



AUTORITA' DI SISTEMA PORTUALE DEL
MAR TIRRENO SETTENTRIONALE

Uffici di LIVORNO

PROGETTO PRELIMINARE

LAVORI DI ATTUAZIONE DELLE PREVISIONI DI ACQUATICITA' DELLA
TORRE DEL MARZOCCO

**INDAGINI GEOFISICHE PER LA DEFINIZIONE DELLE
CARATTERISTICHE GEOLOGICHE E ARCHEOLOGICHE
DELL'AREA FORTIFICATA DEL MARZOCCO (PORTO
INDUSTRIALE DI LIVORNO) CON PARTICOLARE
RIFERIMENTO ALLA STRUTTURA DI FONDAZIONE DELLA
TORRE DEL MARZOCCO – MAGGIO 2014**

ALLEGATO 2

Il progettista:

Direzione Tecnica -Area progettazione-
Autorità di Sistema Portuale del Mar Tirreno Settentrionale

Ing. Ilària Lotti

Coordinatore della sicurezza in fase di progettazione:

Direzione Tecnica -Area progettazione-
Autorità di Sistema Portuale del Mar Tirreno Settentrionale

Arch. Raoul Raffalli

Il Responsabile Unico del Procedimento

Direzione Tecnica
Autorità di Sistema Portuale del Mar Tirreno Settentrionale

Ing. Enrico Pribaz- Dirigente F.F.



UNIVERSITÀ DI PISA
DIPARTIMENTO DI SCIENZE DELLA TERRA

Alla cortese attenzione : Presidente Dott. Giuliano Gallanti
Autorità Portuale
Scali Rosciano 6
57123 Livorno

Pisa, 05 Maggio 2014

OGGETTO: TRASMISSIONE RELAZIONE FINAL- convenzione "Indagini Geofisiche per la definizione delle caratteristiche geologiche e archeologiche dell'area fortificata del Marzocco (porto Industriale di Livorno), con particolare riferimento alla struttura di fondazione della Torre del Marzocco"

Si trasmette la relazione finale illustrante i risultati della convenzione in oggetto.

Siamo a disposizione per qualsiasi chiarimento.

Distinti saluti

Dr. Adriano Ribolini
Resp. Attività

Prof. Michele Marroni
Direttore Dipartimento

dr. Adriano Ribolini
Dipartimento di Scienze della Terra
Università di Pisa
ribolini@dst.unipi.it
050 2215845



UNIVERSITÀ DI PISA
DIPARTIMENTO DI SCIENZE DELLA TERRA

CONVENZIONE FRA L'AUTORITÀ PORTUALE DI LIVORNO ED IL
DIPARTIMENTO DI SCIENZE DELLA TERRA, UNIVERSITÀ DI PISA

Prov. 161, 30.12.2013, Segreteria Generale dell'Autorità di Bacino di Livorno

**INDAGINI GEOFISICHE PER LA DEFINIZIONE DELLE CARATTERISTICHE
GEOLOGICHE E ARCHEOLOGICHE DELL'AREA FORTIFICATA DEL
MARZOCCO (PORTO INDUSTRIALE DI LIVORNO), CON PARTICOLARE
RIFERIMENTO ALLA STRUTTURA DI FONDAZIONE DELLA TORRE DEL
MARZOCCO**

Report finale

Aprile 2014

**Responsabile
Convenzione**

dr. Adriano Ribolini

dr. Adriano Ribolini
Dipartimento di Scienze della Terra
Università di Pisa
ribolini@dst.unipi.it
050 2215845

**Direttore
Dipartimento di Scienze della Terra**

Prof. Michele Marroni

**INDAGINI GEOFISICHE PER LA DEFINIZIONE DELLE CARATTERISTICHE GEOLOGICHE E ARCHEOLOGICHE
DELL'AREA FORTIFICATA DEL MARZOCCO (PORTO INDUSTRIALE DI LIVORNO), CON PARTICOLARE
RIFERIMENTO ALLA STRUTTURA DI FONDAZIONE DELLA TORRE DEL MARZOCCO**

Adriano Ribolini - Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Pisa
Gianfranco Morelli - Geostudi Astier, Livorno
Stefano del Ghianda - Geostudi Astier, Livorno
Gabriele Graziano - Geostudi Astier, Livorno
Gianluca Catanzariti - 3DGeoimaging, Torino
Monica Bini- Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Pisa
Alice Ciulli- Geostudi Astier, Livorno

INTRODUZIONE

La Torre del Marzocco è un edificio quattrocentesco a pianta ottagonale alto circa 55 m posto sul lato occidentale del Canale Industriale di accesso alla Darsena Toscana, nel porto industriale di Livorno). Adiacente alla Torre sono state realizzate nei secoli successivi alcune fortificazioni e strutture di servizio, fra le quali la più importante è un forte coperto, datato all'inizio XVIII secolo. L'intera struttura è perimetrata da mura che contengono anche un cortile pavimentato e i resti degli alloggi della guarnigione che presidiava quella che è definito come il Forte del Marzocco.

Nell'ambito di un progetto di allargamento del Canale Industriale sono in corso delle indagini per verificare potenziali effetti sulla stabilità della Torre e, contestualmente, per pianificare un intervento di recupero architettonico, archeologico ed ambientale.

Sono state quindi eseguire indagini geofisiche superficiali volte a:

- definire dimensioni e geometria reale della struttura di fondazione della Torre
- correlare i dati geofisici con l'assetto stratigrafico dell'area su cui insiste l'intera struttura
- individuare potenziali strutture e archeologiche all'interno dell'area fortificata

Quindi, contestualmente all'indagine sulla fondazione della Torre verranno esplorate le aree adiacenti all'edificio principale e all'interno del perimetro murario per identificare ulteriori strutture archeologiche presenti nel sottosuolo, in termini di posizione, forma e estensione. La profondità minima di interesse é di circa 12 m per dimensionare le fondazione della Torre, di circa 2 m per le altre strutture archeologiche periferiche ad essa.

Tecniche d'indagine e prospezioni

Al fine di conseguire gli obiettivi sopra citati la Tomografia Elettrica di Resistività 3D (*Electrical Resistivity Tomography*, ERT-3D) e il *Ground Penetrating Radar* (GPR) 3D sono stati considerati i metodi geofisici che assicuravano le maggiori possibilità di successo, per le profondità

sottosuperficiali esplorabili e la risoluzione dei dati ottenibili (Fishanger et al., 2013; Novo et al., 2013).

L'indagine ERT-3D è eseguita con un georesistivimetro Syscal Pro di Iris Instruments collegato tramite cavo multipolare ad elettrodi in acciaio distribuiti in modo tale da garantire una copertura sottosuperficiale rapportabile all'area che si intende esplorare. La distanza elettrodica di 1 m ha permesso una risoluzione sottosuperficiale della distribuzione dei valori di resistività elettrica di 0.5 m. Il presupposto della tecnica ERT-3D è quello di utilizzare configurazioni elettrodiche non convenzionali, con punti di misura disposti lungo il perimetro di edifici o di manufatti in genere. Ciò consente di analizzare le strutture di fondazione di un edificio oltre che le caratteristiche locali del terreno di appoggio (caratteristiche tessiturali dei materiali geologici, condizioni di umidità, esistenza di cavità o opere di ingegneria civile al di sotto dell'edificio). Questa metodologia di indagine consente dunque il superamento di quei vincoli che il contesto urbano pone alle tradizionali indagini geofisiche e geotecniche, e nel contempo consente di acquisire un'informazione di resistività volumetrica dell'intera sottosuperficie investigata, e non bidimensionale lungo linee di acquisizione singole come nella tecnica tradizionale (Fishanger et al., 2013). La collocazione degli elettrodi sulla superficie ha seguito quindi una geometria non convenzionale, secondo due anelli (*loop*) di forma irregolare contenenti la Torre (Tav. 1). Per incrementare la qualità della ricostruzione 3D della struttura di fondazione, sono stati posizionati due elettrodi all'interno della Torre in posizione simmetrica rispetto al suo asse, nella cavità che era adibita a cisterna di raccolta acque piovane. Le coordinate topografiche degli elettrodi sono state acquisite tramite stazione totale e riportate sulla cartografia dell'Autorità Portuale.

Le indagini ERT-3D sono state eseguite nei giorni di 27-28 Gennaio 2014

A causa della complessità dell'area d'indagine dove si sono succedute varie fase costruttive degli edifici annessi alla Torre, è stata eseguita un'indagine Ground Penetrating Radar 3D di alta risoluzione (3D-GPR). La tecnica si basa sul concetto che la realizzazioni di profili GPR 2D ravvicinati costituisce di fatto un volume di dati, le cui dimensioni sono rappresentate dalle direzioni di acquisizioni sulla superficie e dalla profondità di indagine (Novo et al., 2013). Il volume di dati può essere sezionato a profondità variabili definite dall'utente generando delle immagini tomografiche delle distribuzione delle aree riflettive della sottosuperficie (*time slice*), che rendono l'interpretazione molto più efficace.

L'indagine 3D-GPR è stata condotta con un georadar IDS equipaggiato con una schiera di 8 antenne distanziate di 12 cm (StreamX 200) ed ognuna con frequenza centrale di 200 MHz. In questo modo è stato possibile ottenere una risoluzione verticale e laterale decimetrica delle immagini ottenute e, al tempo stesso esplorare la sottosuperficie potenzialmente fino a circa 2-3 m di profondità.

Le indagini GPR-3D sono state eseguite il 30 Gennaio 2014.

RISULTATI INDAGINE ERT

I dati acquisiti sono stati elaborati in modo tale da ottenere sezioni orizzontali parallele alla superficie e sezioni verticali rappresentanti la distribuzione della resistività elettrica (espressa in Ohm*m) nel volume di sottosuperficie indagato.

PIANI ORIZZONTALI DI RESISTIVITÀ A QUOTE VARIABILI

-0.5 m. I valori di resistività $>100 \Omega\text{m}$ si distribuiscono a definire un poligono sub-circolare centrato sull'asse della torre. I valori sfumano gradualmente verso la periferia di quest'area centrale passando prima a resistività comprese nell'intervallo $30\text{-}70 \Omega\text{m}$ e poi ad una vasta area con valori $\sim 10 \Omega\text{m}$. Solo nei settori di sottosuperficie distanti dall'asse della torre a SW e NW si raggiungono valori $<5 \Omega\text{m}$ (Tav. 2).

-1 m - 1.5 m. Si osserva una riduzione dell'area di sottosuperficie resistiva $> 70 \Omega\text{m}$ che è estesa poco oltre il perimetro della torre, bordata esternamente ad un'ampia fascia con valori compresi nell'intervallo $10\text{-}30 \Omega\text{m}$. Questi ultimi sono estesi a tutta la sottosuperficie dell'area fortificata e anche all'esterno delle mura perimetrali. Solo a W e SW la resistività raggiunge valori $\leq 5 \Omega\text{m}$ (Tav. 3,4).

-2 m – 2.5 m. Le resistività maggiori ($>30 \Omega\text{m}$) sono limitate al di sotto dell'edificio della torre, bordate esternamente in maniera omogenea da valori di resistività compresi fra 5 e $10 \Omega\text{m}$ (Tav. 5,6).

-3 m – 3.5 m. Il *contouring* delle resistività mostra un massimo al di sotto della torre con valori compresi fra 10 e $30 \Omega\text{m}$, mentre esternamente viene ricalcata la stessa geometria dell'intervallo di quota superiore (Tav. 7,8).

-4 m – 4.5 m. Si osserva una generale diminuzione dei valori di resistività che mostrano un'area di massimo ($10\text{-}15 \Omega\text{m}$) di forma ellittica non più al di sotto dell'asse della torre ma spostata verso SW. Il resto dei valori è quasi sempre $< 5 \Omega\text{m}$, con i minimi assoluti ($< 3 \Omega\text{m}$) raggiunti nell'area a W della sottosuperficie indagata. Si intuisce la nucleazione di un minimo di resistività ($3 \Omega\text{m}$) a NE dell'asse della torre (Tav. 9,10).

-5 m – 5.5 m. La decrescita generale dei valori di resistività avviene seguendo la stessa geometria di distribuzione dell'intervallo di quota precedente. Si mantiene il massimo di resistività ($\sim 5 \Omega\text{m}$) a

SW dell'asse della torre, e si osserva la crescita evidente del minimo di resistività a NE della torre e contenuto all'interno del perimetro murario (Tav. 11, 12).

-6 m – 6.5 m. La distribuzione delle resistività mostra due massimi ($\sim 5 \Omega\text{m}$) a NE e SW della sottosuperficie indagata, separati da una vasta area $< 3-2 \Omega\text{m}$ che disegna una profonda insenatura estesa al di sotto di buona parte dell'area fortificata a N della torre e che raggiunge i valori minimi assoluti a SE dell'area indagata (Tav. 13, 14).

-7 m – 9 m. I valori di resistività rimangono quasi inalterati, si osserva solo un debole allargamento dell'area centrale a resistività $< 2 \Omega\text{m}$, che separa i due massimi ($\sim 3 \Omega\text{m}$) a NE e SW (Tav. 15, 16,17,18,19).

In generale si osserva quindi l'esistenza di volume resistivo con un nucleo centrale più elevato ed un'area periferica che lo avvolge in maniera continua che diminuisce di dimensioni e di valori di resistività al diminuire della quota. La diminuzione avviene in maniera omogenea per tutte le classi di resistività. Il nucleo centrale dei massimi di resistività è centrato al di sotto dell'asse della torre. A partire da -5-5.5 m di quota i valori si omogeneizzano, le variazioni diventano modeste e non sembrano avere relazioni con la geometria dell'edificio della torre.

PIANI VERTICALI DI RESISTIVITÀ

Sono state eseguiti una serie di piani verticali di resistività sezionando il cubo dei dati. Le sezioni sono state tracciate per definire la geometria della sottosuperficie della torre e l'area di minimo di resistività che è emersa a NE del suo perimetro a partire da -4-5 m di quota (Tav. 20,21,22,23,24,25,26,27).

I dati visibili sulle sezioni confermano l'esistenza di un orizzonte composto da un nucleo centrale alto resistivo ($> 100 \Omega\text{m}$) al quale è associata una fascia continua a resistività compresa fra $10 \Omega\text{m}$ e $70 \Omega\text{m}$.

Il nucleo alto resistivo ($> 100 \Omega\text{m}$) è centrato al di sotto dell'edificio della torre e si estende lateralmente oltre il suo perimetro fino a distanze che può variare da 6 a 9 m a seconda delle direzioni azimutali. La fascia a resistività compresa fra $10 \Omega\text{m}$ e $70 \Omega\text{m}$ diminuisce di dimensioni laterali al crescere della quota ed è costantemente estesa lateralmente a tutta la sottosuperficie dell'area fortificata e anche oltre.

La sezione riportata in Tavola 20 (N160) illustra infatti come i valori di resistività $10-70 \Omega\text{m}$ si estendano a NW oltre il perimetro murario dell'area fortificata. Lo stesso può essere osservato alle terminazione SE e NW della Tavola 24 (N140).

Le sezioni che attraversano il minimo di resistività a NE della torre (Tavv. 24, 27), visibile nei piani orizzontali fin dal primo metro di quota, suggeriscono che questo possa essere generato dal concomitante effetto di infiltrazione di acqua ristagnate in superficie in una area topograficamente depressa, e di risalita di acqua marina.

In generale dalle sezioni si può desumere che il volume alto resistivo al di sotto della torre è distribuito in maniera simmetrica al di sotto della proiezione dell'asse. Il volume a resistività 10–70 Ωm segue questa simmetria fino a circa -4 m di quota, per poi spostare il baricentro dei valori massimi verso SW rimanendo comunque al di sotto dell'area fortificata adiacente alla torre.

A -5-6 m di quota i valori di resistività si omogeneizzano su tutte le sezioni verticali assumendo valori costantemente $< 3 \Omega\text{m}$.

CALIBRAZIONE DATI ERT CON DATI DI SONDAGGIO

La disponibilità di sondaggi stratigrafici eseguiti dall'Autorità Portuale nell'area della Torre permette di correlare i valori di resistività ottenuti con i materiali effettivamente presenti nella sottosuperficie. Il risultato della calibrazione effettuata puntualmente in corrispondenza dei sondaggi può essere esteso a tutta la sezione tomografica e alle altre sezioni eseguite. Questa operazione comunque deve essere fatta con cautela perché ai materiali geologici corrispondono *range* di resistività e non valori definiti in modo univoco. L'ampiezza del *range* è controllata dalle condizioni locali di umidità, porosità, densità, composizione granulometrica e tessiturale.

Nell'area della Torre sono presenti 11 sondaggi verticali (S1-S11) e 3 sondaggi obliqui (S12-14), le posizioni sono riportate in ognuna delle tavole riportanti i dati ERT, mentre le stratigrafie sono riportate nelle Tavole 28-29-30. Dal volume di dati ERT sono state realizzate sezioni verticali intersecanti la posizione dei carotaggi per potere eseguire un confronto diretto fra resistività elettriche ed orizzonti stratigrafici.

La stratigrafia dei carotaggi obliqui (S12, S13 e S14) che intercettano il terreno al di sotto della torre correla un materiale eterogeneo composto da mattoni, ghiaie cementate, frammenti litici di marmo e calcarenite con resistività $> 80-100 \Omega\text{m}$ (Tavv 20,21,22) che si distribuiscono fino a -2.5-3 m di quota. Fino a -5.5 m di quota ghiaie sottili, con scarsa matrice limosa, calce spenta e frammenti di legno hanno restituito resistività variabili nell'intervallo 20-50 Ωm . Ghiaie sottili in matrice limosa, a luoghi debolmente cementate e orizzonti di calce che si estendono fino a -9.5-10.5 m di quota corrispondono a valori di resistività variabili nell'intervallo 5-10 Ωm . Infine sabbie fini limose e limi sabbiosi al di sotto di -10.5 m di quota mostrano valori di resistività omogeneamente $< 3 \Omega\text{m}$.

Queste correlazioni sono verificate anche per i materiali descritti dai carotaggi S2 e S10, S7 e S1, S3 e S9, S5 e S8, intercettati o proiettati su un piano tomografico verticale di resistività (Tavv. 23,24,25,26,27).

Da queste correlazioni si può osservare come i materiali di fondazione della torre (pietrisco, mattoni, frammenti litici, ghiaie più e mono cementate con o senza matrice) si estendono fino a - 9.5-10 m di quota. Si osserva che in questo intervallo al diminuire della quota corrisponde una diminuzione di resistività da imputare all'aumento di matrice fine, alla diminuzione del grado di cementazione, alla diminuzione di frammenti litici e alla presenza di orizzonti di calce. Al di sotto di questa quota, l'ulteriore riduzione di resistività ($< 3 \Omega\text{m}$) indica l'inizio dei materiali naturali (sabbie e sabbie limose) sottostanti la fondazione.

INDAGINE GPR

I dati acquisiti sono stati oggetto di una fase di *pre-processing* per eliminare derive strumentali e riallineare le tracce GPR ad un tempo di inizio comune, per poi essere elaborati con una sequenza di passaggi solo in parte *standard*. La descrizione delle passaggi di elaborazione è riportata nell'Allegato 1.

Il volume di dati elaborato è stato poi sezionato con piani paralleli alla superficie a profondità variabile (*time slice*) e verticali per visualizzare la distribuzione dell'ampiezza dei segnali elettromagnetici riflessi da variazioni nella composizione dei materiali.

TIME SLICE

Nella settore esterno sono visibili aree riflettive che mostrano una coerenza spaziale disegnando allineamenti che si intersecano ad angolo quasi retto (N120-N30). A queste due direzioni se ne aggiunge una debolmente discordante (N140) che attraversa la parte meridionale del cortile (Tav. 31). Questa geometria di riflessioni è visibile già a circa 0.3 m di profondità per divenire più chiara e definita a 0.7 m di profondità (Tav.32). A profondità superiore diventa meno visibile sebbene alcuni allineamenti di riflessioni siano ancora evidenti in corrispondenza dell'accesso all'area coperta della fortificazione (Tavv 33,34,35). Nella parte settentrionale delle *time slice* delle immagini è costantemente visibile a partire da 0.5 m di profondità un'area fortemente riflettiva con geometria irregolare.

Il settore interno ha restituito dati GPR più rumorosi che hanno generato un quadro riflettivo con elementi geometri coerenti ma discontinui spazialmente (Tav.31). Sono infatti evidenti solo alcuni aree riflettive allungate ma per brevi distanze, apparentemente con direzioni discordi rispetto alle

strutture evidenti in superficie. Le aree riflettenti più intense e persistenti in profondità sono collocate in corrispondenza dell'uscita dall'area coperta verso il cortile esterno, e adiacenti al perimetro della Torre (Tav.36). La forma in generale rimane sempre irregolare anche se non si può escludere un debole orientamento N140.

SEZIONI VERTICALI

In generale la profondità di indagine non supera 1.5-1.7 m di profondità, a causa del carattere fortemente dispersivo dei materiali (Tav. 37). Le sezioni GPR verticali hanno confermato le aree riflettenti che hanno generato le riflessioni allungate visibili sulle *time slice* non sono imputabili a rumore coerente ma che corrispondono ad effettive discontinuità nella composizione dei materiali della sottosuperficie. In particolare la figura di riflessione che compare in corrispondenza di questi incroci è composta da una serie di riflessioni concentrate in un ristretto intervallo laterale ed evidenti per circa 7-8 ns (~0.7 m). Sono visibili anche riflettori debolmente inclinati e concavi. Lungo il radargramma nominato LID10009 è anche evidente l'approfondimento dell'orizzonte riflettente procedendo verso N, coerentemente con quanto evidente nelle *time slice* a profondità crescenti (Tav. 37).

CONFRONTO CON DATI RELATIVI ALLE FASI COSTRUTTIVE

La geometria delle riflessioni nel cortile esterno della Torre suggerisce sia in pianta che in sezione verticale l'esistenza di strutture murarie che definiscono ambienti chiusi. Tuttavia dalla consultazione di documenti storico-archivistici (Trotta, 2005) non emerge una correlazione geometrica chiara con elementi architettonici o con la ricostruzione di fasi costruttive (Tav. 38). Ne deriva che si possa trattare delle tracce di edifici esterni, costruiti successivamente all'edificazione della Torre, dei quali comunque non vi è testimonianza nei rilievi topografici, piante e disegni progettuali a partire dal 1704. L'unica possibile correlazione che può essere ipotizzata è infatti con le fasi costruttive attribuite alla prima metà del XVI secolo per quanto riguarda la tracce di riflessione and andamento N30 nel cortile esterno della Torre (Tav. 38).

Conclusioni

I dati delle stratigrafie dei sondaggi obliqui e verticali disponibili all'interno dell'area fortificata della Torre Marzocco e immediatamente al suo esterno definiscono che sono composti da pietrisco, mattoni, frammenti litici, ghiaie più e meno cementate con o senza matrice, frammenti di legno. Questi materiali si estendono fino a -9.5-10 m di quota.

I valori di resistività ottenuti con l'indagine ERT sono coerenti con questa stratigrafia e confermano l'estensione a quella quota di questa struttura di fondazione. In questi materiali, il generale aumento con il diminuire della quota di matrice fine, unito al minor grado di cementazione e alla ridotta densità di frammenti litici spiega la progressiva diminuzione di resistività. Sulla base di questa taratura è possibile affermare che la sostituzione di materiale effettuata per fondare l'edificio della Torre è stata estesa lateralmente oltre il suo perimetro, e corrisponde ai valori di resistività $> 80-100 \Omega\text{m}$ nei primi $-2-3$ m di quota, di $20-50 \Omega\text{m}$ tra -3 e -5 m circa di quota, e di $5-10 \Omega\text{m}$ fra -5 e -10 m di quota.

I risultati dell'indagine GPR hanno evidenziato una serie di riflessioni allungate ed intersecanti ad angolo circa retto al di sotto del cortile esterno non coperto dell'area fortificata. La loro coerenza spaziale e l'aspetto che mostrano in sezione verticale può essere ricondotto alla possibile esistenza di strutture murarie, associate a materiali provenienti dal crollo delle stesse. Il confronto con i dati disponibili relativi alle fasi costruttive dell'edificio non mostra una correlazione evidente con quanto noto, ad eccezione fatta con le fasi costruttive attribuite alla prima metà del XVI secolo. Quindi se l'ipotesi è corretta potrebbe trattarsi di elementi strutturali non noti o di dubbia collocazione cronologica nella storia architettonica della Torre Marzocco.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- FISHANGER F., MORELLI G., RANIERI G., SANTARATO G., OCCHI M. (2013) - 4D cross-borehole electrical resistivity tomography to control resin injection for ground stabilization: a case history in Venice (Italy). *Near Surface Geophysics*, 11, 10.3997/1873-0604.2012056.
- NOVO A., LECKEBUSCH J., GOODMAN D., MORELLI M., PIRO S., CATANZARITI G. (2013) - Advances in GPR Imaging with Multi-channel Radar Systems. *Journal of Surveying and Mapping Engineering*, 1, 1-6
- TROTTA G. (2005) - L'antico Porto Pisano e la Torre del Marzocco a Livorno. *Autorità Portuale di Livorno*, Livorno, 157 pp.

PROCESSING GROUND PENETRATING RADAR (GPR) DATA

INTRODUZIONE

L'indagine eseguita con metodologia GPR ha visto l'esecuzione di rilievi con l'impiego di strumentazione multicanale in diversi settori del sito Torre del Marzocco, ubicata in prossimità dell'area portuale del comune di Livorno.

Il segnale appena registrato non si presta ad alcuna lettura, qualsiasi informazione potenzialmente contenuta si presenta, inizialmente, nascosta. La grande "sfida" è allora quella di riuscire ad estrarre il massimo contenuto informativo da un dato che, all'apparenza, ne risulta completamente privo. Quanto detto viene concretizzato applicando una serie di passaggi di elaborazione (GPR Slice software), più o meno sofisticati, che trasformano l'immagine di partenza in un prodotto finale, come vedremo in seguito, di tutt'altro aspetto.

La sequenza di elaborazione al quale il dato è stato sottoposto ricorda, a grandi linee, le tecniche comuni di analisi del segnale in ambiente sismico, includente inoltre le preliminari operazioni di "pre-processing" nominate *dewow filter* e *T₀ search and truncate*.

L'elaborazione può essere estremamente efficace in molti casi e totalmente inappropriata in altri. La possibilità di ricavare informazioni dal dato grezzo dipende dall'abilità, intuizione e parsimonia con il quale l'operatore applica ogni singolo passaggio di elaborazione all'intero *dataset* assicurando, al termine dell'intera sequenza, un risultato inteso *optimum* in termini di qualità. Tale sequenza, complementare alla precedente fase di pre-elaborazione, comprende l'applicazione di una funzione di guadagno (*gain*), analisi delle ampiezze sullo spettro di Fourier e conseguente *design* del filtro passabanda, rimozione del segnale di *background* (*background filter*), compressione temporale dell'impulso inviato (*spiking deconvolution*) e, a concludere, filtraggio *boxcar* per un ulteriore aumento del rapporto Signal to Noise (S/N).

DATA PROCESSING

Come anticipato, le prime operazioni di *processing* hanno previsto l'applicazione di un filtro *dewow* e l'immediata successiva correzione temporale dei primi impulsi. Analizzeremo quindi gli aspetti teorici e pratici di questi principali passaggi, essenziali per la riuscita dei futuri *step*.

Dewow Filter

L'immagine di figura 1 mostra chiaramente l'effetto di deriva a bassa frequenza (*wow*) che allontana, progressivamente nel tempo, il segnale dal valore centrale conferendogli la non perfetta distribuzione dei campioni nei simmetrici domini positivi e negativi di ampiezza.

