicurezza.

Questa impegnativa impresa, piuttosto singolare, integra due aspetti della ricerca scientifica diversi per natura, ma convergenti nell'obiettivo da raggiungere.

#### NOTE

Le acquisizioni dei dati di campagna ERT e le ortofoto da drone (13 agosto 2020) comprensive delle linee di stendimento, sono state ottenute da StudioSisma Indagini Geofisiche in collaborazione con gli speleologi.

Le restituzioni grafiche sono state successivamente modificate da L. Marastoni e L. Agostini.

L'elaborazione dei dati di campagna e le restituzioni grafiche delle sezioni 2-3D sono state ottenute e curate da N. Abu Zeid del Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra, Università di Ferrara e successivamente modificate, analizzate e interpretate da L. Marastoni e L. Agostini.

#### RINGRAZIAMENTI

Ringraziamo tutti coloro che hanno contribuito al duro lavoro di preparazione sul campo e all'esplorazione in grotta. Senza il loro generoso e indispensabile contributo nulla sarebbe stato possibile:

Carlo Lonardi e Gabriele Minuti per primi con Sergio Adami, poi a seguire Michela Asnicar, Elena Bianconi, Sergio Bonfiglio, Andrea Bottaro, Samuele Busatto, Claudia Candusso, Davide Corsini, Rolando Costalunga, Alfonsina Cuccato, Andrea De Angelis, Hélène De Taddeo, Anna Maria Ferrari, Franco Florio, Antonio Fornalè, Alessandro Fortugno, Enrico Fusina, Ferruccio Ghezzer, Flavio Giuliani, Davide John Hosking, Svetlana Kuzmina, Lorenzo Labiani, Glauco Lasagni, Stefano Meggiorini, Enrico Papale, Bruno Pellegrini, Franco Salvioli, Andrea Sassi, Giovanbattista Sauro, Henry Simioni, Aldo Soresini, Stefano Tedeschi, Gabriele Tosadori, Giuseppe Troncon, Riccardo Troncon. Un grande grazie al professore Alessandro Bressan e al dott. Leonardo Latella per i loro utili suggerimenti nella stesura di questo articolo.

Hanno partecipato speleologi del Gruppo Speleologico Veronese CAI VR: del Gruppo Lemuri di Volta Mantovana; della Commissione Speleologica Veronese APS – G.A.S.V – G.A.M – G.G.Falchi – USV; del Coordinamento Ricerche Speleologiche Speleobaldo. Un ringraziamento particolare ai tecnici dell'azienda StudioSisma di Vicenza.