Questo comportamento, di natura strumentale, è attribuito alla saturazione del sistema causata dalla registrazione dei primi arrivi (*airwave + groundwave + headwave = background*) i quali trasportano quasi tutta la potenza appena irradiata dall'antenna di trasmissione.

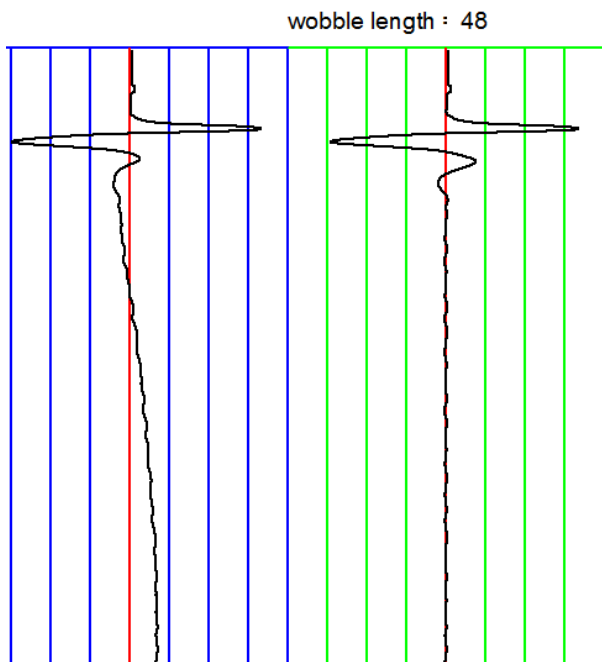


Figura 1 – Rappresentazione della singola forma d’onda trasmessa in funzione del tempo (A-scan) affetta da “wow” (a sinistra) ed in uscita dall’operazione di filtraggio *dewow* (a destra). L’impulso visibile a tempi minori rappresenta l’onda di background dotata di notevole potenza.

La A-scan processata (destra) rappresenta l’effetto ottenuto applicando un operatore di lunghezza pari a 48 campioni.

Dal punto di vista matematico saranno presi in considerazione i soli campioni ricadenti all’interno della finestra d’azione del filtro, definita dall’utente (*wobble length*). Viene così determinato un valore medio che sarà successivamente sottratto a tutti gli *i*-esimi campioni ricadenti all’interno della finestra sopracitata (Daniels, Ground Penetrating Radar, 2004):

$$A'_n(t) = A_n(t) - \frac{1}{N} \sum_n^N A_n(t)$$

dove

$A_n(t)$ = campione non processato

$A'_n(t)$ = campione processato

N = wobble length

n = numero campione

La scelta della lunghezza in campioni della finestra deve considerare la natura del fenomeno di deriva il quale aumenta a tempi maggiori: finestre troppo grandi, o troppo piccole, rispetto al numero di campioni della traccia produrrebbero risultati insoddisfacenti come mostrato in figura 2.

Il lettore potrebbe chiedersi quale criterio è stato osservato al fine di poter giudicare accettabile, o meno, il risultato appena ottenuto. Consideriamo dunque la nostra traccia come data dalla somma di una componente ad alta frequenza (segnale utile) ed una componente a bassa frequenza, rappresentata appunto dal trend visto in figura 1.

La componente utile, matematicamente parlando, è data dalla convoluzione del nostro segnale (impulsivo) con la traccia di riflettività (casuale). Immaginiamo allora, per assurdo, di poter decidere il grado di “impulsività” e decidiamo così di inviare un altro tipo di segnale, approssimabile ad uno spike (funzione δ di Dirack). Essendo quest’ultimo l’elemento neutro della convoluzione otteniamo la sola traccia di riflettività la quale, essendo appunto casuale, ha valor medio pari a zero (le ampiezze saranno distribuite in maniera equilibrata tra i domini positivi e negativi). Questo concetto può dunque essere esteso nel caso di un segnale reale, a banda limitata, considerando la nostra traccia data dalla sovrapposizione degli effetti (in

osservanza del principio di linearità) di tutti gli impulsi riflessi. Sarà infine ritenuto accettabile quel risultato che meglio replica l'onda generata dall'antenna di trasmissione.

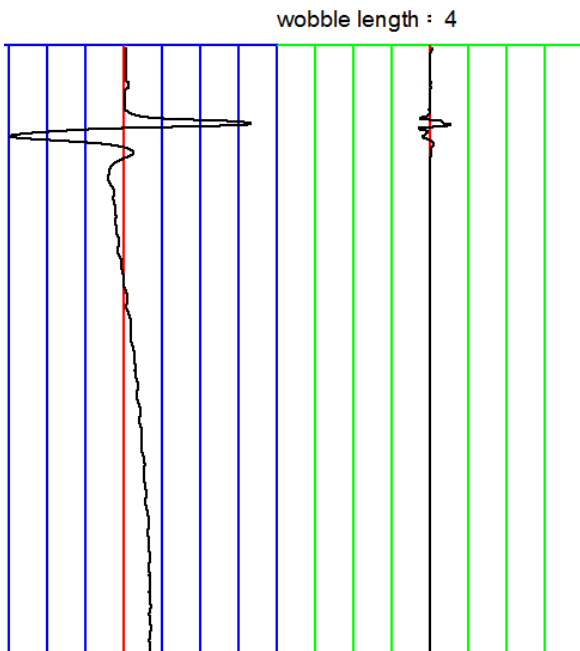
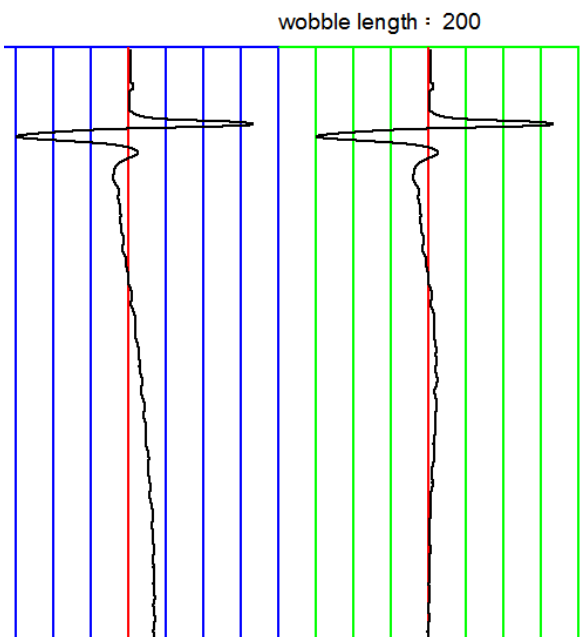


Figura 2 – In alto, rappresentazione della singola forma d'onda trasmessa in funzione del tempo (A-scan) affetta da "wow" (a sinistra) ed in uscita dall'operazione di filtraggio *dewow* (a destra).

Si noti come venga alterato l'aspetto dell'impulso di background, essenziale nella sua integrità per il corretto svolgimento delle future operazioni. Inoltre, i valori di ampiezza ottenuti a seguito del filtraggio risultano prossimi o uguali a zero.

In basso, risultato del filtraggio *dewow* con lunghezza dell'operatore eccessivamente lunga. L'aspetto dell'impulso iniziale rimane immutato tuttavia non otteniamo una traccia con



T₀ search and truncate

Il secondo passaggio applicato, appartenente ancora alle operazioni dette di *pre-processing*, è rappresentato dalla ricerca e sincronizzazione dei primi arrivi. Questi infatti potrebbero presentare differenti valori, sia lungo lo stesso radargramma¹ che tra diversi profili, essendo l'altezza dell'antenna di ricezione variabile durante l'acquisizione (figura 3).

¹ Immagine ottenuta posizionando, a intervalli regolari e pari al passo di campionamento *in-line*, tutte le A-scans registrate lungo lo stesso profilo di acquisizione.

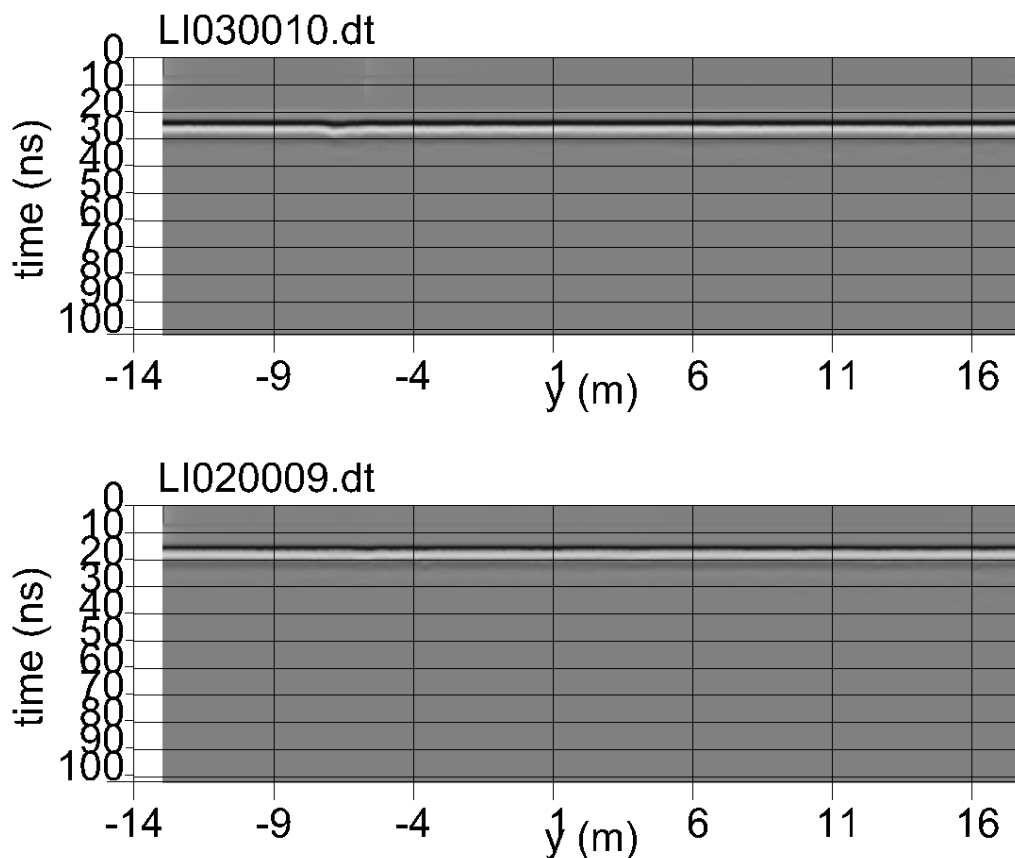
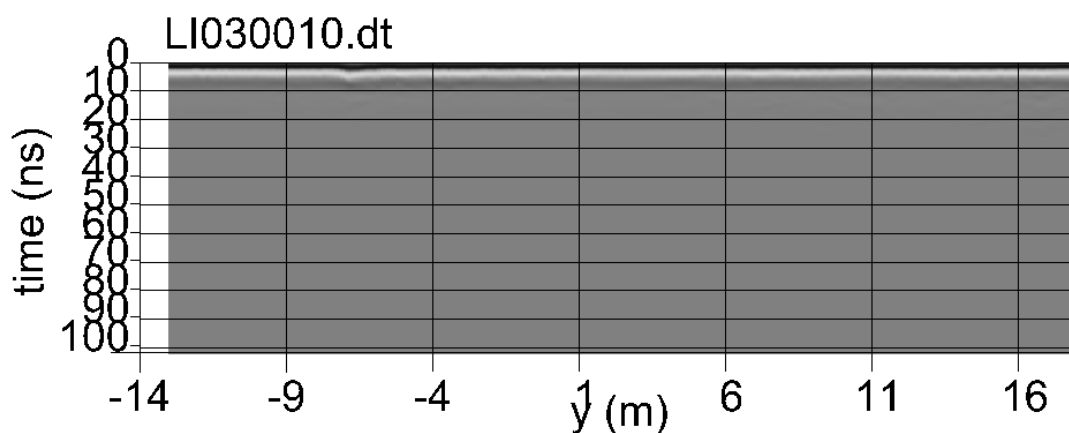


Figura 3 – Le immagini proposte rappresentano due radargrammi sui quali si ha una buona visione del differente tempo di origine registrato all’arrivo dell’onda di background, rispettivamente compreso nel range 20-30 ns (in alto) e 10-20 ns in basso.

La ricerca di un T_0 comune è dunque un passaggio indispensabile, influenzante il corretto svolgimento delle successive operazioni. Il metodo di ricerca qui adottato prevede la ricerca di un valore di soglia preimpostato (*threshold*) rispetto al primo picco del segnale, eventualmente anticipato arretrando di un dato numero di campioni la precedente stima (bisogna porre particolare cura nel non troncatura la forma dell’onda sorgente).

Ciò viene svolto per ogni singola A-scan, i campioni presenti a tempi minori di T_0 verranno dunque eliminati (figura 4).



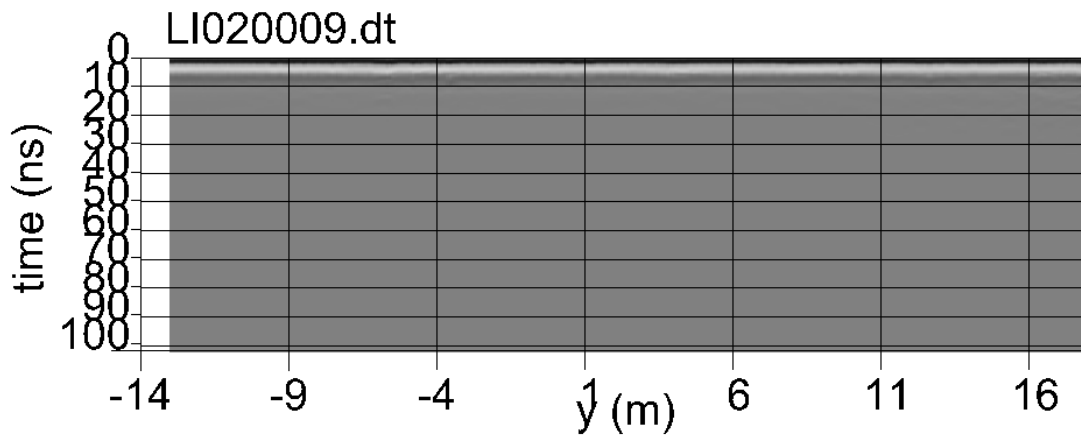


Figura 4 – Gli stessi radargrammi proposti in figura 3 vengono qui mostrati subito dopo la ricerca ed il troncamento dei valori precedenti al T_0 stimato; si noti come in questo caso il tempo d’origine esibito risulti il medesimo.

Gain

Il primo *step* della sequenza di *processing* prevista è rappresentato dal *gain*, applicato per rimediare agli effetti di attenuazione d’ampiezza che portano, velocemente nel tempo, ad un restringimento della banda del segnale ed una marcata attenuazione della potenza attribuita alle componenti sinusoidali ivi incluse.

Il terreno all’interno del quale si propaga l’impulso trasmesso agisce alla stessa stregua di un filtro passabasso ragion per cui si assiste, durante il cammino, alla costante azione di erosione dei bordi superiori di banda, fenomeno tanto più marcato quanto più le proprietà del materiale si discostano dal concetto di mezzo dielettrico ideale (componente complessa della permittività e conducibilità elettrica pari a zero).

Ulteriori perdite sono dovute a fattori geometrici (spreading geometrico) che portano, per la conservazione dell’energia, ad un decadimento dell’ampiezza con l’inverso della distanza dalla sorgente.

Il gain è applicato al dato tramite una curva di guadagno $G(t)$ completamente personalizzabile dall’utente in modo che, dopo l’applicazione, la traccia di uscita (T_{out}) sia abbastanza omogenea nelle ampiezze su tutti i tempi (figura 5).

In formule possiamo scrivere:

$$T_{out} = T_{in}G(t)$$

Una caratteristica della curva di guadagno è inoltre rappresentata dalla possibilità di scelta dello *starting point* che dà inizio al guadagno applicato.

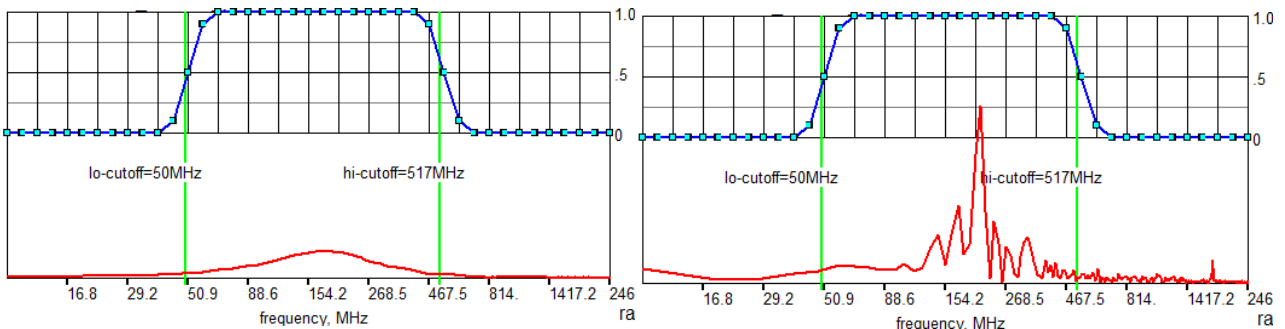
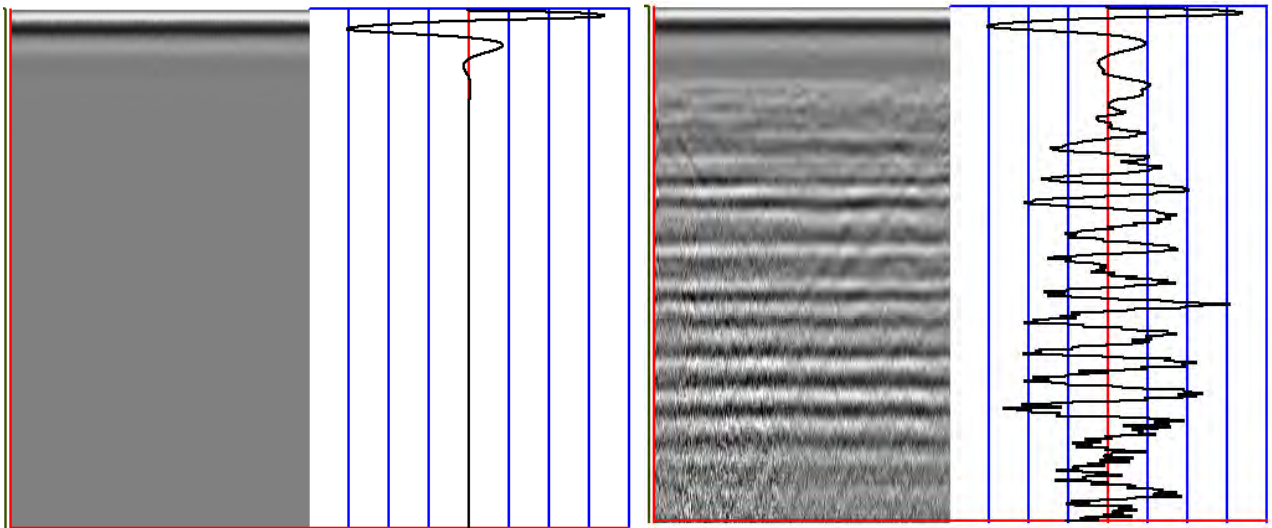


Figura 5 – In alto a sinistra, B-scan ed A-scan relative al dato non guadagnato. In alto a destra, le stesse dopo aver applicato una funzione di guadagno. In basso a sinistra, spettro di ampiezza del dato non guadagnato (linea rossa). In basso a destra, spettro di ampiezze del dato dopo l’operazione di guadagno: si noti la comparsa del picco di ampiezza a circa 200 MHz e delle frequenze esterne alla banda utile (limitata dalle linee verticali verdi).

Bandpass Filter

Dopo aver opportunamente rinvigorito ad ampio raggio il nostro segnale procediamo con la rimozione delle frequenze non di interesse, costituenti rumore, al fine di aumentare il rapporto signal to noise. Osservando lo spettro di ampiezza del segnale acquisito (figura 5 in basso a sinistra) è quindi possibile denotare i limiti di banda “utili” ed impostare quelle date frequenze di taglio finalizzate a quanto sopradetto.

Una regola empirica, spesso utilizzata, prevede che la regione passante sia simmetrica rispetto al picco della frequenza del segnale ed ampia 1.5 quest’ultimo valore (ad esempio, F pari a 200 MHz, banda 100 – 300 MHz), naturalmente è necessario considerare caso per caso.

Un ulteriore aspetto del filtraggio passa banda riguarda la forma del suo spettro di ampiezza: è preferibile una forma “trapezoidale” ad una “rettangolare” la quale causerebbe un taglio netto delle alte e basse frequenze provocando fenomeni pronunciati di *ripple* del segnale (figura 6).

Al fine di non introdurre distorsioni, la risposta in ampiezza del filtro deve essere costante all’interno della banda del segnale utile (figura 7) mentre la risposta in fase proporzionale alla frequenza (le componenti del segnale vengono ritardate tutte della medesima quantità) o a fase zero (nessun ritardo nelle componenti

del segnale). Non è possibile conoscere però la risposta in fase del filtro che si suppone (dai risultati ottenuti) tale da non introdurre distorsioni.

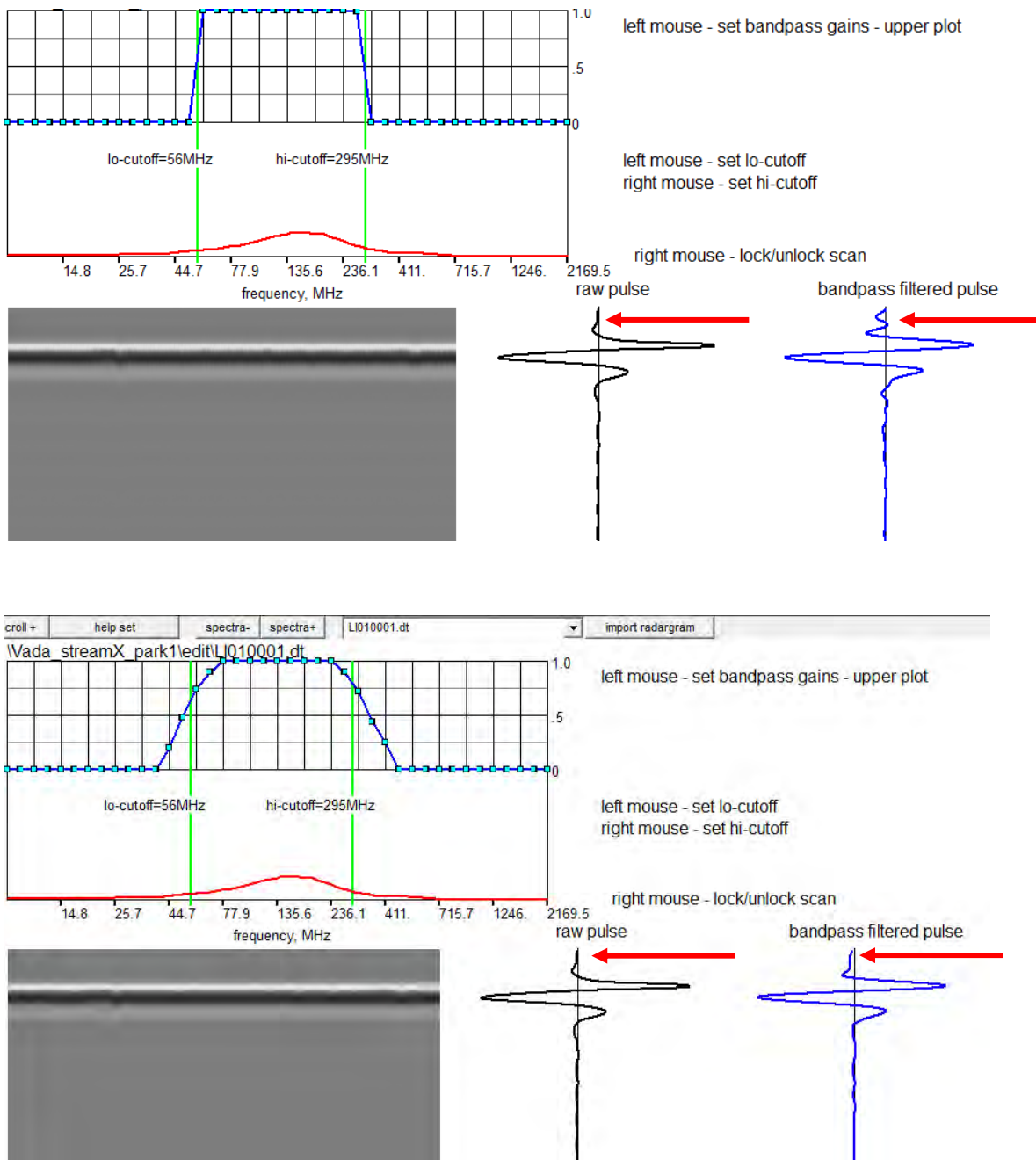


Figura 6 – Dall’alto in basso radargrammi grezzi e loro spettro di ampiezza. La forma del filtro è stata appositamente modellata affinché fosse evidente il fenomeno di *ripple*. Nell’immagine in basso le spalle risultano invece più “dolci”. L’effetto di tale operazione è visibile nelle A-scan in blu, come indicato dalle frecce

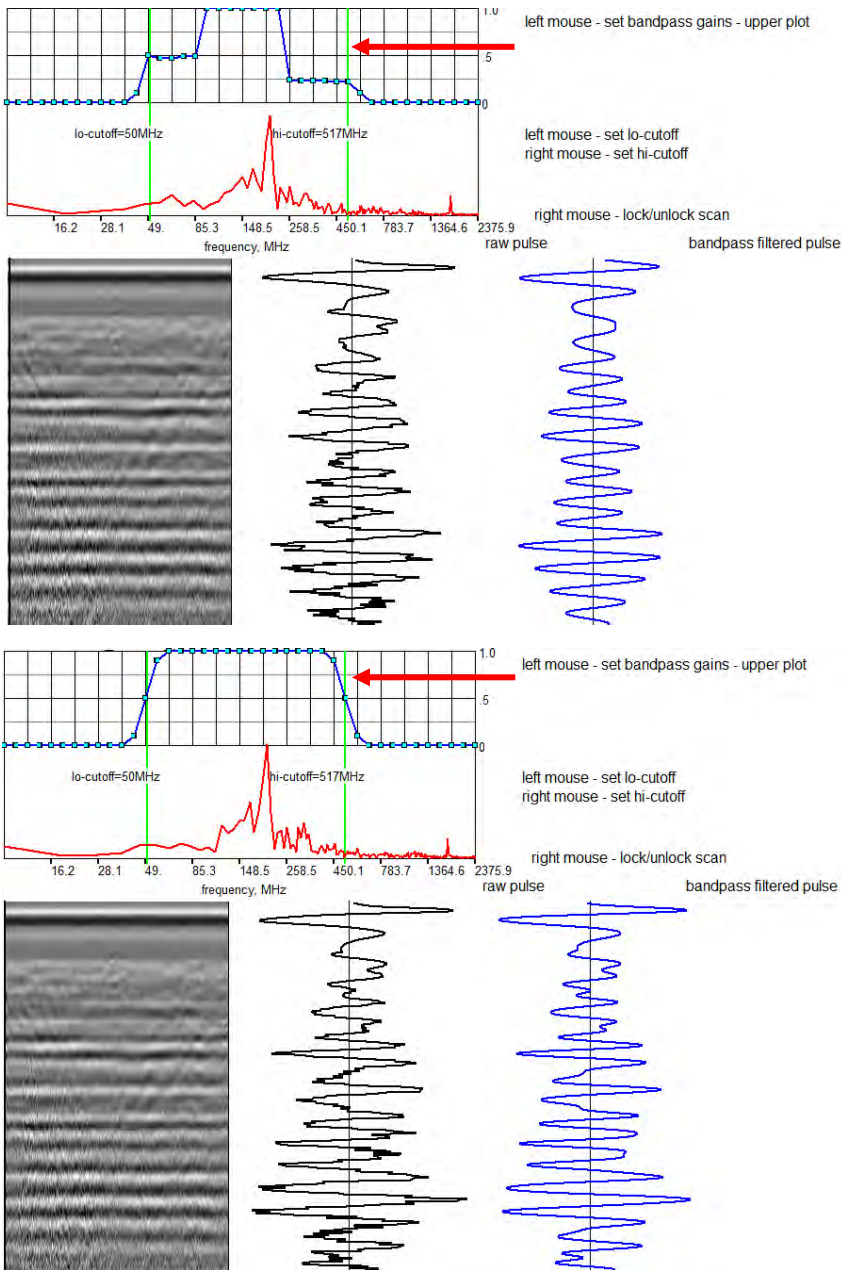


Figura 7 – In alto, spettro di ampiezza della funzione filtro (indicato dalla freccia rossa) i cui valori non sono stati mantenuti costanti all'interno della banda utile. In basso, spettro di ampiezza a valori costanti all'interno della banda utile.

Affinché il segnale non subisca distorsioni, almeno per quanto riguarda le componenti incluse in banda, è necessario disegnare un filtro (spettro di ampiezza del filtro) che sia costante su tutta la banda di interesse (immagine in basso). Un rapido confronto delle A-scan in blu tra le due immagini conferma quanto sopra detto.

In figura 8 è riportato un confronto di una porzione zoom dello stesso radargramma (dal campione 50 al campione 200) prima e dopo l'operazione di filtraggio bandpass.

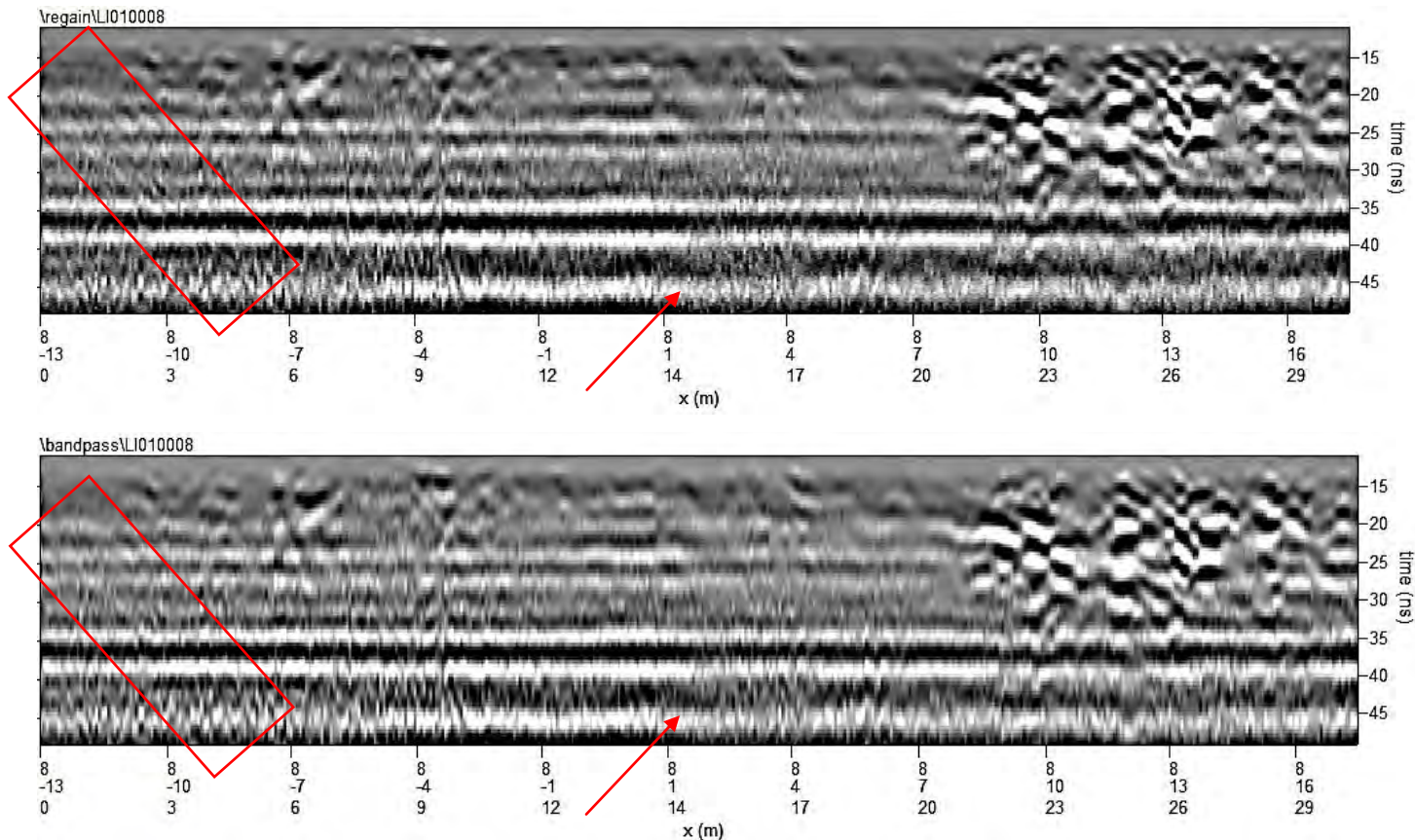


Figura 8 – In alto, radargramma guadagnato mostrato dal campione 50 al campione 200. In basso, stessa porzione dopo l’operazione di filtraggio. Per riuscire a cogliere la differenza tra i due dati bisogna confrontare le porzioni in cui il segnale si mostra ad alta frequenza (parliamo di frequenze temporali e non spaziali, il dato v  osservato in direzione verticale), considerando che solo queste possono essere mostrate interamente per pi  cicli all’interno di questa piccola finestra di visualizzazione, come indicato dalle frecce e riquadri in rosso.

Background Removal

Come mostrato in figura 5 e 7, la presenza sul radargramma delle forti bande di rumore orizzontali (*ringing noise*) inficiano la qualit  del dato rendendolo illeggibile.

L’operazione di *background removal*   quindi di fondamentale importanza per la rimozione delle componenti di rumore coerente², denominate per l’appunto, *background noise*, le quali hanno stessa frequenza del segnale utile e dunque non rimovibili con i classici filtri passabanda.

L’algoritmo opera calcolando una media delle ampiezze all’interno di una finestra prestabilita e successivamente sottrae all’intero *set* di dati. La media d’ampiezze appena calcolata rispecchier  solo gli elementi comuni a tutte le tracce mentre le riflessioni di interesse (casuali) tenderanno ad avere tra loro un’interferenza costruttiva dunque non rimosse. La sua applicazione consente per cui di mettere in risalto, ad esempio, *pattern* iperbolici o riflessioni precedentemente oscurate (figura 9).

² Rumori caratterizzati da valori d’ampiezza costanti nello spazio ad un dato istante temporale.

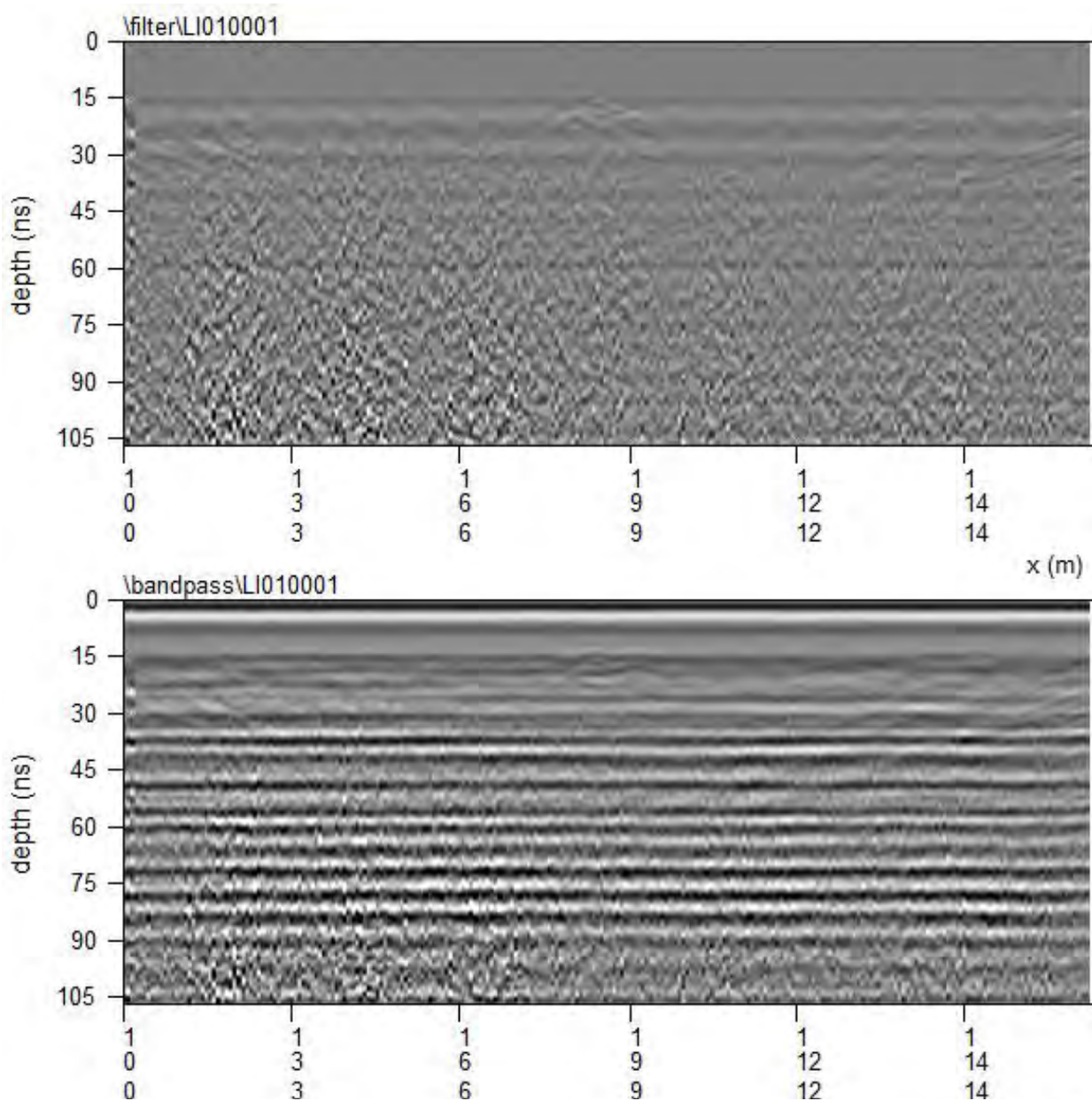


Figura 9 – In alto, radargramma depurato delle componenti di background e ringing (rappresentando dal treno di bande orizzontali occupanti la quasi totalità spaziale e temporale del nostro dato). In basso, come si presentava lo stesso ad uno step precedente.

Da un punto di vista pratico occorre selezionare i campioni d’inizio e fine su cui fare agire il filtro, in relazione all’estensione temporale del rumore, ed inoltre definire la modalità d’azione del filtro stesso.

Risulta necessario porre particolare attenzione alla scelta della lunghezza della finestra operativa in quanto se troppo piccola, rispetto al numero di tracce (in ascissa), potremmo eliminare segnale utile mentre una finestra troppo grande, in termini di campioni (in ordinata), potrebbe rimuovere riflessioni isocrone d’interesse.

In termini matematici, il background removal genera la seguente traccia filtrata (Daniels, *Ground Penetrating Radar*, 2004):

$$A'_{n,a}(t) = A_{n,a}(t) - \frac{1}{N_a} \sum_{a=1}^{N_a} A_{n,a}(t)$$

dove

n = da 1 a N , con N = numero di campioni

a = da 1 ad N_a , con N_a = numero di A-scan

$A'_{n,a}(t)$ = A-scan processata

$A_{n,a}(t)$ = A-scan non processata

Come si nota in figura 9, le bande di rumore coerente interessano l'intero radargramma obbligando per cui ad impostare una larghezza del filtro pari alla totalità delle A-scan ed una lunghezza uguale al numero di campioni.

Come conseguenza di quanto appena detto, qualsiasi evento orizzontale dotato di una certa continuità è stato alterato a seguito di tale operazione suggerendoci, in questo caso, la necessità di adottare strategie diverse per la rimozione delle suddette bande.

Spiking Deconvolution

L'operazione qui descritta, da un punto di vista ideale, è un processo volto alla produzione di una sezione ad alta risoluzione temporale della traccia acquisita a seguito di una compressione temporale della forma d'onda (corrispondente nel dominio della frequenza ad un allargamento di banda), eliminando l'effetto dovuto all'onda sorgente e dunque lasciando come risultato la traccia di riflettività (Yilmaz, 2001).

In ambito GPR le assunzioni base del modello convoluzionale sono molto restrittive: l'ondina GPR è difficilmente a fase minima (comportando instabilità numerica all'operatore deconvoluzionale) ed è soggetta a forti perdite energetiche che portano, velocemente nel tempo, ad un restringimento della banda di frequenza.

Ciò ha portato a lunghi dibattiti relativi all'utilità delle tecniche di deconvoluzione nel processing GPR, sostenuta da autori quali *Annan* (1993), *Conyers & Goodman* (1997) e non da altri (*Daniels*, 1996).

La deconvoluzione può comunque essere utile nel caso in cui sia possibile determinare accuratamente la forma dell'onda sorgente, ad esempio dall'analisi dell'*airwave* (*Malagodi*, 1996; *Neves*, 1996).

Quanto detto costituisce un problema, non è infatti possibile determinare correttamente quest'ultima. L'approccio scelto consiste nel sopporre la riflessione del background rilevata dal radargramma grezzo, immediatamente dopo la correzione del drift, come un'approssimazione dell'onda sorgente (figura 10).

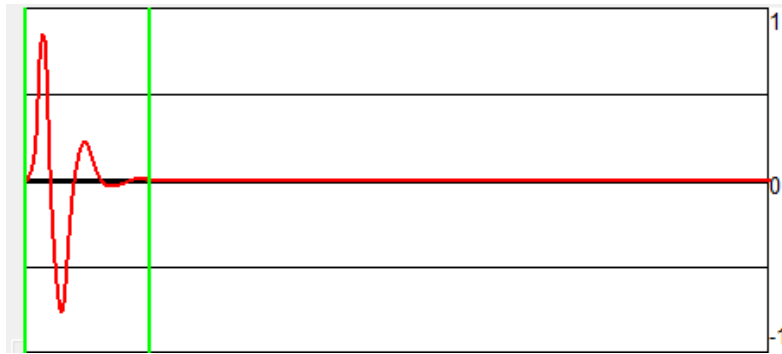


Figura 10 – Approssimazione dell'onda sorgente (delimitata dalle linee in verde) ricavata finestrando l'onda di background. L'operatore deconvoluzionale sarà dato dall'inverso dell'ondina sorgente (nel dominio temporale) dunque, una corretta stima di quest'ultima, permetterà di ottenere risultati migliori.

Lo spettro di ampiezza dell'operatore deconvoluzionale è (approssimativamente) l'inverso dello spettro di ampiezza dell'ondina determinata. Quest'ultimo è applicato all'intera traccia restituendo in uscita lo spettro di ampiezza della traccia deconvoluta il quale si mostrerà all'incirca bianco.

Un ulteriore problema è rappresentato dalla non stazionarietà dell'onda la quale durante la sua propagazione, perdendo le alte frequenze, restringe la sua banda (problema parzialmente ridotto a seguito del recupero delle ampiezze attraverso l'operazione *gain*).

La mutazione in forma ed in ampiezza dell'ondina, durante la sua propagazione, può essere definita come una caratteristica tempo variante; ne consegue che la migliore deconvoluzione (ai sensi del risultato ottenuto) da applicare al dato, tenente quindi in considerazione le proprietà di non stazionarietà, è ottenuta tramite suddivisione in più finestre temporali dell'intera traccia, trovando così diversi operatori deconvoluzionali da applicare ai corrispondenti *gates* temporali.

I risultati ottenuti sull'intero radargramma saranno comunque mostrati in figura 11.

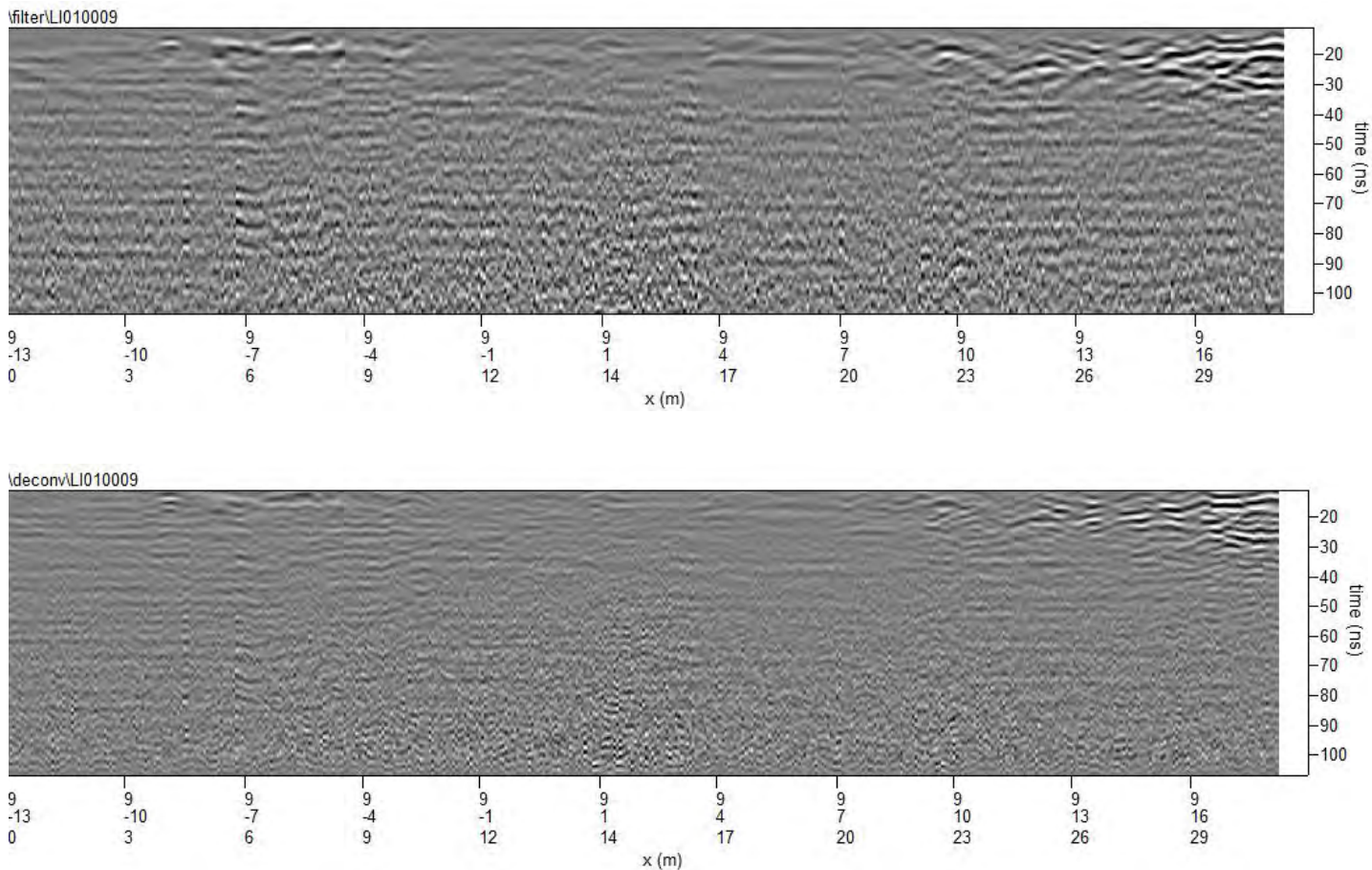


Figura 11 – Radargramma pre e post deconvoluzione rispettivamente in alto ed in basso. Leggere migliori vengono apportate in questo caso al dato osservabili nella migliore risoluzione dell’immagine (porzione superiore destra ad esempio).

Boxcar Filter

Per limitare l’influenza di rumore non coerente, presente nei radargrammi in esame e avente frequenza compresa nella banda utile, è possibile utilizzare un filtro *boxcar*, attuante una media mobile tra i dati in direzione spaziale.

L’altezza e la larghezza del *boxcar* definiscono le dimensioni di tale filtro; considerando un filtro avente dimensioni $N \times M$ (relative alle righe e colonne del filtro) l’effetto filtrante interesserà $2M + 1$ A-scan ed N campioni in verticale di ogni A-scan, svolgendo una media aritmetica mobile e sostituendo quest’ultima al valore centrale interessato.

Il processo è iterativo, la finestra viene traslata orizzontalmente traccia per traccia, dalla prima all’ultima A-scan, per poi essere spostata rigidamente di una campione in verticale.

L’effetto complessivo del *boxcar filter* comporterà dunque uno smussamento del radargramma senza alterarne le informazioni utili. Al fine di non smorzare eccessivamente le ampiezze di interesse viene impostata una dimensione della matrice pari ad 1×1 (trattando così 3 tracce ed un campione per volta) restituendo in tal modo un dato meno rumoroso (effetto del filtraggio) mantenendo al contempo le riflessioni di interesse (effetto dovuto alle dimensioni matriciali). Il risultato è mostrato in figura 12.

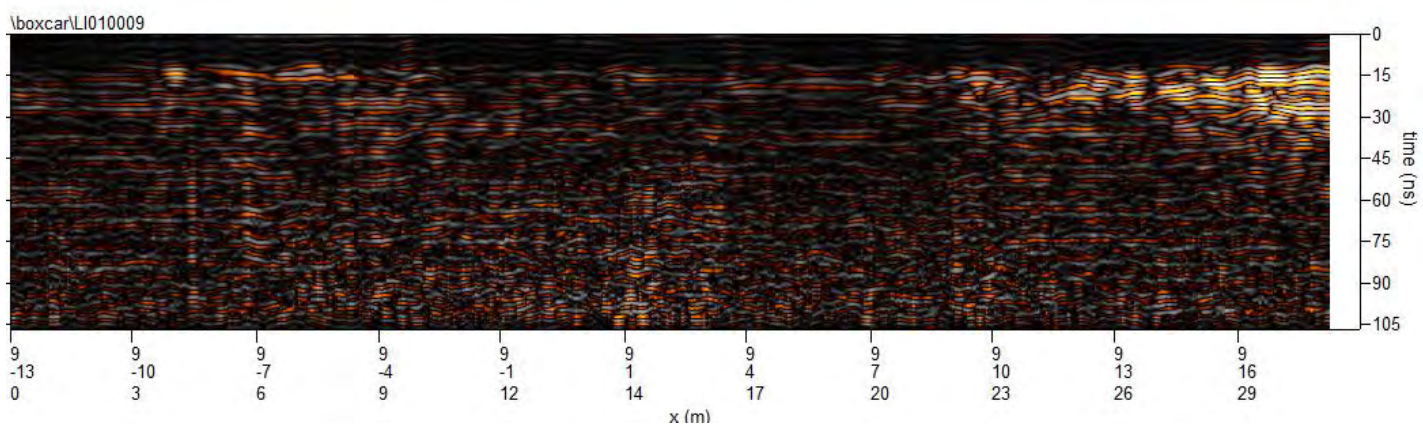
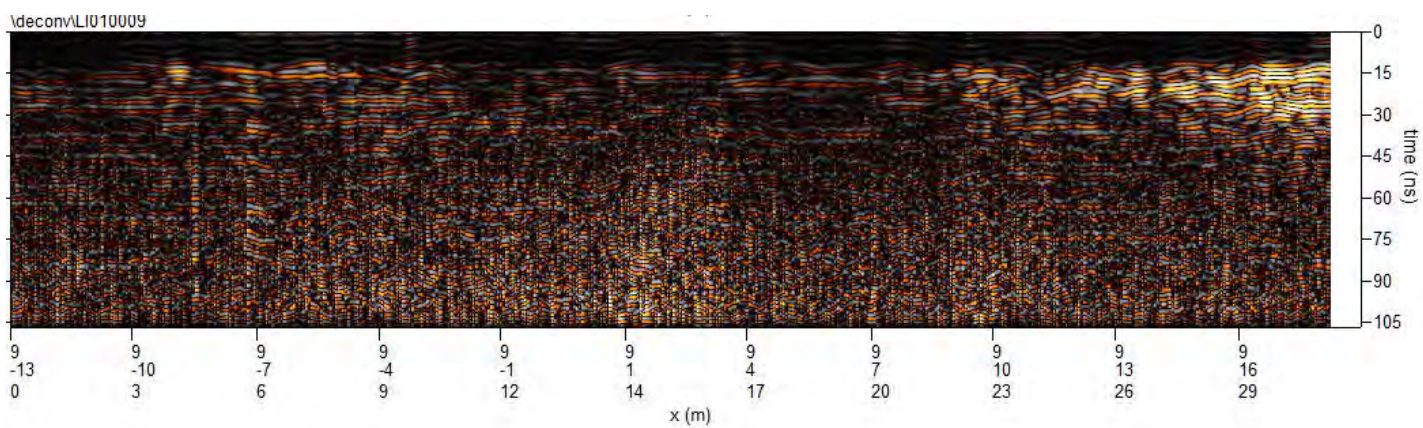
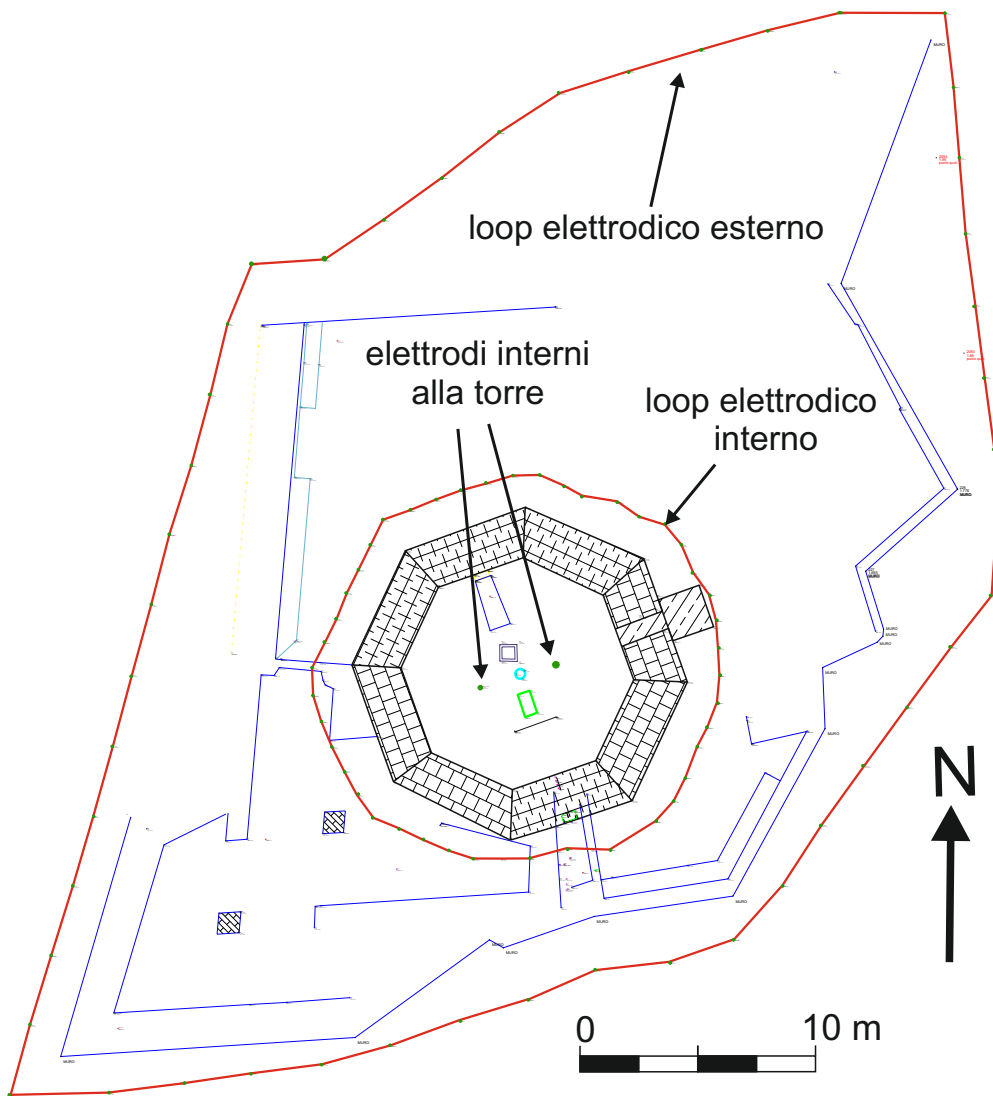


Figura 12 – Effetto del filtro boxcar, particolarmente visibile a tempi maggiori dove il rumore ha un effetto predominante. L'effetto dell'operazione è una generale attenuazione della componente di rumore lasciando quasi inalterate le riflessioni coerenti, portando quindi ad una complessiva enfaticazione del segnale utile.