## BIBLIOGRAFIA

- AKI K., 1964. A note on the use of microseisms in determining the shallow structures of the earth's crust. *Geophysics*, 29: 665-666.
- ANICHINI F., GATTIGLIA G., GUALANDI M.L., (Eds.). 2015. Data Book 1 (Vol. 1). Edizioni Nuova Cultura: 134 pp.
- ARTONI A., REBESCO M., 1990. Deformazione per thrusting nei Lessini nord occidentali (Verona-Italia settentrionale). *Studi geologici camerti*, n. speciale: 131-137.
- BOSELLINI A., CARRARO F., CORSI M., DE VECCHI G.P., GATTO G.O., MALARODA R., STURANI C., UNGARO S., ZANETTIN B., 1967. Note Illustrative della Carta geologica d'Italia alla scala 1:100.000, Foglio 49 Verona. Servizio Geologico d'Italia, Nuova Tecnica Grafica, Roma: 61 pp.
- CARRERA E., RAPOLLA A., ROBERTI N., 2004. Le indagini geofisiche per lo studio del sottosuolo: metodi geoelettrici e sismici. Liguori Editore, Napoli: 292 pp.
- CATASTO GROTTI VENETO, 2022 (sito web).
- DEGROOT-HEDLIN C., CONSTABLE S., 1990. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, 55(12): 1613-1624.
- DAL MORO G., PIPAN M., 2007. Joint Inversion of Surface Wave Dispersion Curve and Reflection Travel Times via Multi-Objective Evolutionary Algorithms. *Journal of Applied Geophysics*, 61: 56-81.
- DE PAOLA C., DI MAIO R., PIEGARI E., 2018. High-resolution geoelectrical characterization of steep pyroclastic slopes by a new 3D data acquisition technique. *24th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. Vol. 2018. No. 1. European Association of Geoscientists & Engineers.
- FRETWELL P., 2012. British Cave Research Association 6th Cave Technology Symposium Priddy, Somerset.
- FUGAGNOLI A., 2004. Trophic regimes of benthic foraminiferal assemblages in Lower Jurassic shallow water carbonates from northeastern Italy (Calcarei Grigi, Trento Platform, Venetian Prealps). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 205(1-2): 111-130.
- GALLIPOLI R., LA PENNA V., LORENZO P., 2000. Comparison of geological and geophysical prospecting techniques in the study of a landslide in southern Italy. *European Journal of Environment and Engineering Geophysics*, 4: 117-128.
- ISPRA-Foglio 35 Riva del Garda Dipartimento per il Servizio Geologico d'Italia.
- IVANOV J., MILLER R.D., XIA J., STEEPLES D., PARCK C.B., 2006. Joint Analysis of Refractions with Surface Waves. An Inverse Refraction-Traveltime Solution. *Geophysics*, 71: R131-R138.
- LOKE M.H., 2004. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys.
- LOKE M.H., BARKER R.D., 1996. Rapid least squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi Newton method 1. *Geophysical prospecting*, 44(1): 131-152.
- MARASTONI L. *et al.*, 1993. L'abisso G. Pinelli e il Complesso del Monte Tambura. *Speleologia, Rivista della Società Speleologica Italiana* (S.S.I.).
- MARTIRE L., CLARI P., LOZAR F., PAVIA G., 2006. The Rosso Ammonitico Veronese (Middle-Upper Jurassic of the Trento Plateau): a proposal of lithostratigraphic ordering and formalization. *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, 112(2): 227.
- MASETTI D. *et al.*, 2012. Tectonostratigraphic evolution of the Jurassic extensional basins of the eastern southern Alps and Adriatic foreland based on an integrated study of surface and subsurface data. *AAPG bulletin*, 96.11: 2065-2089.
- MENICHETTI M., ROSSI G., ZORZIN R., 2011. Idrologia e carsismo dell'area della Spluga della Preta. *Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia*, s.25: 93-118.
- PÁNEK T., MARGIELEWSKI W., TÁBO ÍK P., URBAN J., HRADECKÝ J., SZURA C. 2010. Gravitationally induced caves and other discontinuities detected by 2D electrical resistivity tomography: Case studies from the Polish Flysch Carpathians. *Geomorphology*, 123(1-2): 165-180.
- PATELLA D., 1986. Low-pass filtering for noisy Schlumberger sounding curves. Part 1: Theory. *Geophysical Prospecting*, 34: 109-123.
- ROTH M., HOLLIGER K., 1999. Inversion of Source generated noise in high-resolution seismic data. *The Leading Edge*, 18: 1402-1406.
- SANTARATO G., ABU ZEID N., BIGNARDI S., 2015. Lezioni di geologia applicata. Libreria Universitaria editrice, Padova.
- STATE PUBLIC WORKS SERVICE, 1969. Standard graphs for resistivity prospecting. *E.A.E.G., Netherlands*.
- TRONCON G., SAURO F., ANNICCHINI G., 2011. La Spluga della Preta. Ed. La Grafica, Verona: 320 pp.
- SAURO F., PICCINI L., MENICHETTI M., CASCONE G., 2011. Aspetti morfo-strutturali e ipotesi sull'evoluzione della Spluga della Preta. *Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia*, 25(2): 69-92.
- ZAMPIERI D., MASSIRONI M., 2007. Evolution of a poly-deformed relay zone between fault segments in the eastern Southern Alps, Italy. *Geological Society, London, Special Publications*, 290(1): 351-366.
- ZOHDY A.A.R., 1968. The affect of current leakage and electrode spacing errors on resistivity measurements. *U.S. Geol. Surv. Res.: D258-D264*.
- ZORZIN R., AGOSTINI L., MONTECCHI M.C., TORRI P., ACCORSI C.A., 2011. Tanella cave (Monte Baldo-Verona, Italy): a record of environmental data on the last glacial period. *Acta Carsologica*, 40(1).