Tavola 1

INDAGINE ERT



INDAGINE GPR

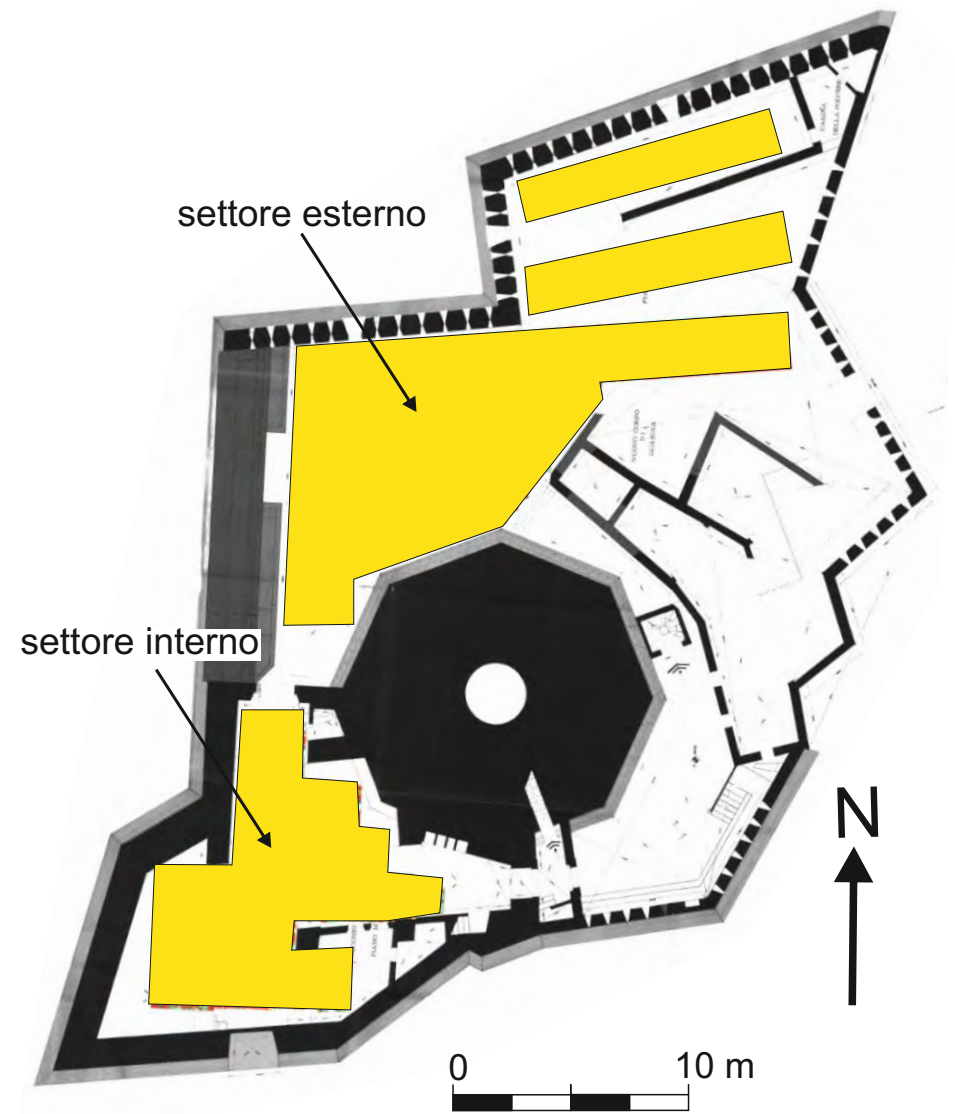


Tavola 2

Sezione ERT orizzontale -0.5 m

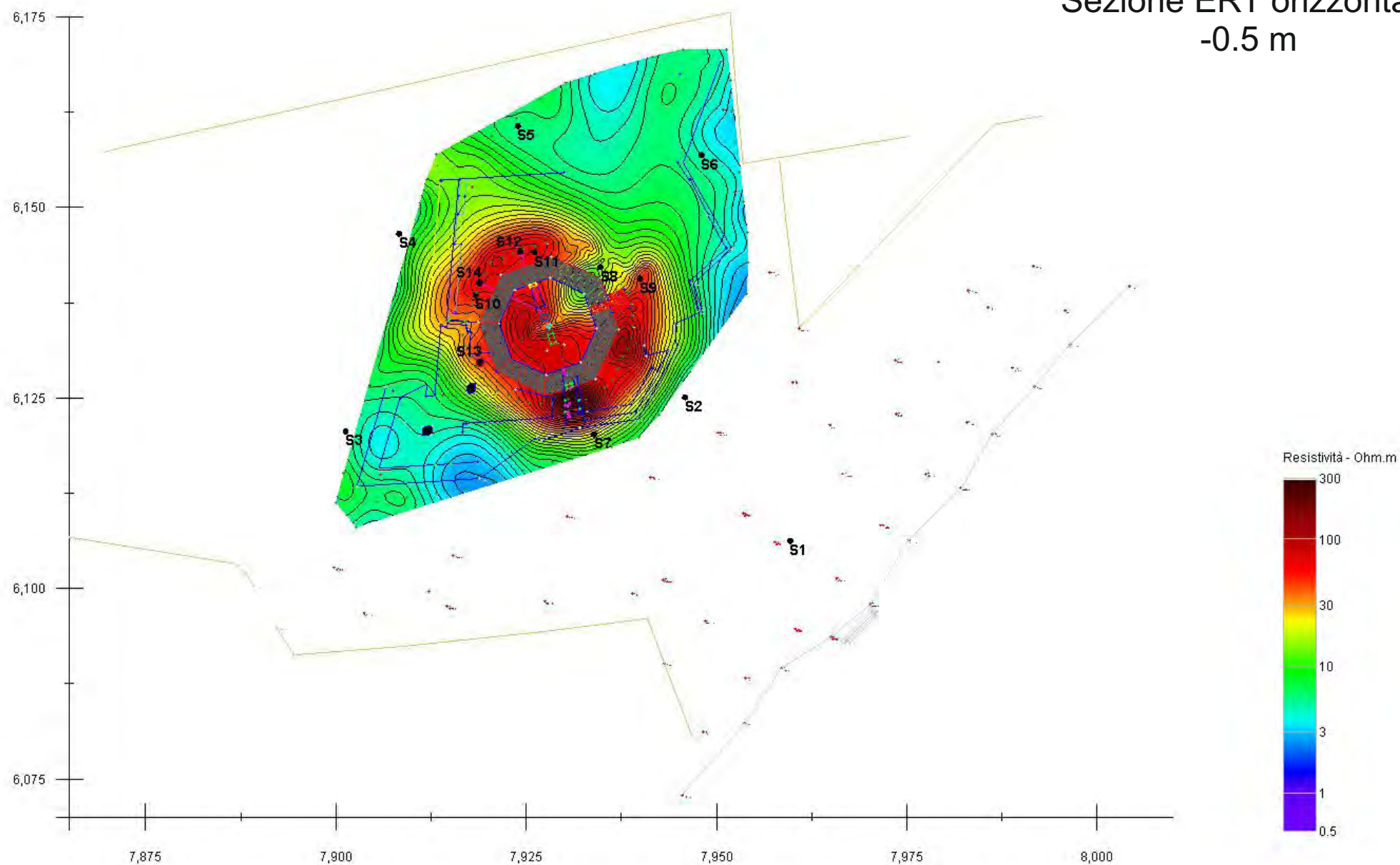


Tavola 3

Sezione ERT orizzontale -1 m

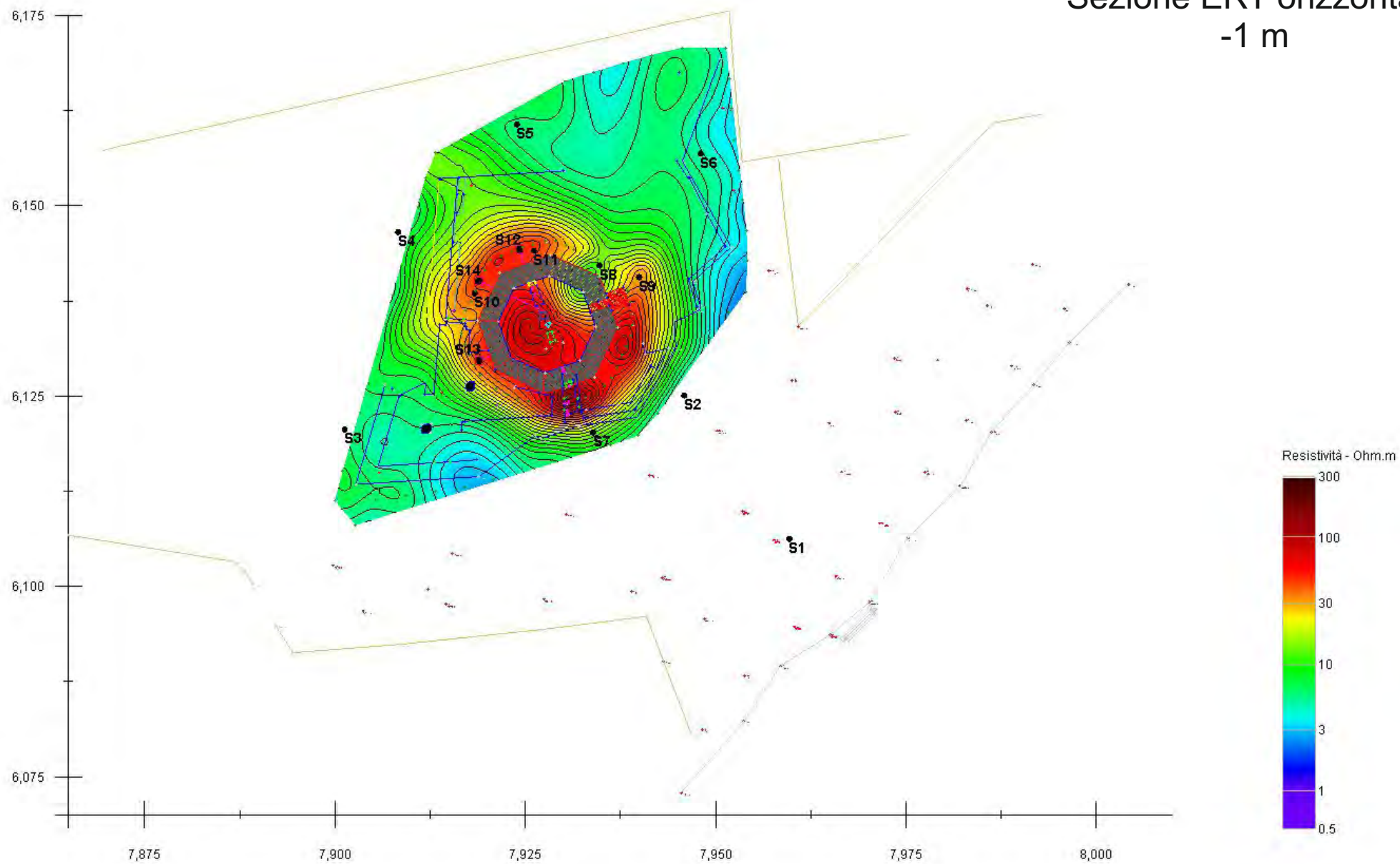


Tavola 4

Sezione ERT orizzontale -1.5 m

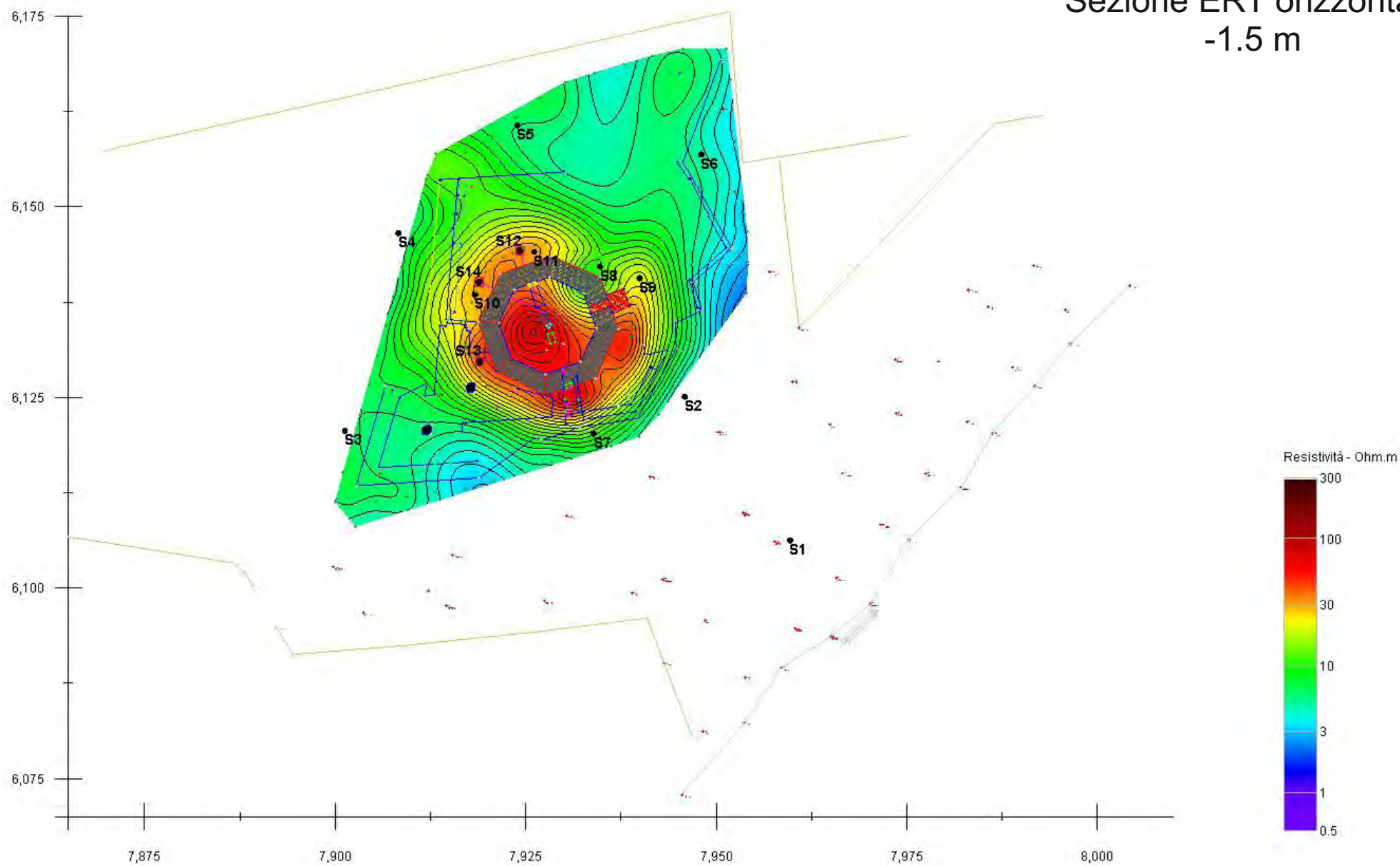


Tavola 5

Sezione ERT orizzontale -2 m

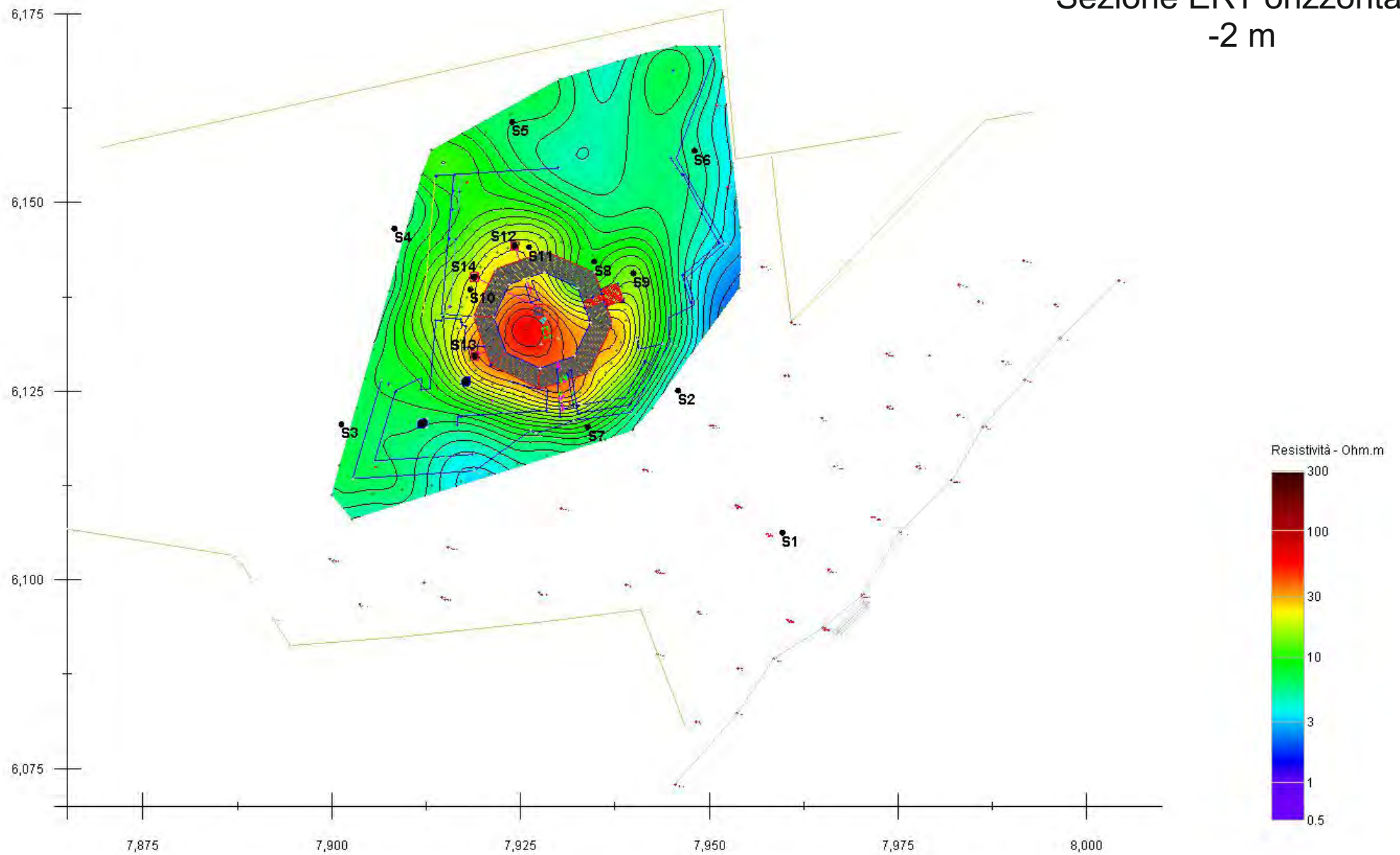


Tavola 6

Sezione ERT orizzontale -2.5 m

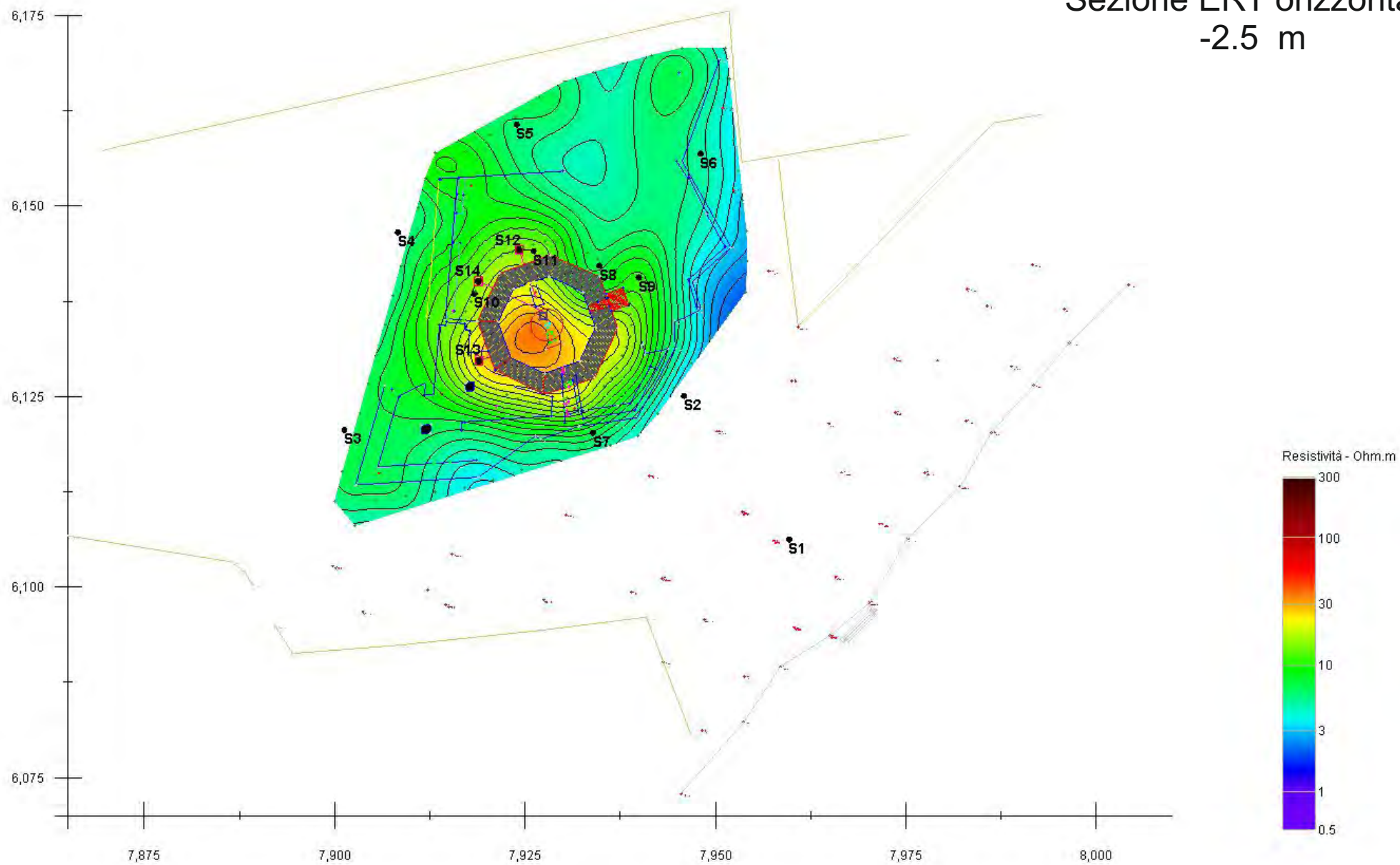


Tavola 7

Sezione ERT orizzontale -3 m

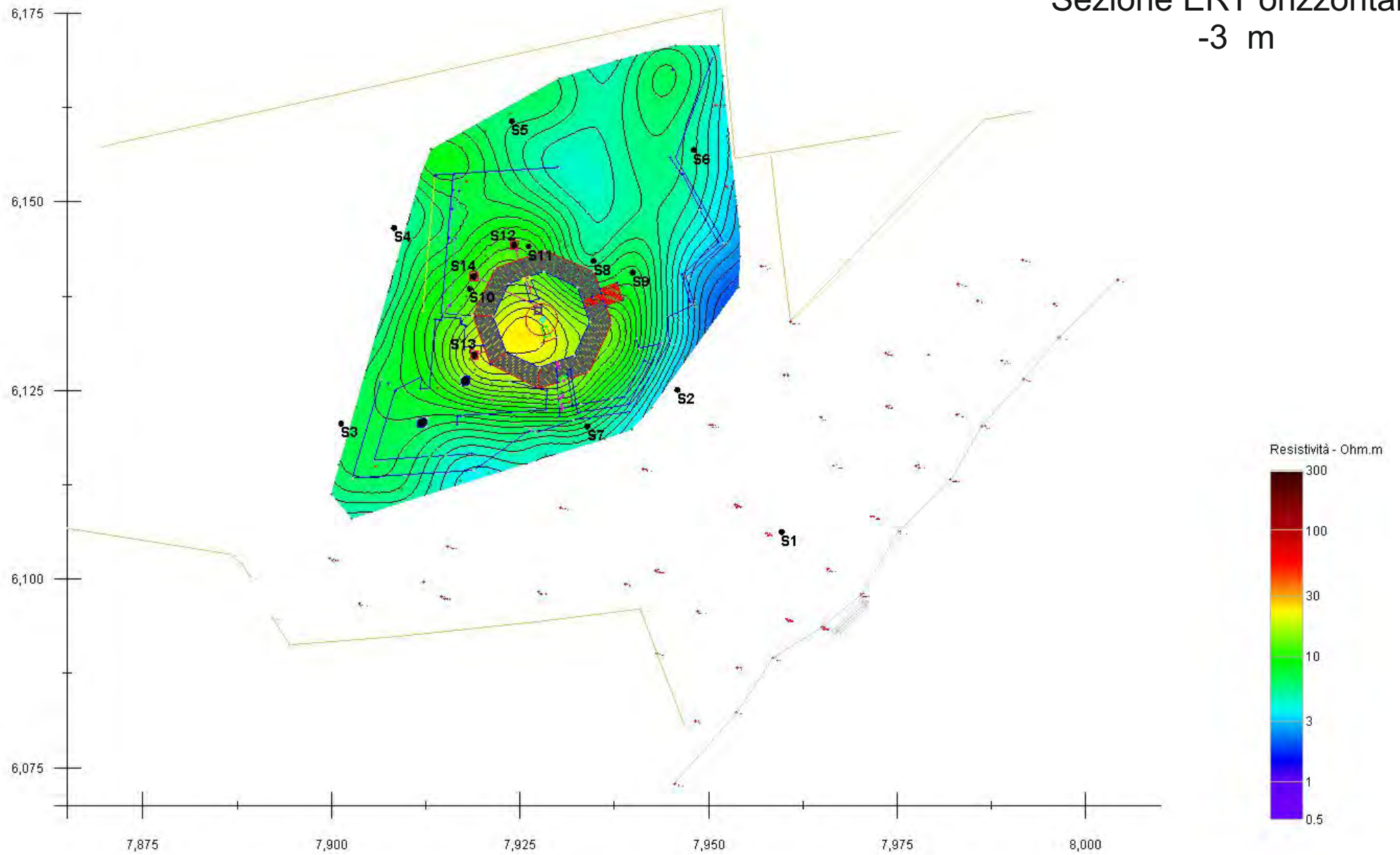


Tavola 8

Sezione ERT orizzontale -3.5 m

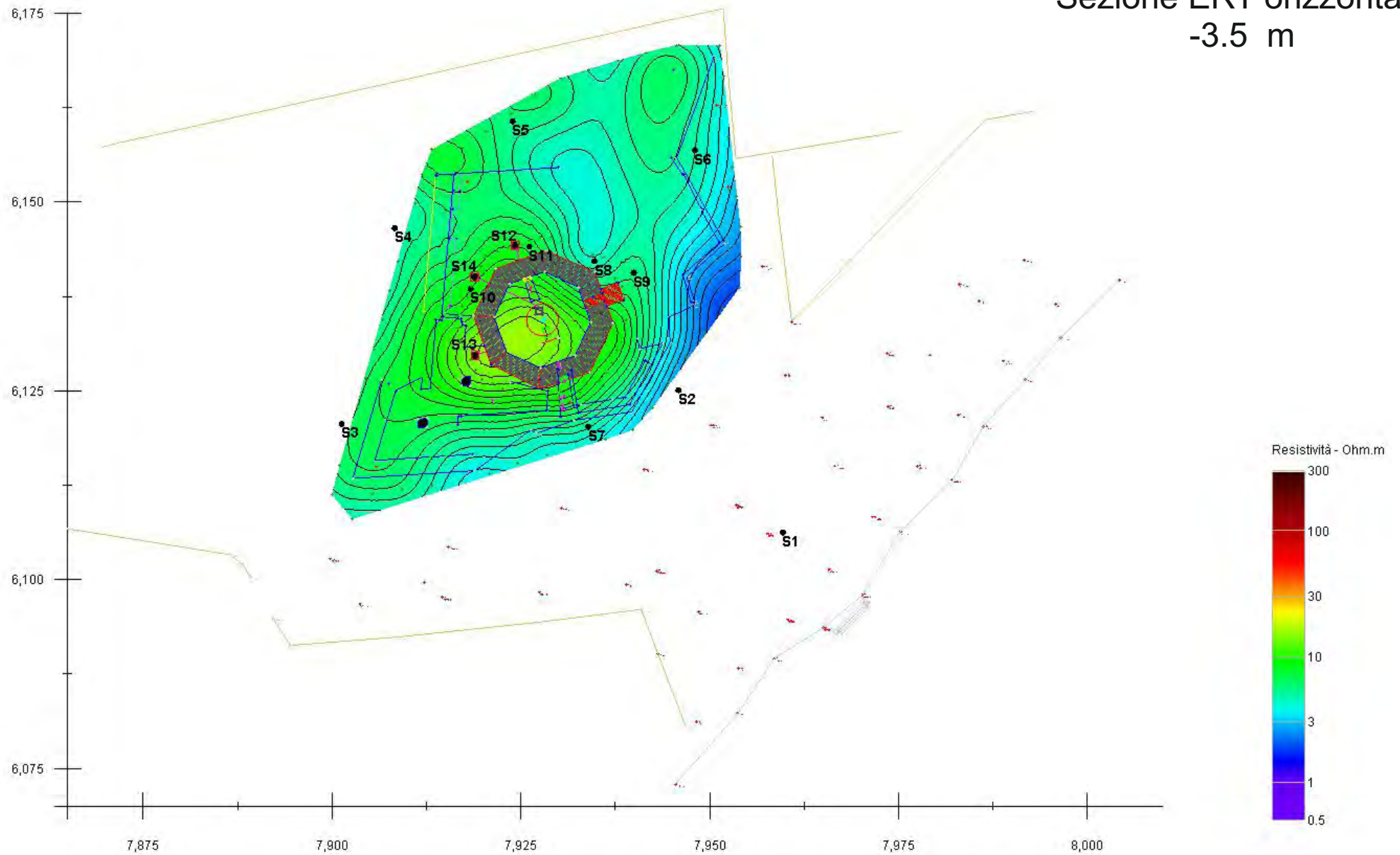


Tavola 9

Sezione ERT orizzontale -4 m

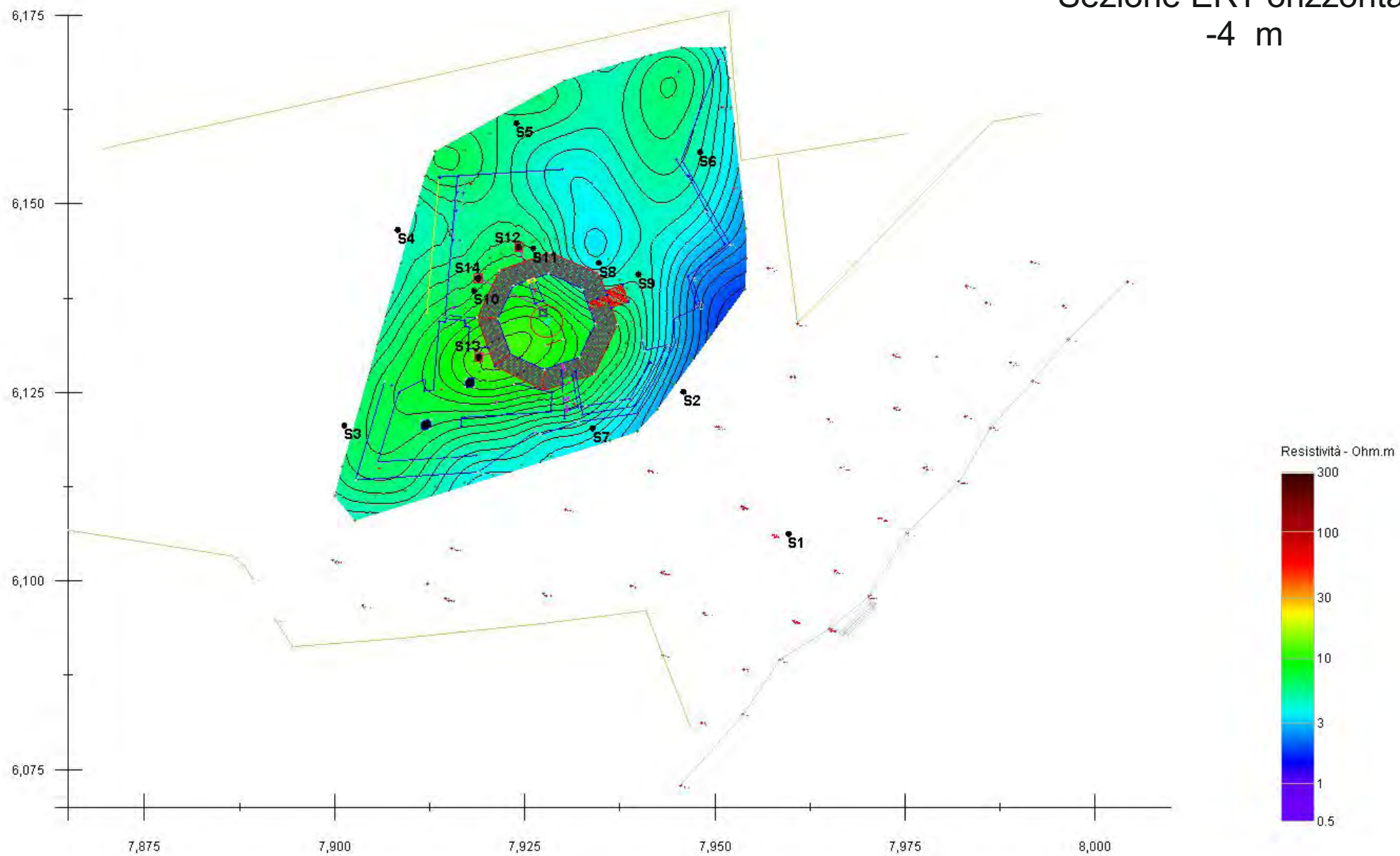


Tavola 10

Sezione ERT orizzontale -4.5 m

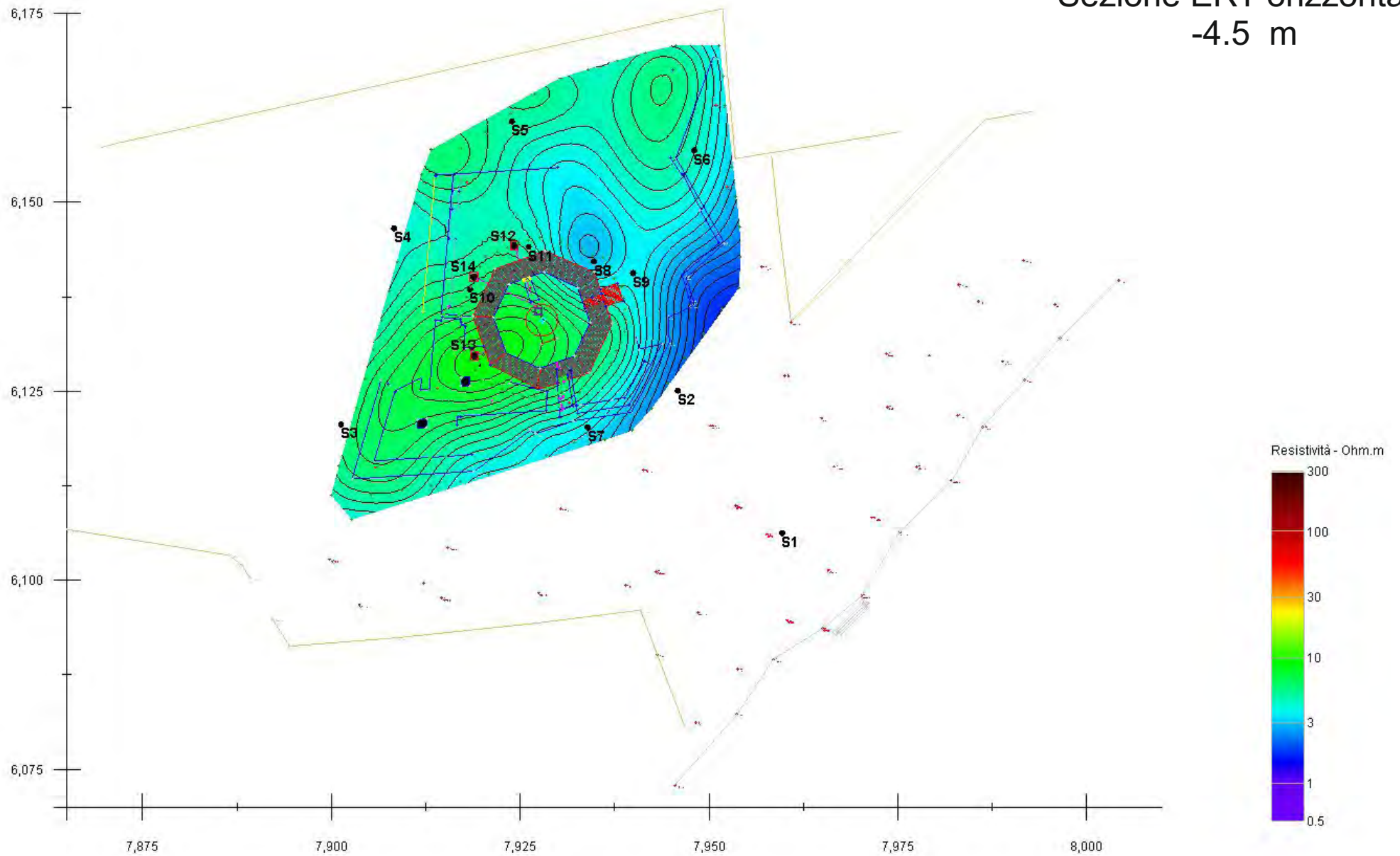


Tavola 11

Sezione ERT orizzontale -5 m

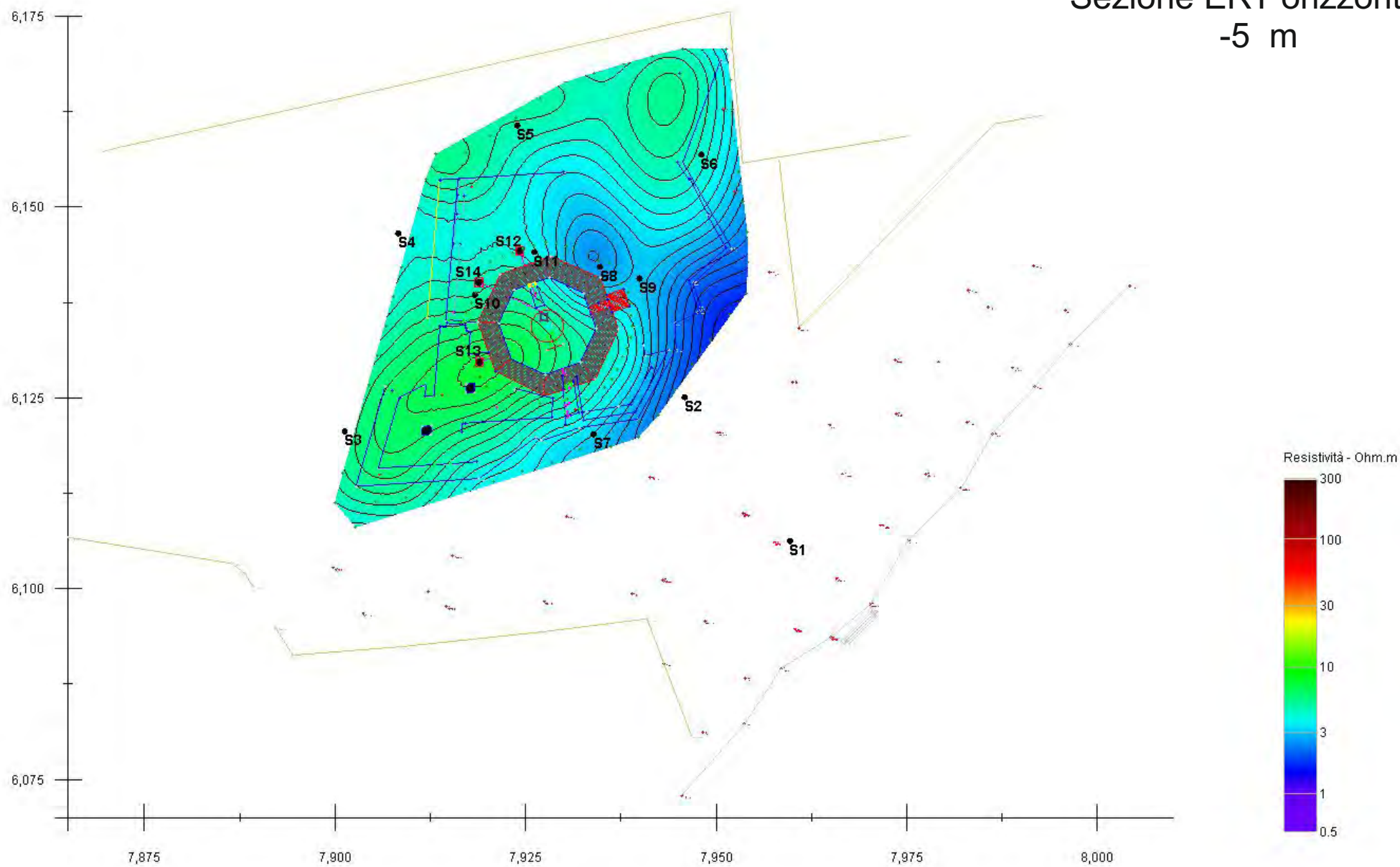


Tavola 12

Sezione ERT orizzontale -5.5 m

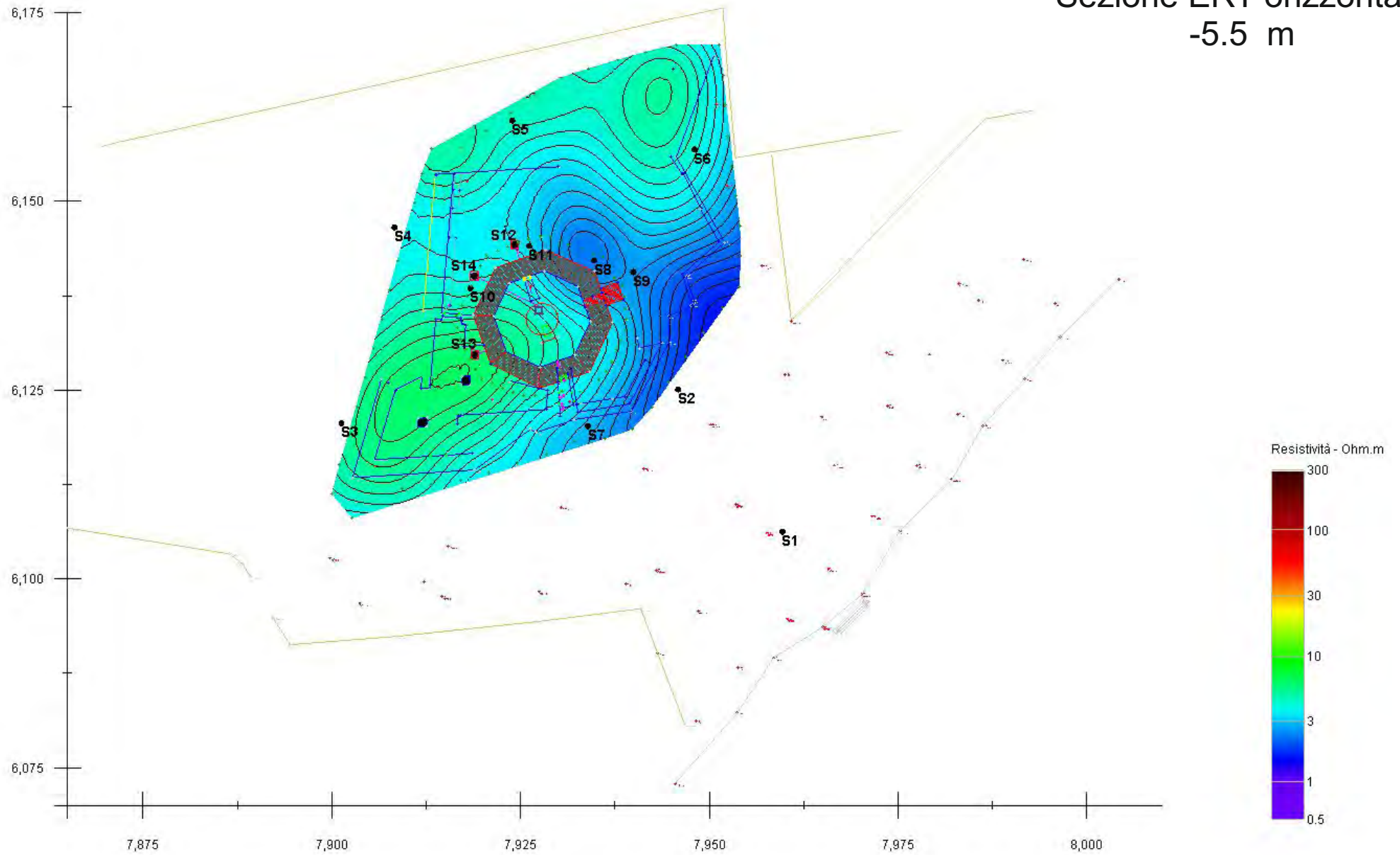


Tavola 13

Sezione ERT orizzontale -6 m

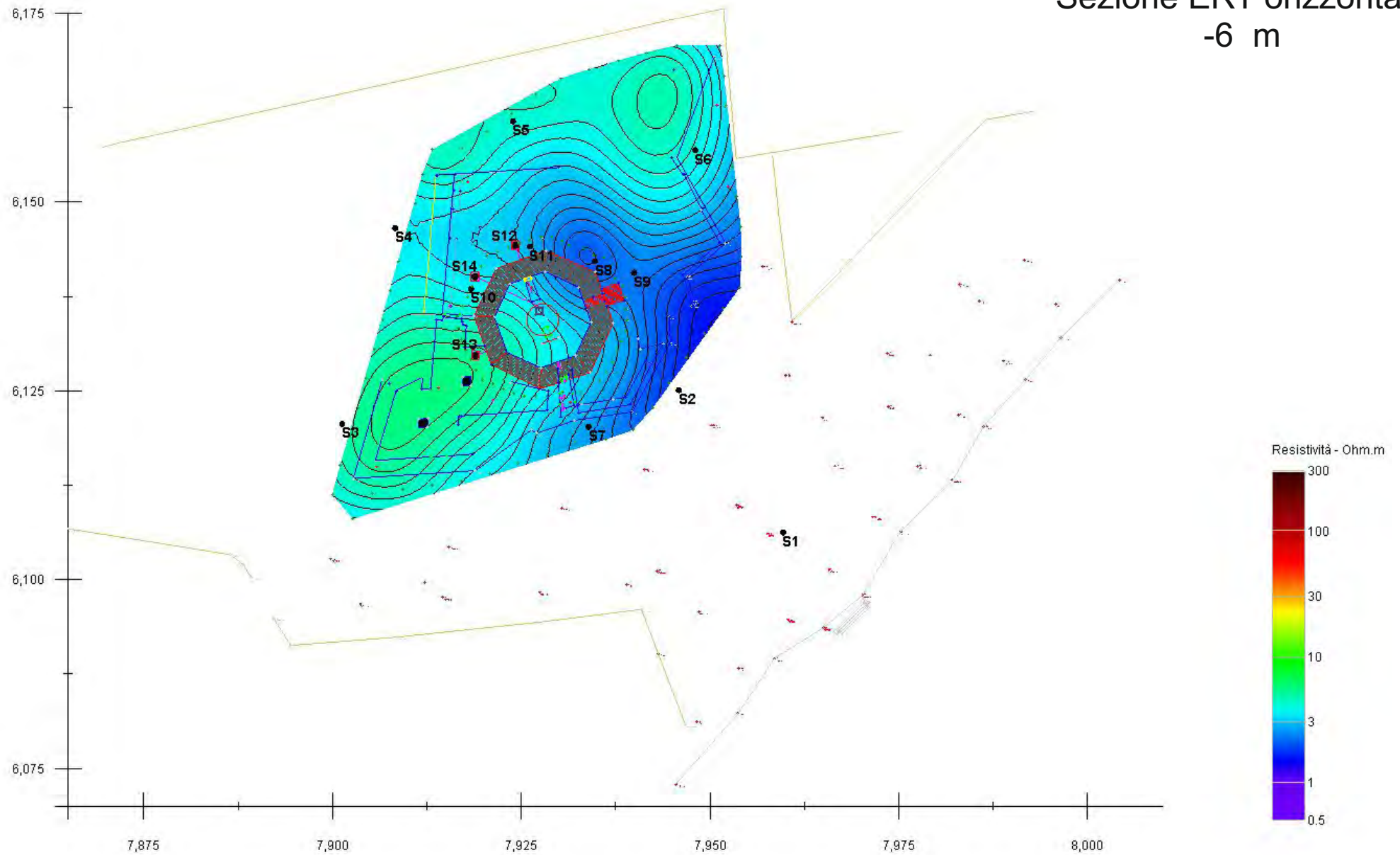


Tavola 14

Sezione ERT orizzontale -6.5 m

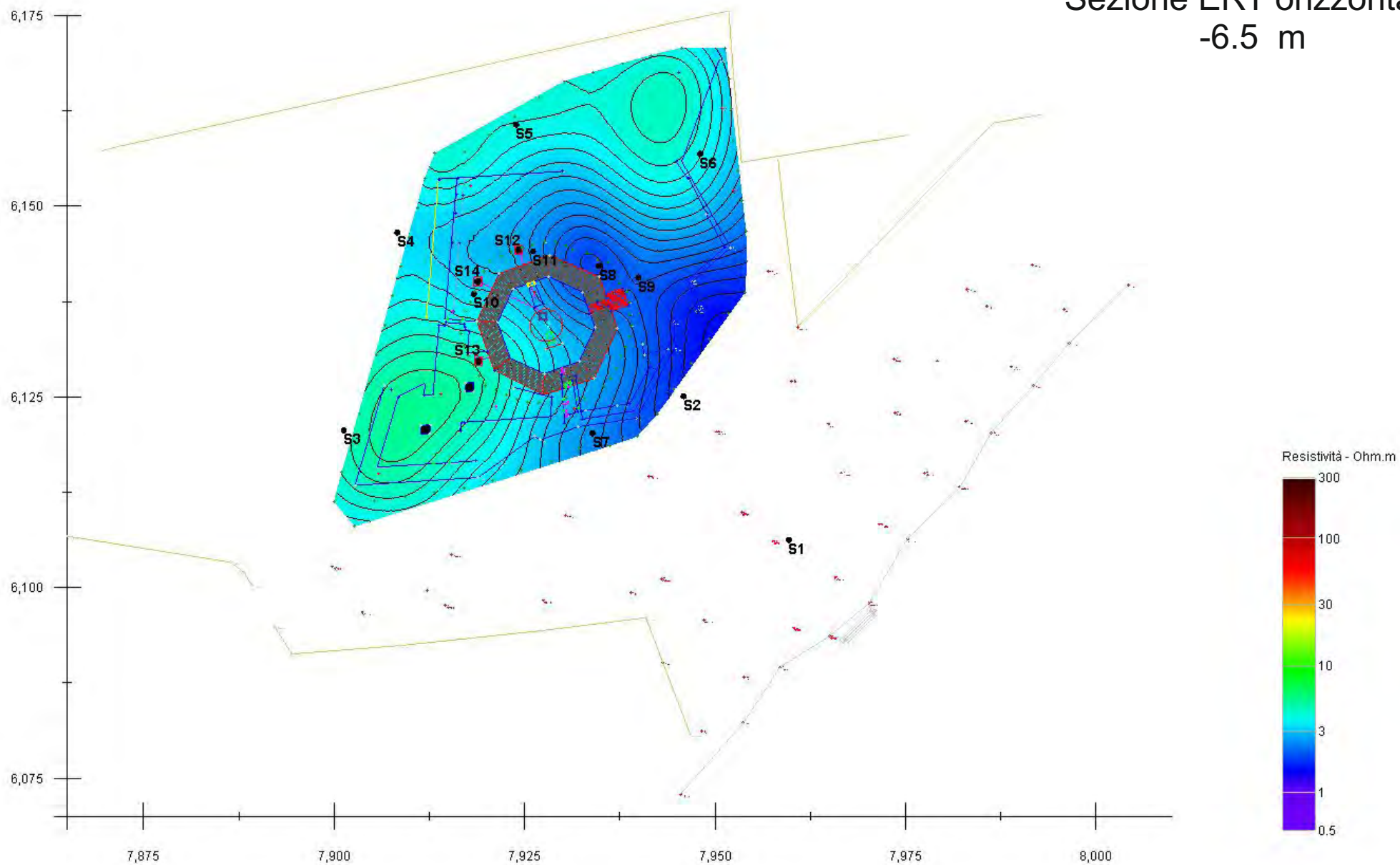


Tavola 15

Sezione ERT orizzontale -7 m

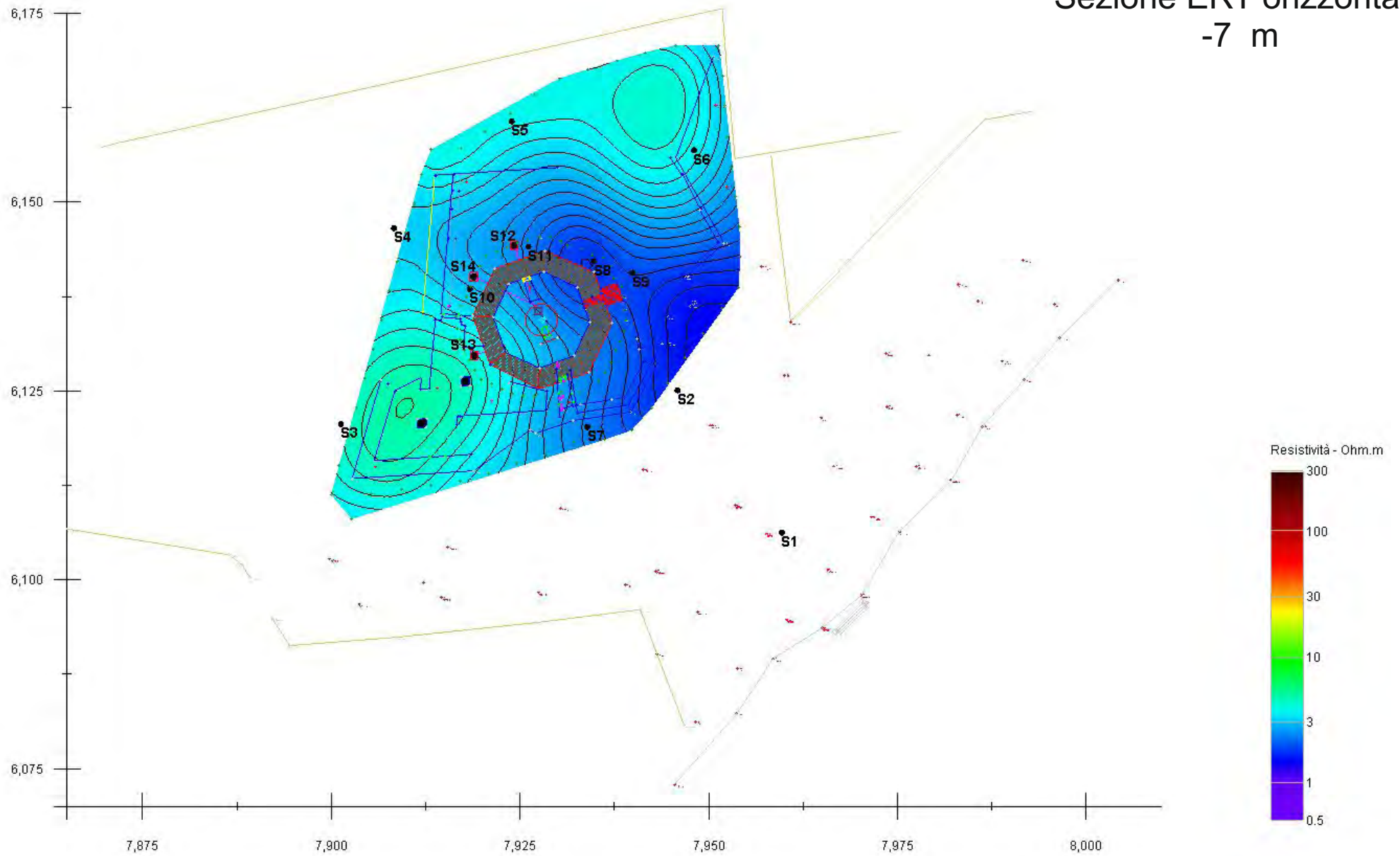


Tavola 16

Sezione ERT orizzontale -7.5 m

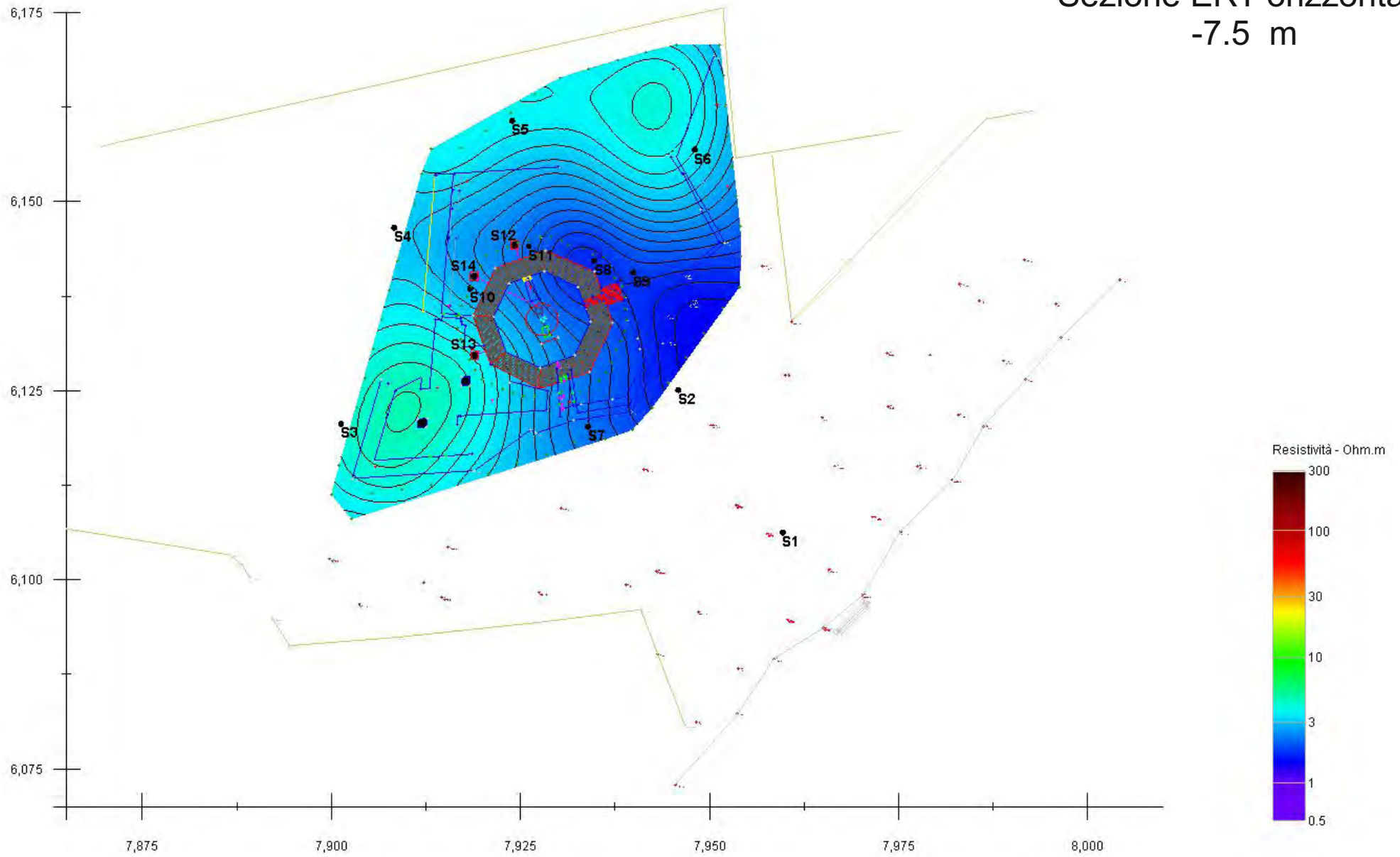


Tavola 17

Sezione ERT orizzontale -8 m

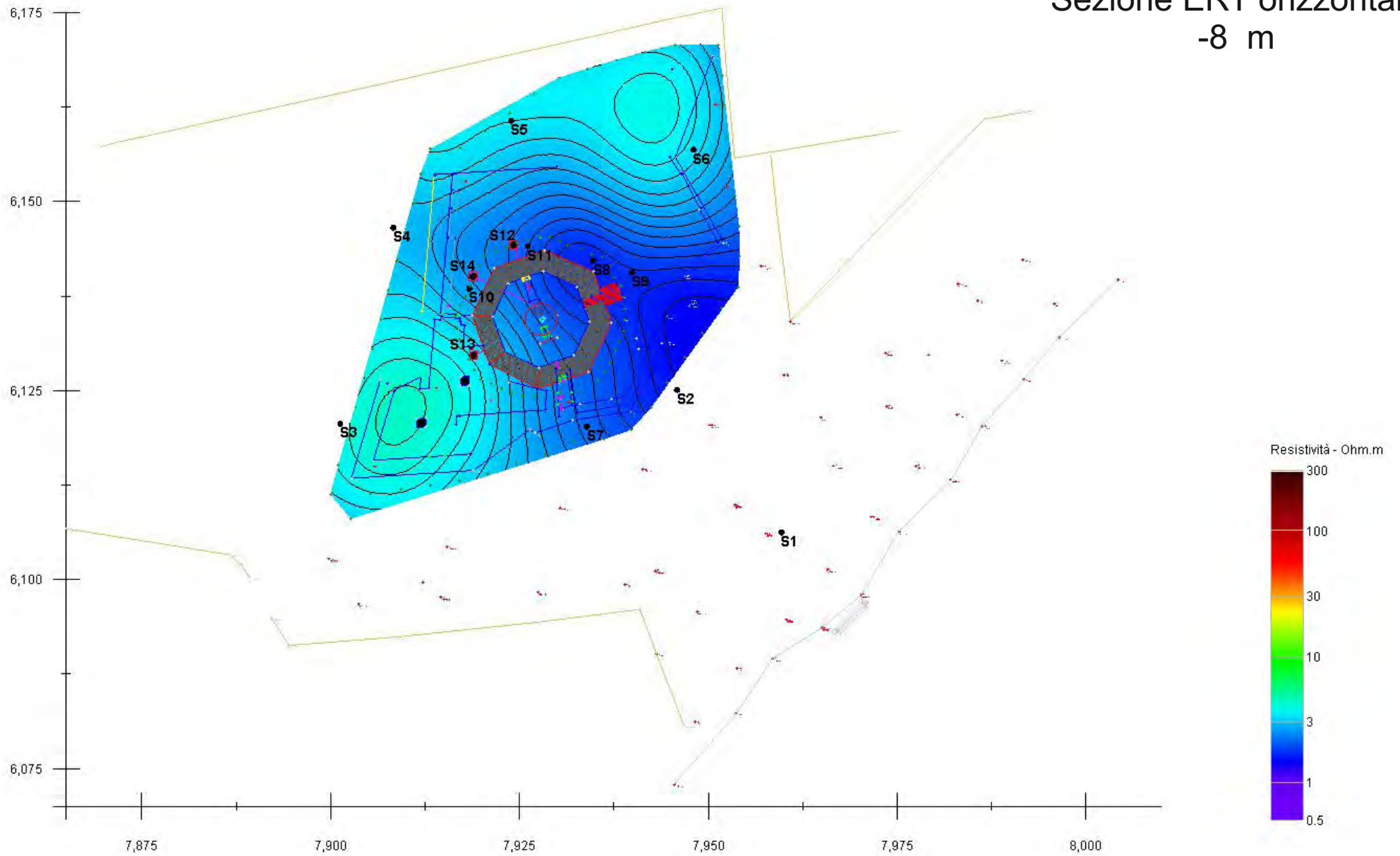


Tavola 18

Sezione ERT orizzontale -8.5 m

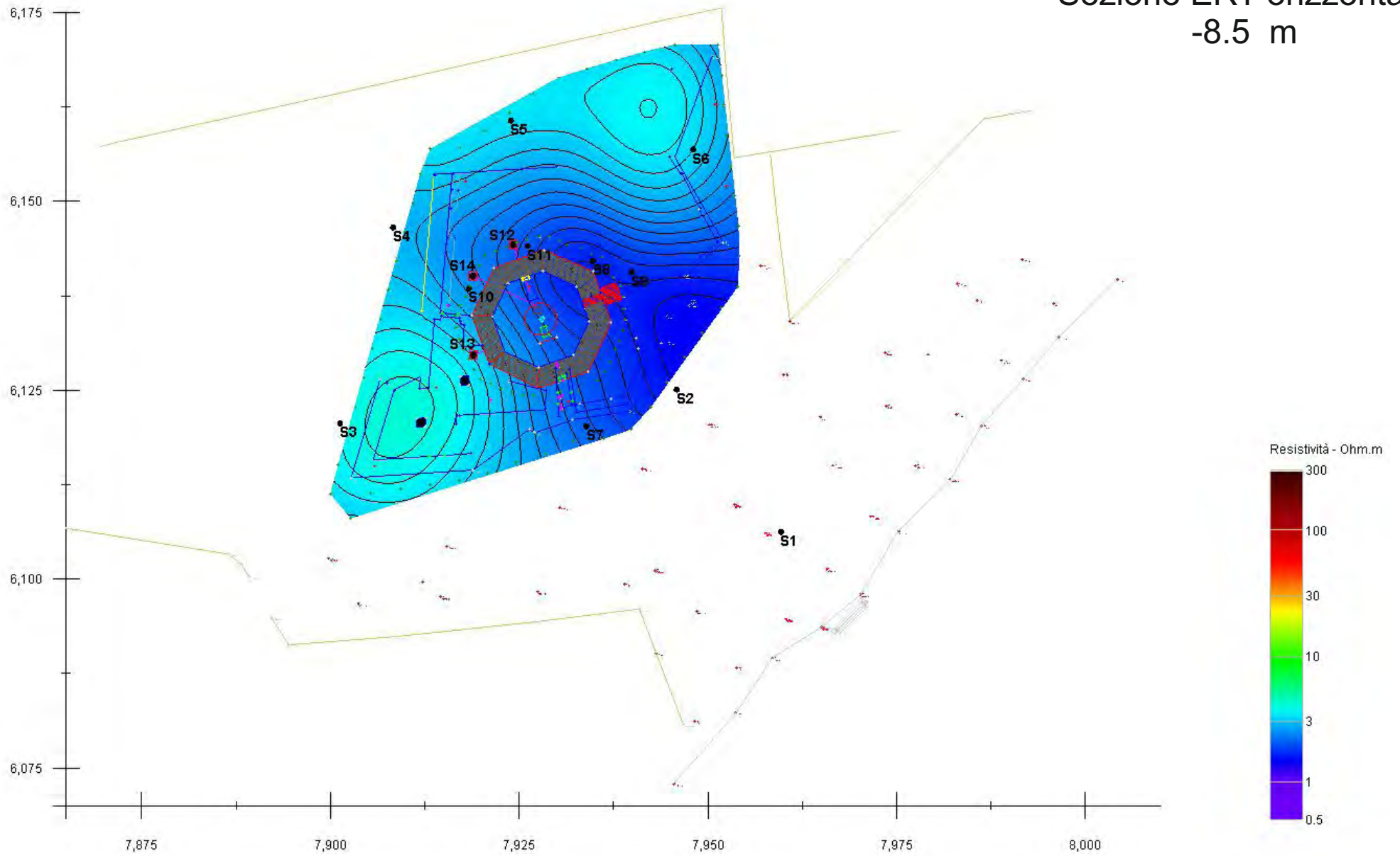


Tavola 19

Sezione ERT orizzontale -9 m

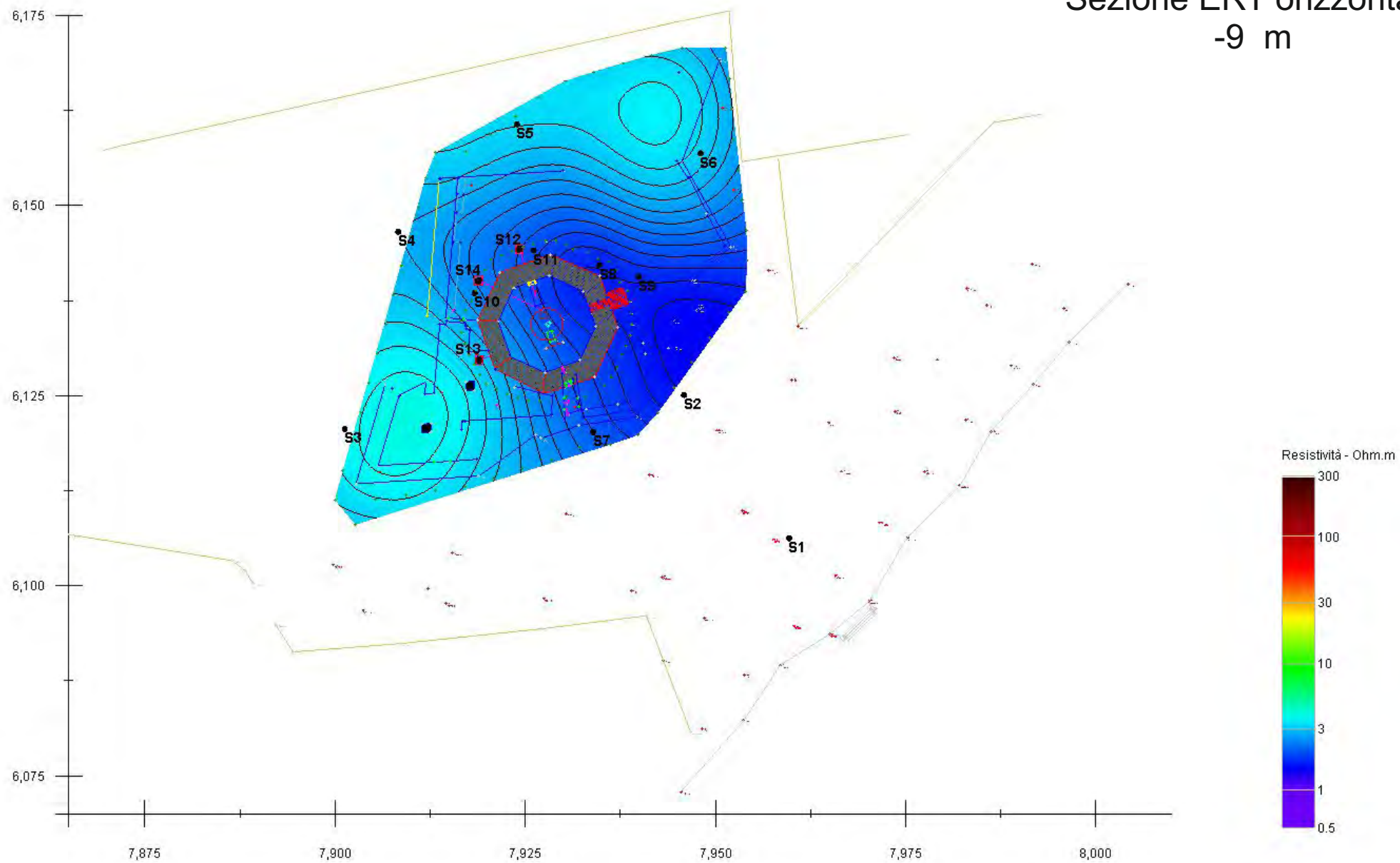


Tavola 20

Sezione ERT verticale

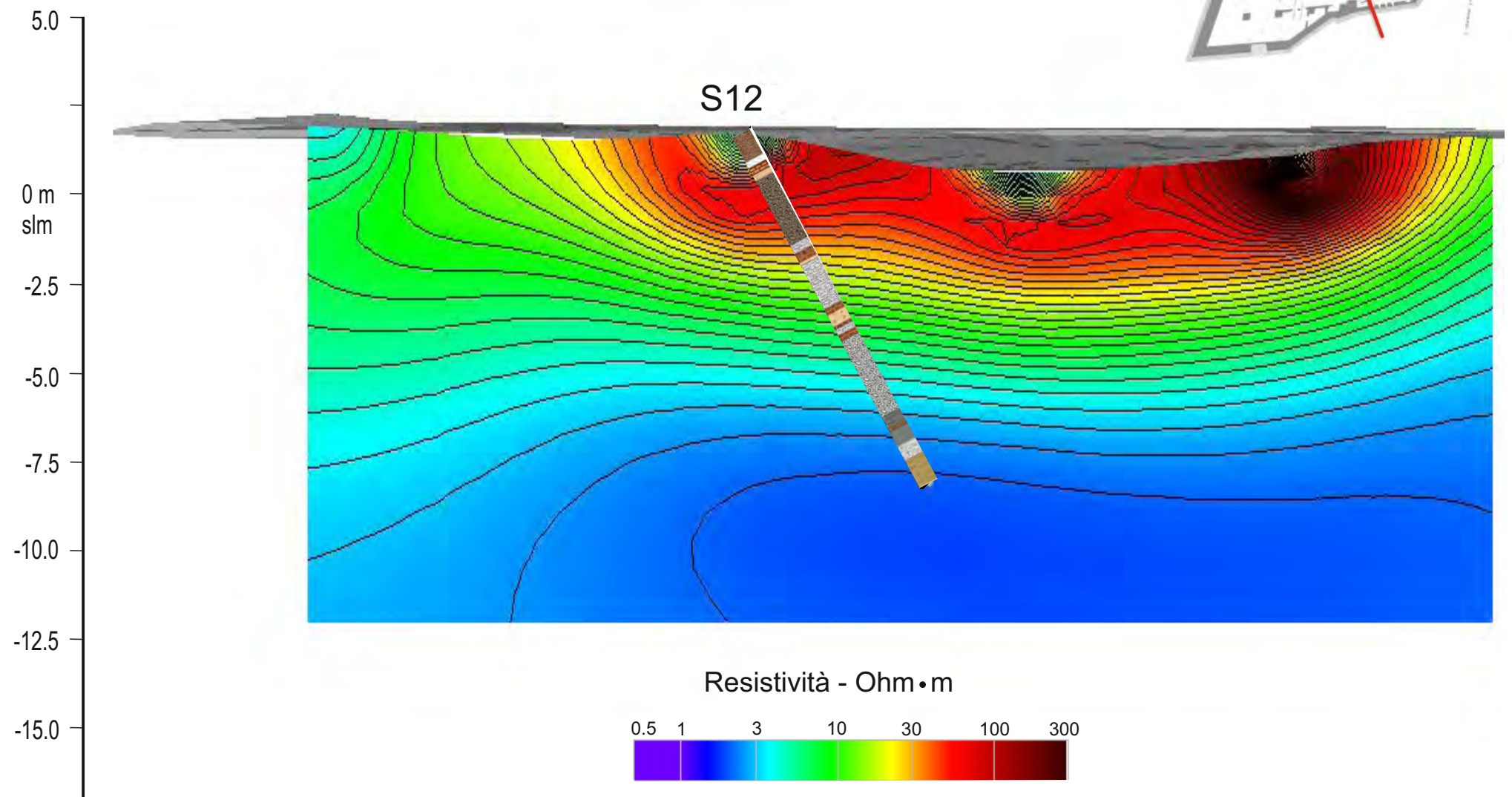
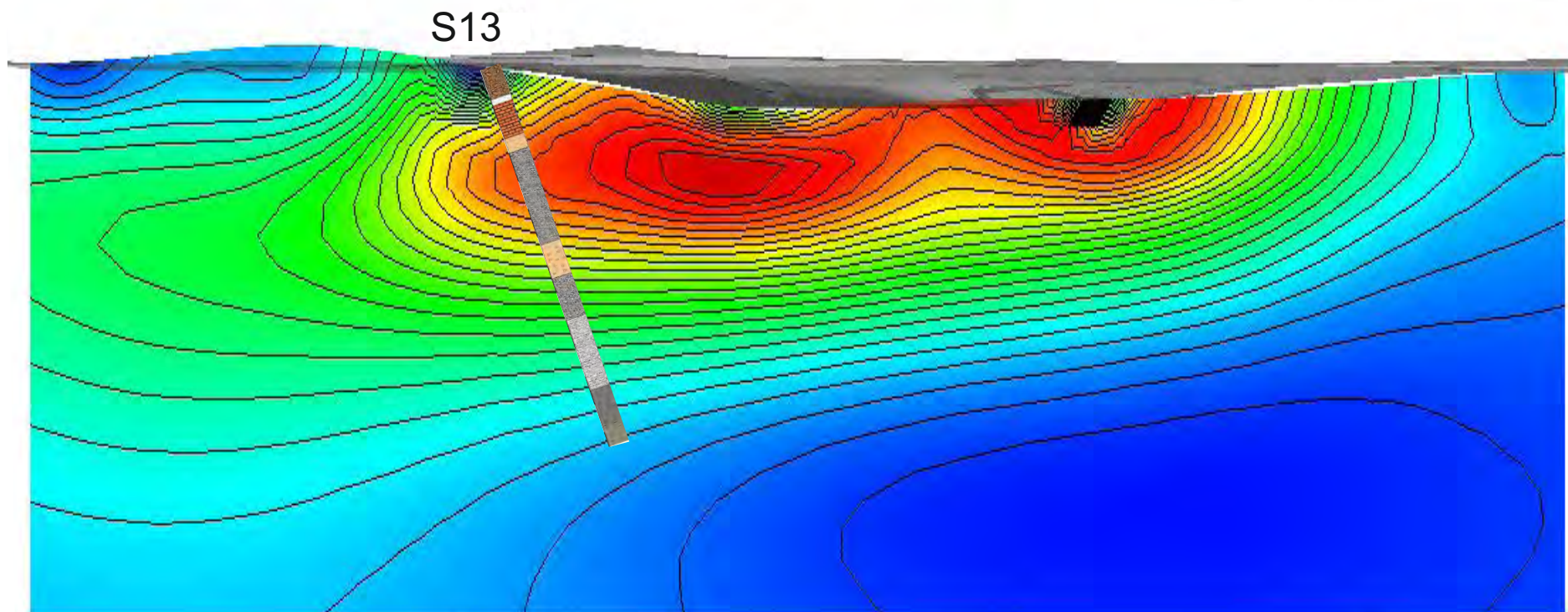
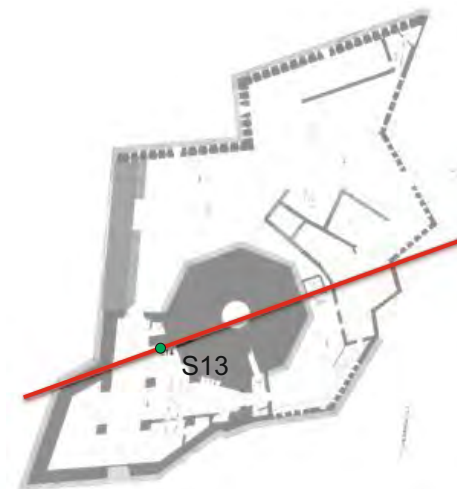


Tavola 21

Sezione ERT verticale



Resistività - Ohm·m



Tavola 22

Sezione ERT verticale

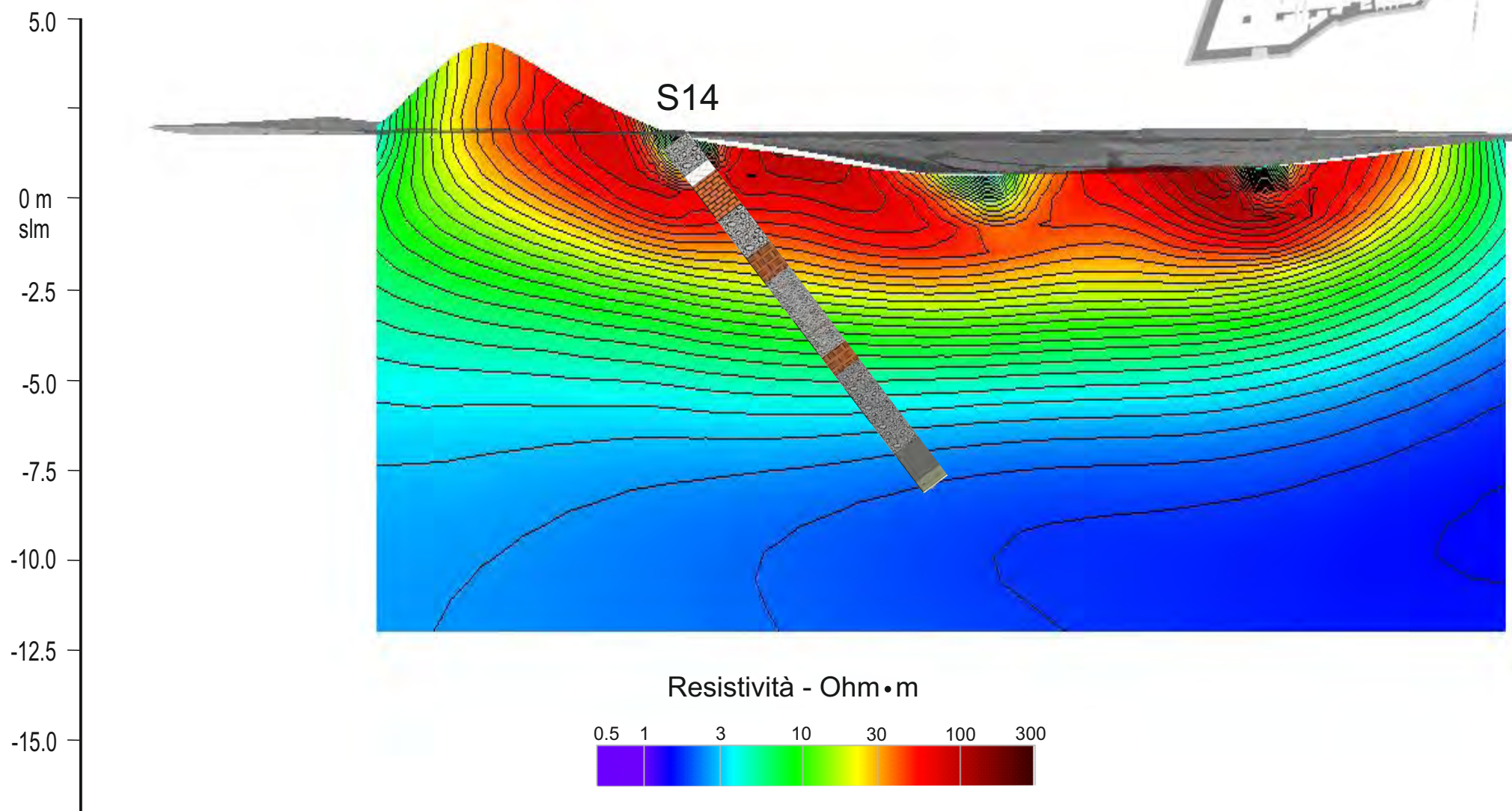


Tavola 23

Sezione ERT verticale

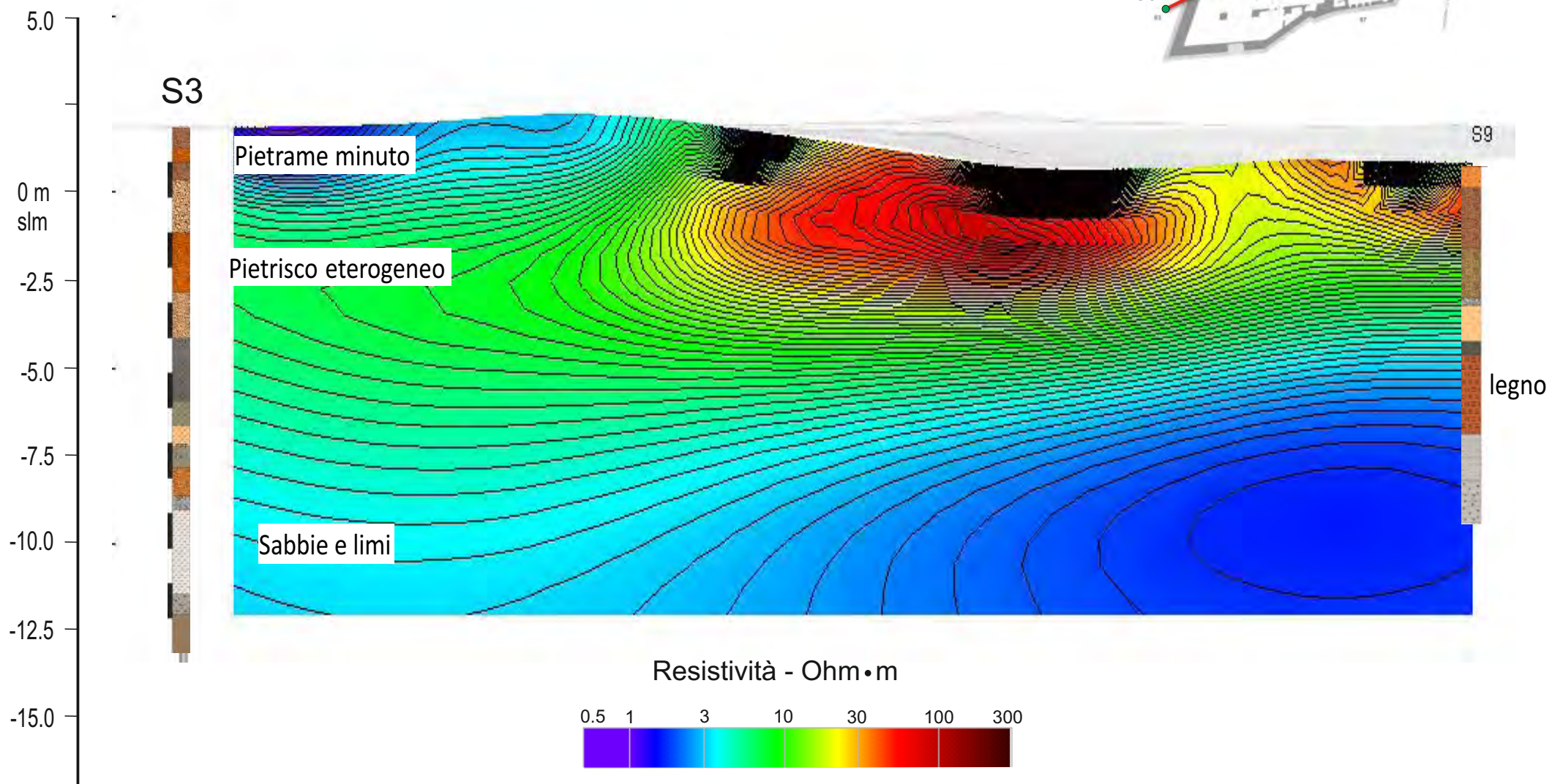
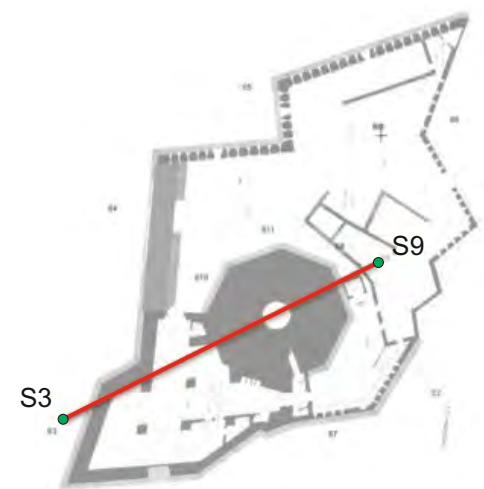


Tavola 24

Piano ERT verticale

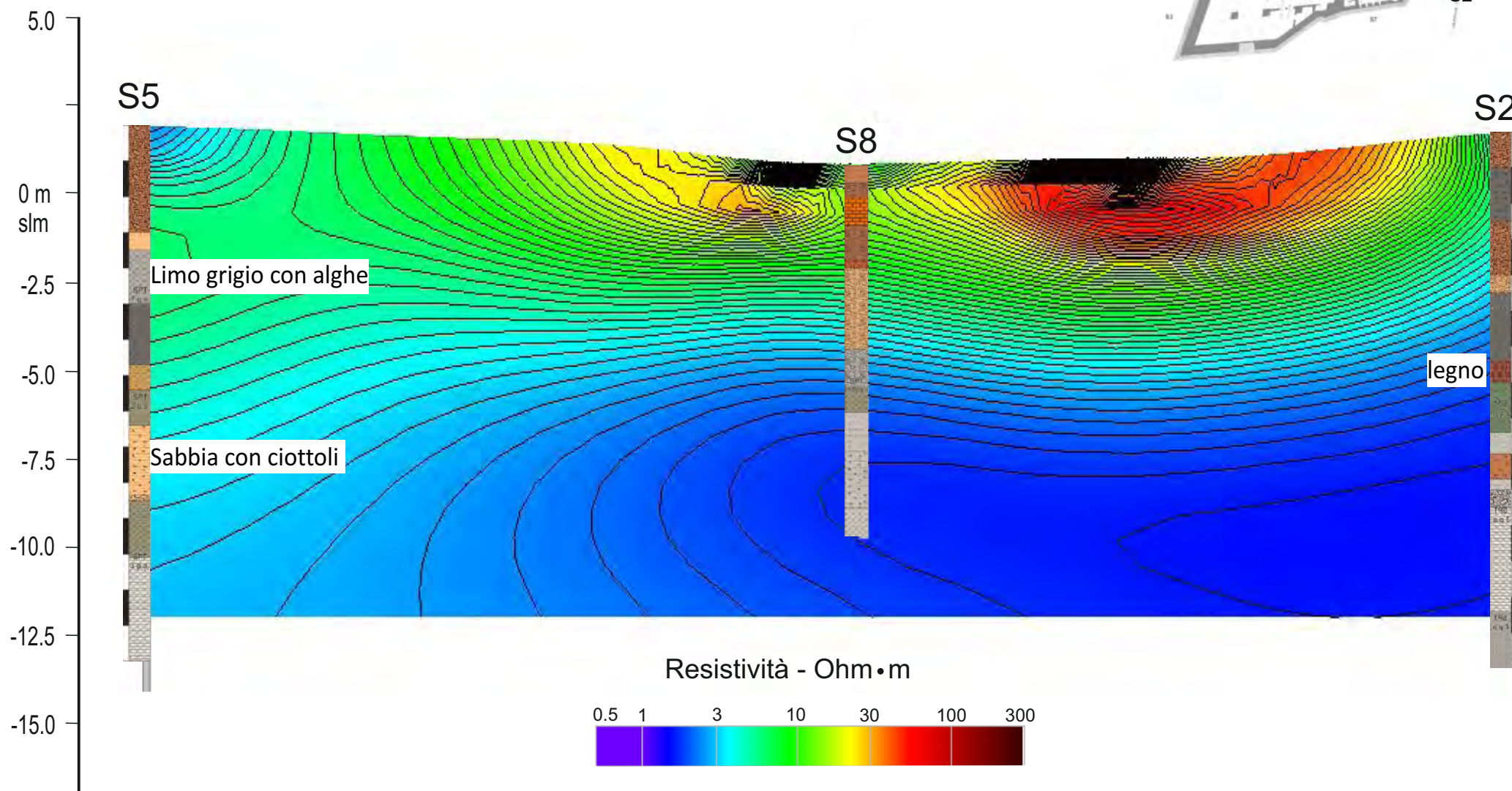


Tavola 25

Piano ERT verticale

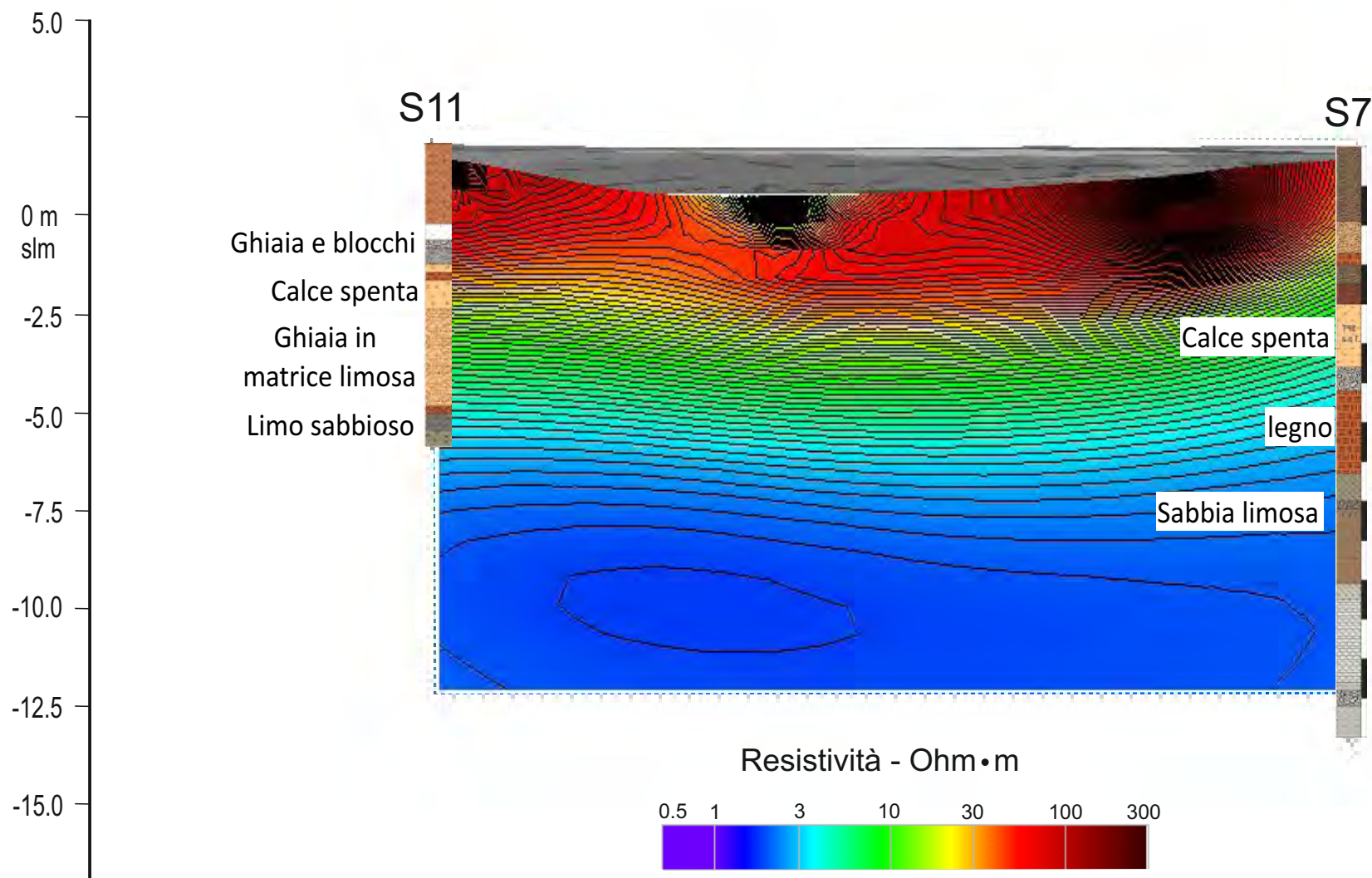
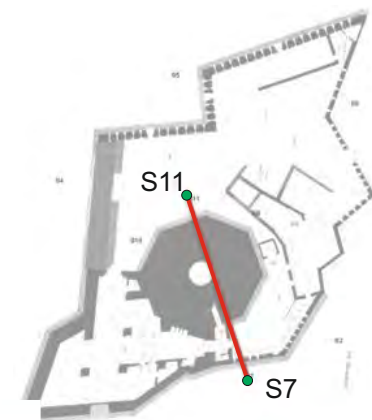


Tavola 26

Piano ERT verticale

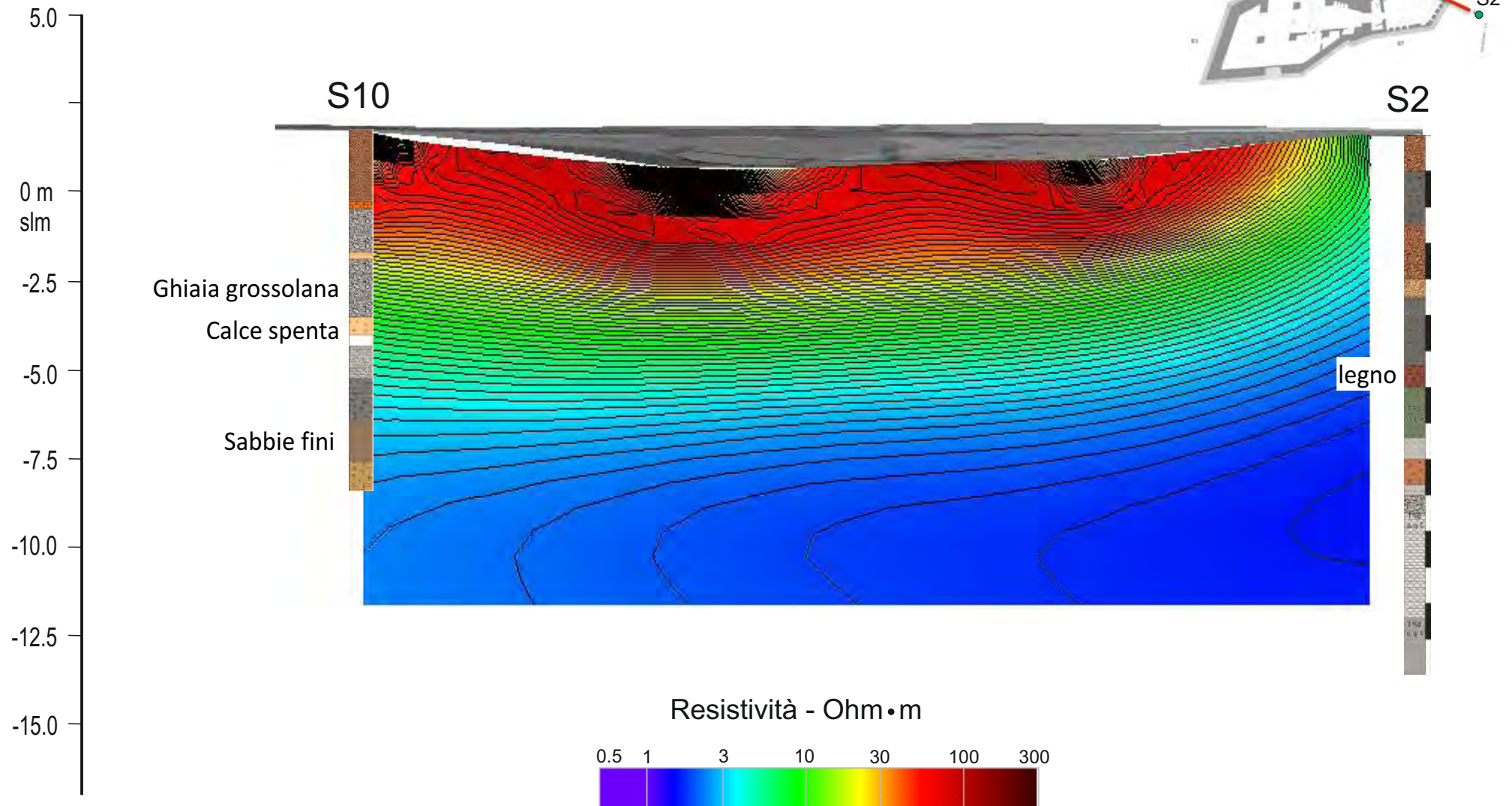
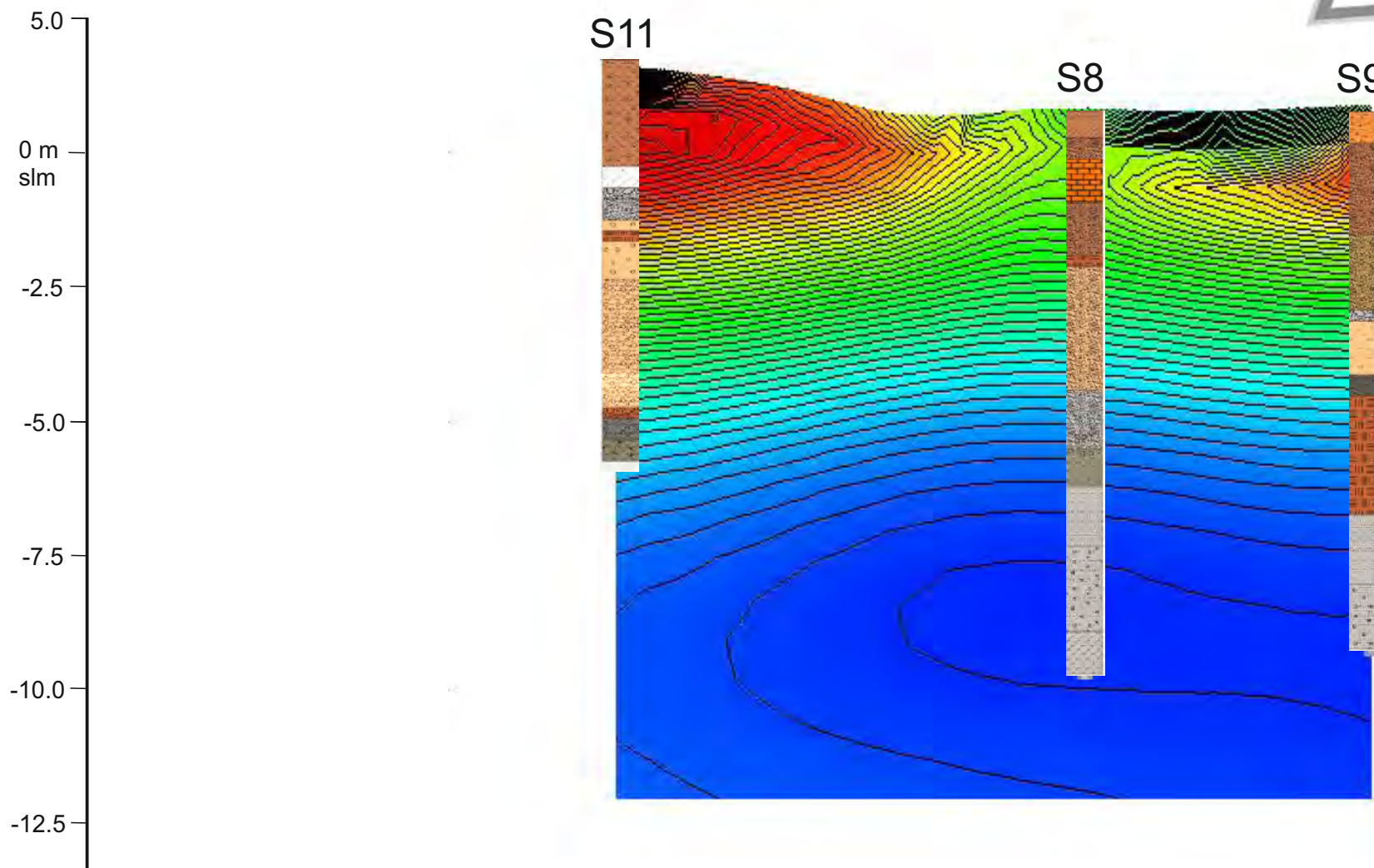
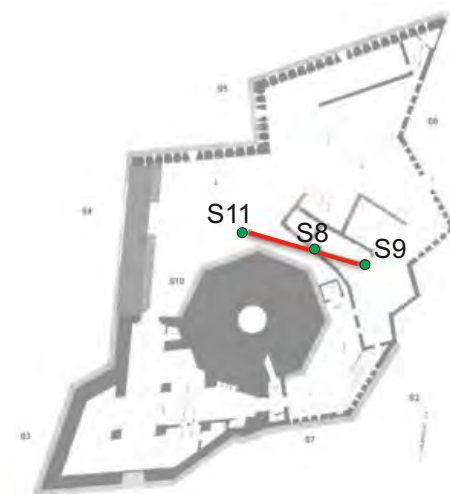
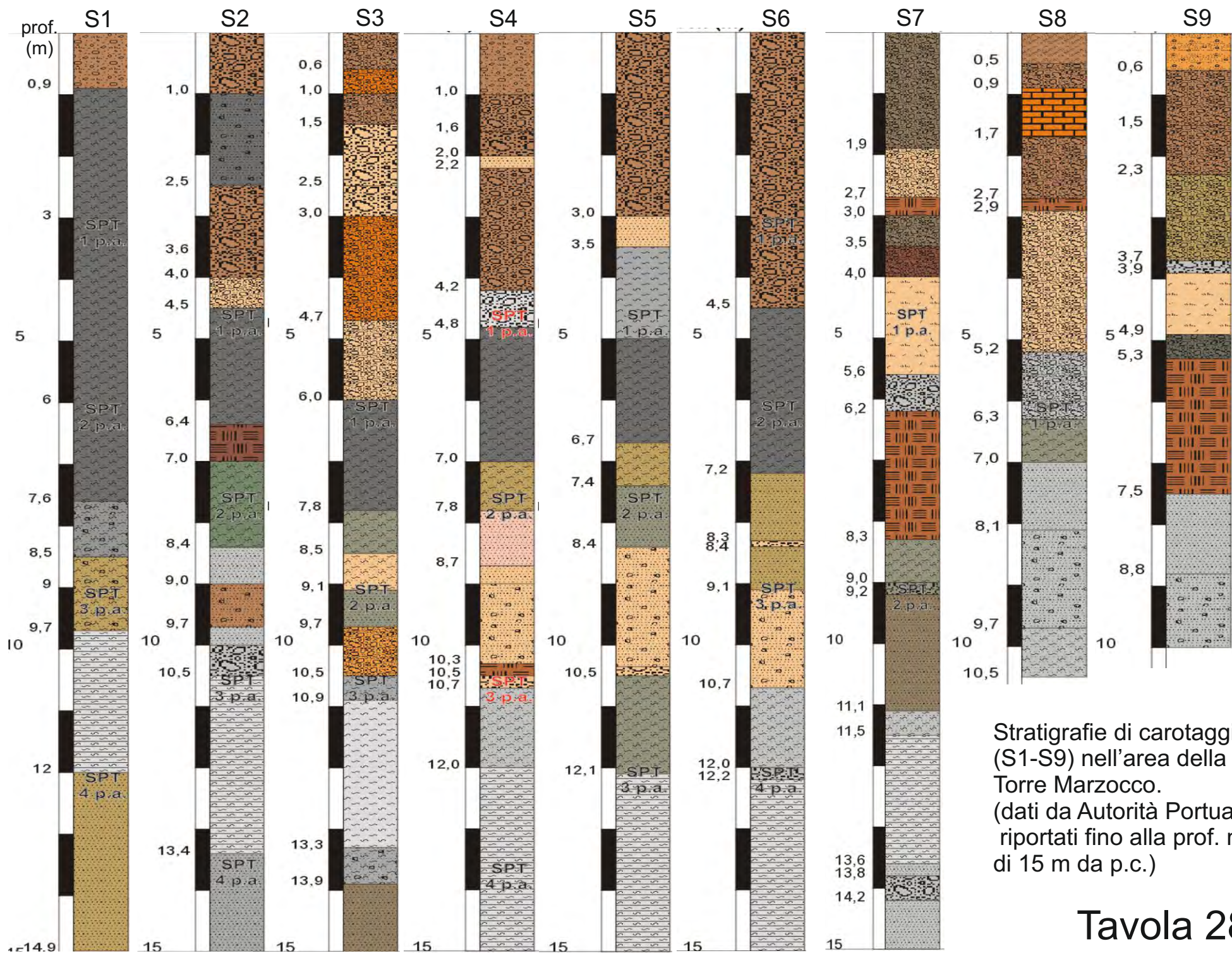


Tavola 27

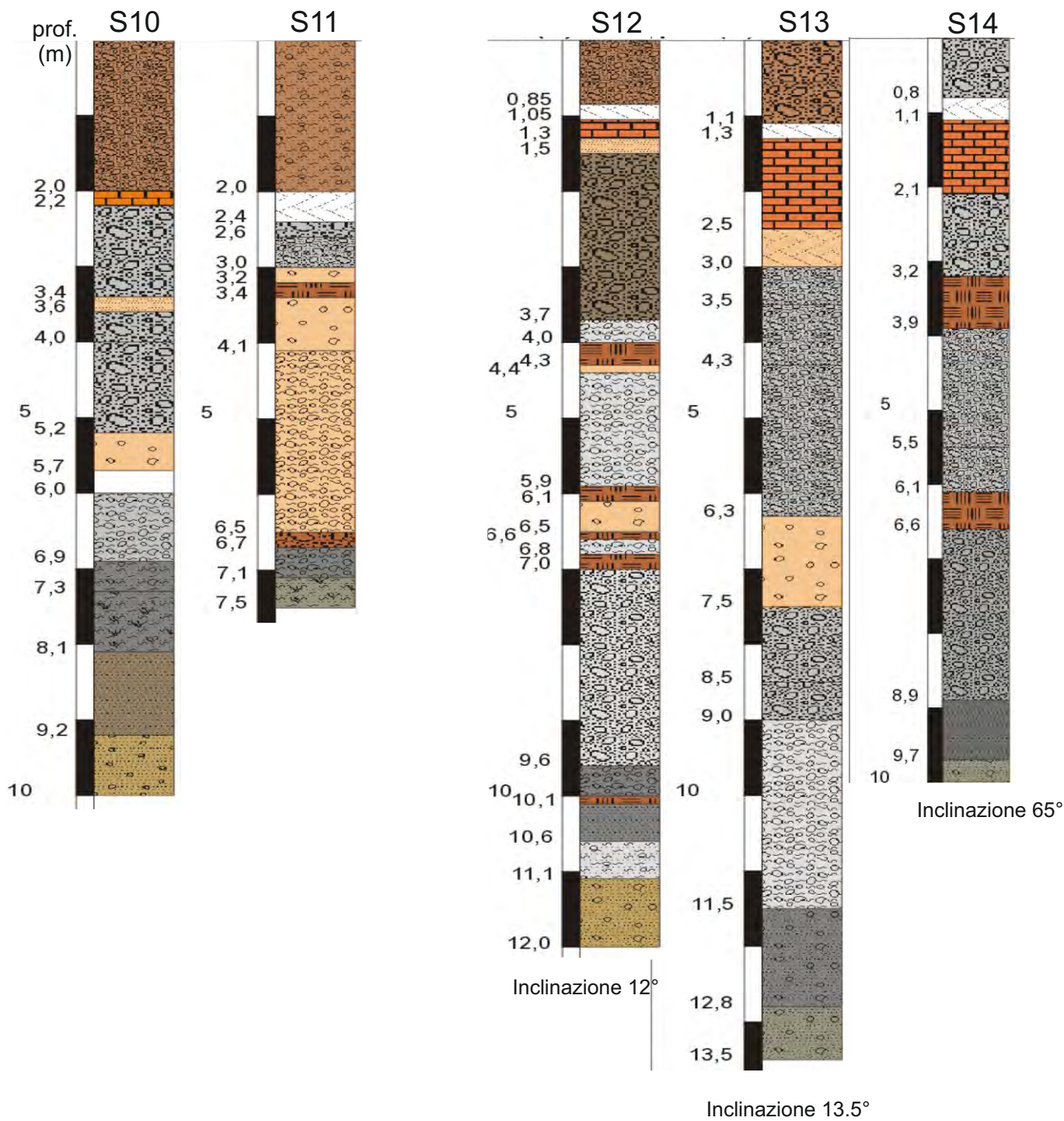
Piano ERT verticale

Resistività - Ohm•m





Stratigrafie di carotaggi verticali (S1-S9) nell'area della Torre Marzocco.
(dati da Autorità Portuale, riportati fino alla prof. max di 15 m da p.c.)



Stratigrafie di carotaggi verticali (S10-S11) ed obliqui (S12-S14) nell'area della Torre Marzocco. (dati da Autorità Portuale)

Legenda delle stratigrafie nell'area della Torre Marzocco (dati da Autorità Portuale)

	sabbie grigio scure con ciotoli		pietrame, pietrisco e mattoni
	limi sabbiosi e sabbie limose con posidonie		legno
	sabbie limose e limi sabbiosi con resti di legno		ghiaia e ghiaia fine con calce spenta
	sabbia fine grigio-azzurra debolmente limosa		mattoni cementati
	sabbia marrone/ocra con ciotoli di panchina		ghiaia e pietrisco in matrice limosa compatta
	conglomerati poligenici con bioclasti (base panchina)		calce spenta con raro ghiaietto e resti vegetali
	limo argilloso/argilla limosa grigia		marmo (blocco)
	sabbia medio/fine debolmente limosa		
	sabbia marrone/ocra con ciotoli di panchina		
	limo grigio chiaro		
	sabbia limosa con ghiaia e resti di gusci		
	sabbia fine con resti di gusci		
	limo sabbioso/sabbia fine limosa		

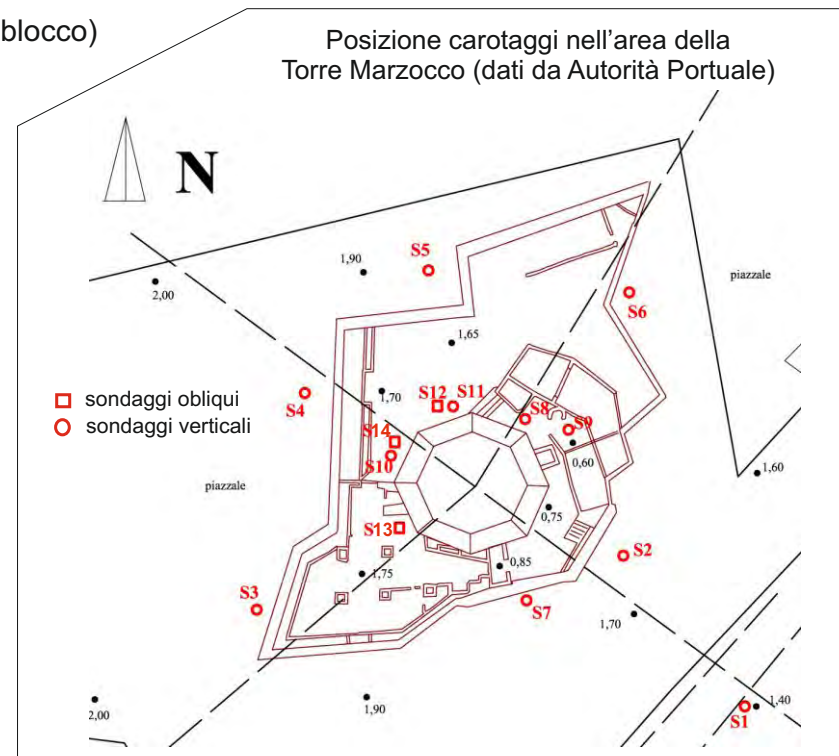


Tavola 31

sezioni radar orizzontali (time slice)
a 65 cm di profondità in entrambi
i settori esaminati

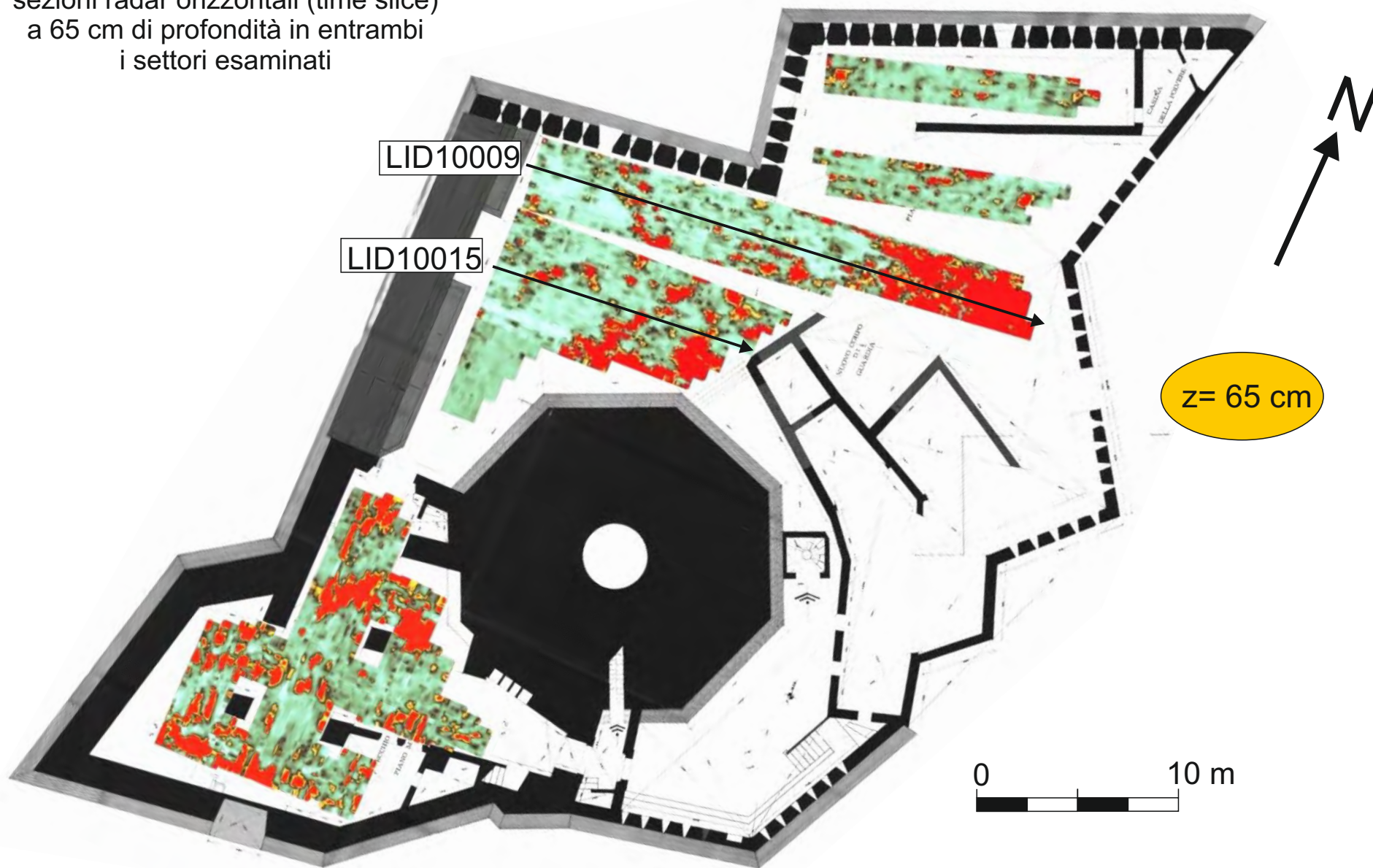
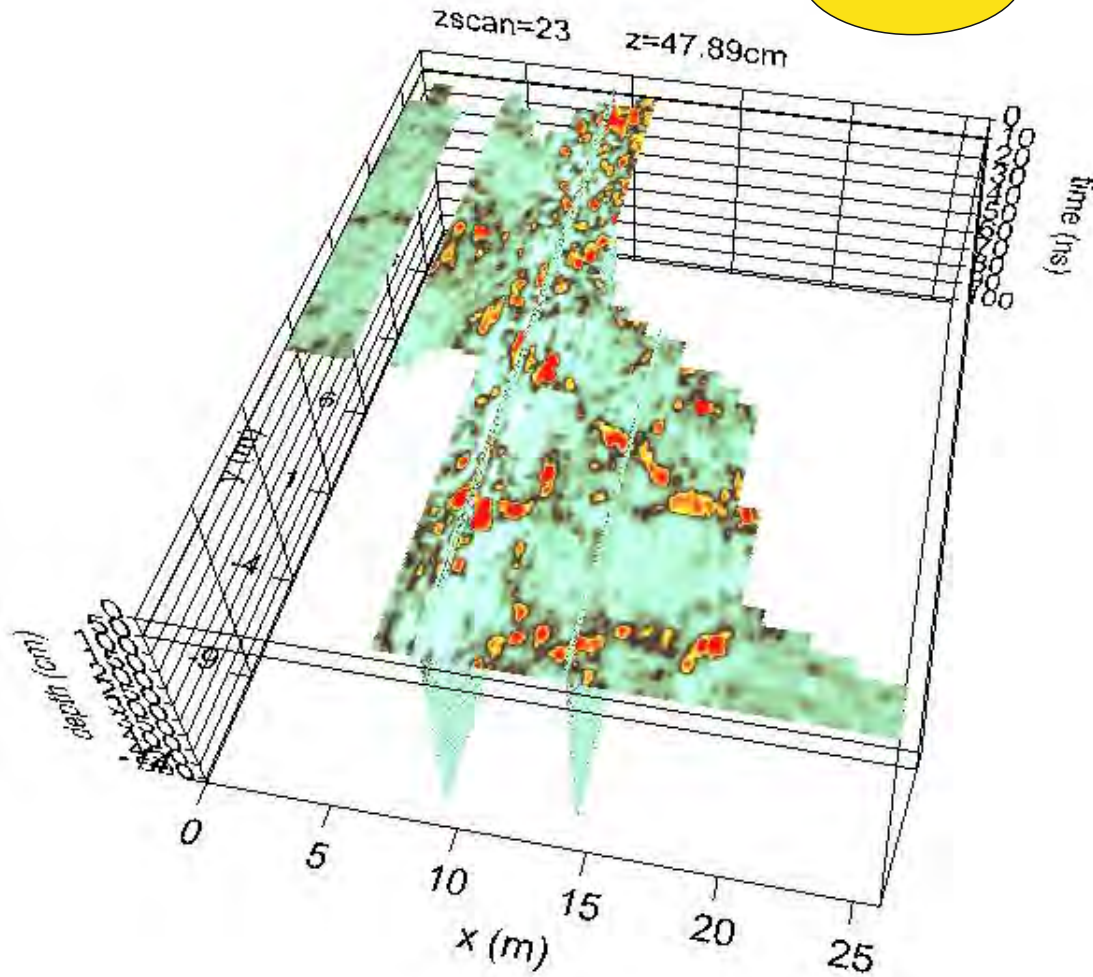


Tavola 32

visioni prospettive di sezioni radar orizzontali (time slice)
a 45 cm e 65 cm di profondità nel settore esterno

z = 45 cm



z = 65 cm

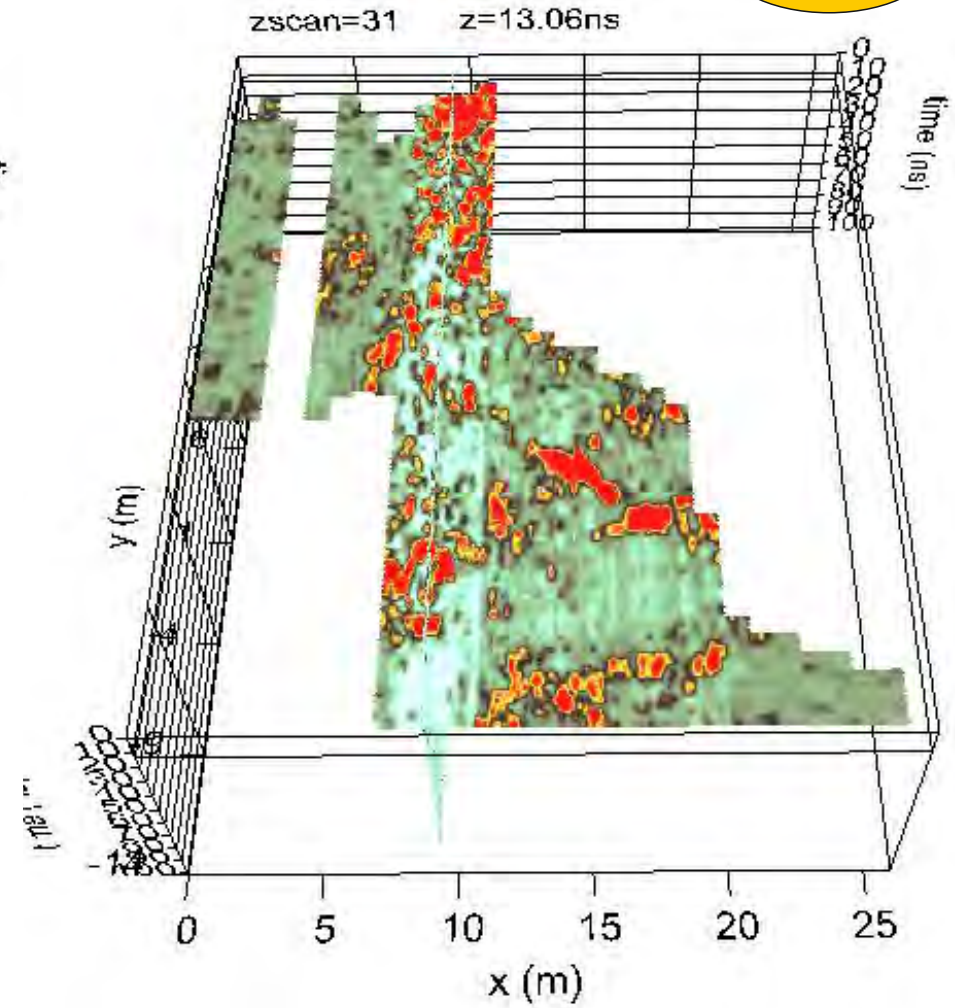
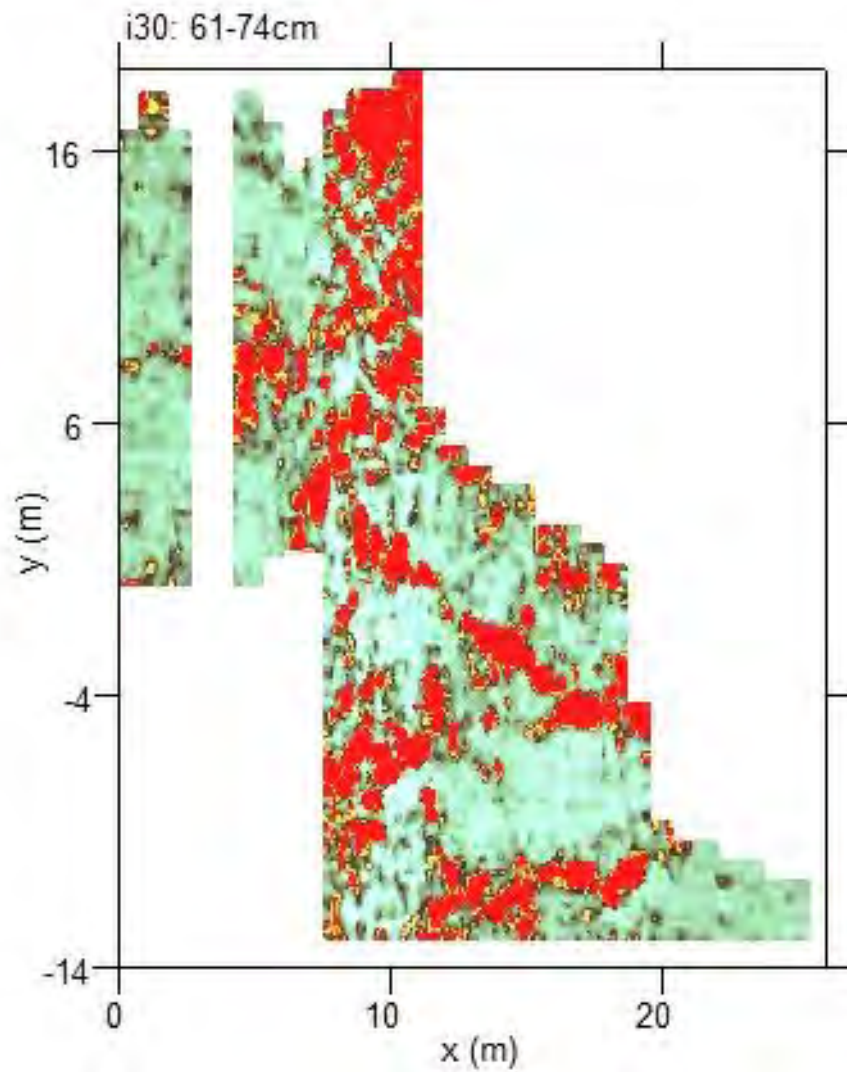


Tavola 34

somma delle riflessioni radar negli intervalli 50-75 cm, e 85-100 cm nel settore esterno

Overlay 50-75 cm



Overlay 85-100 cm

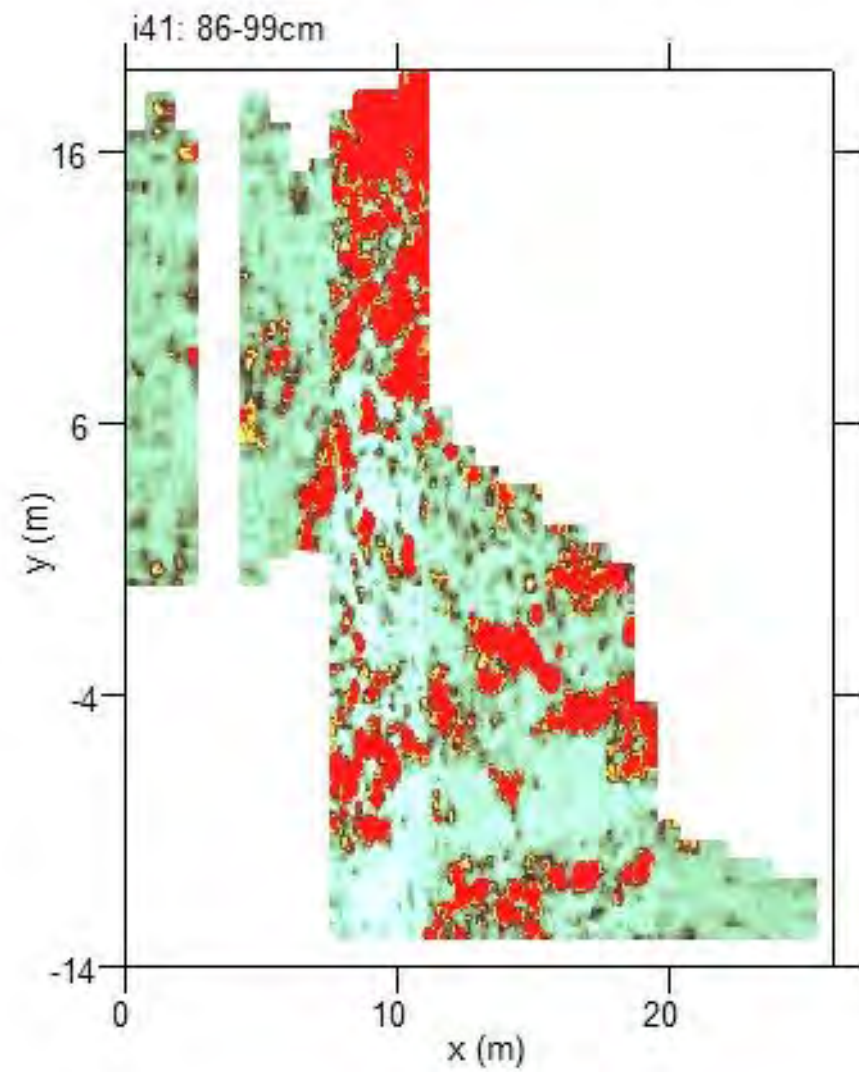
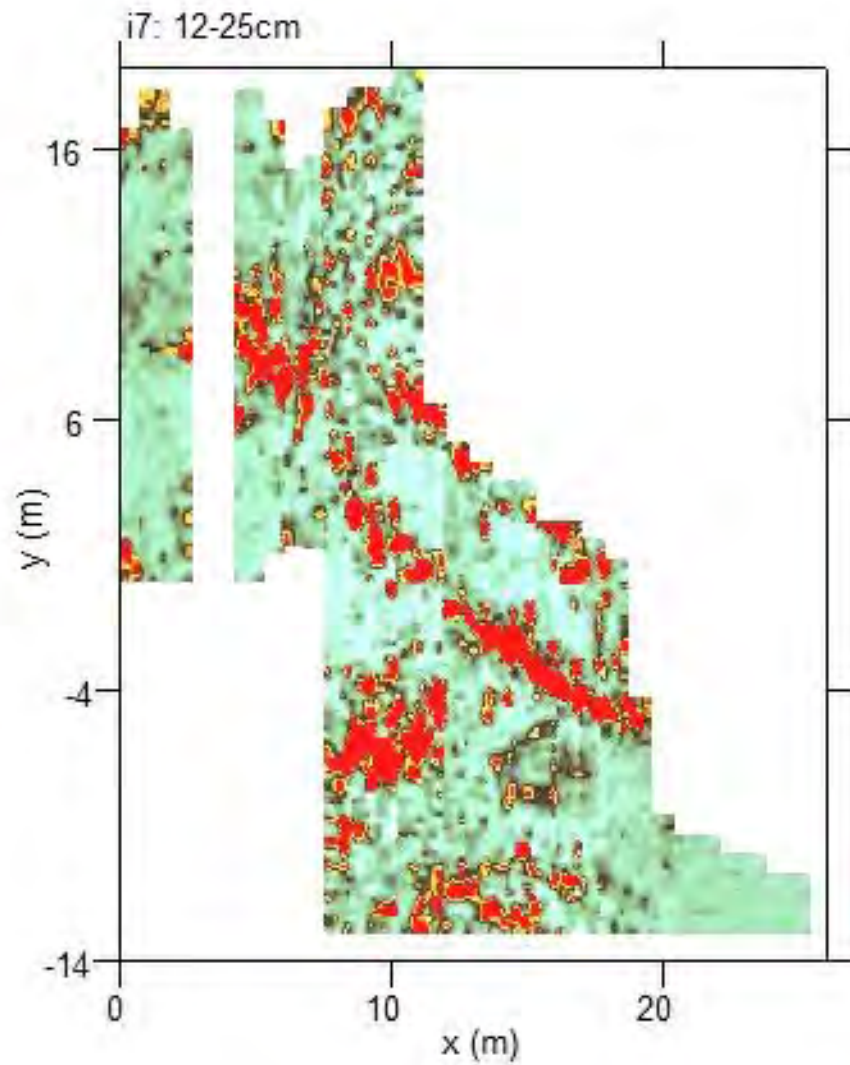


Tavola 33

somma delle riflessioni radar negli intervalli 0-25 cm, e 25-50 cm nel settore esterno

Overlay 0-25 cm



Overlay 25-50 cm

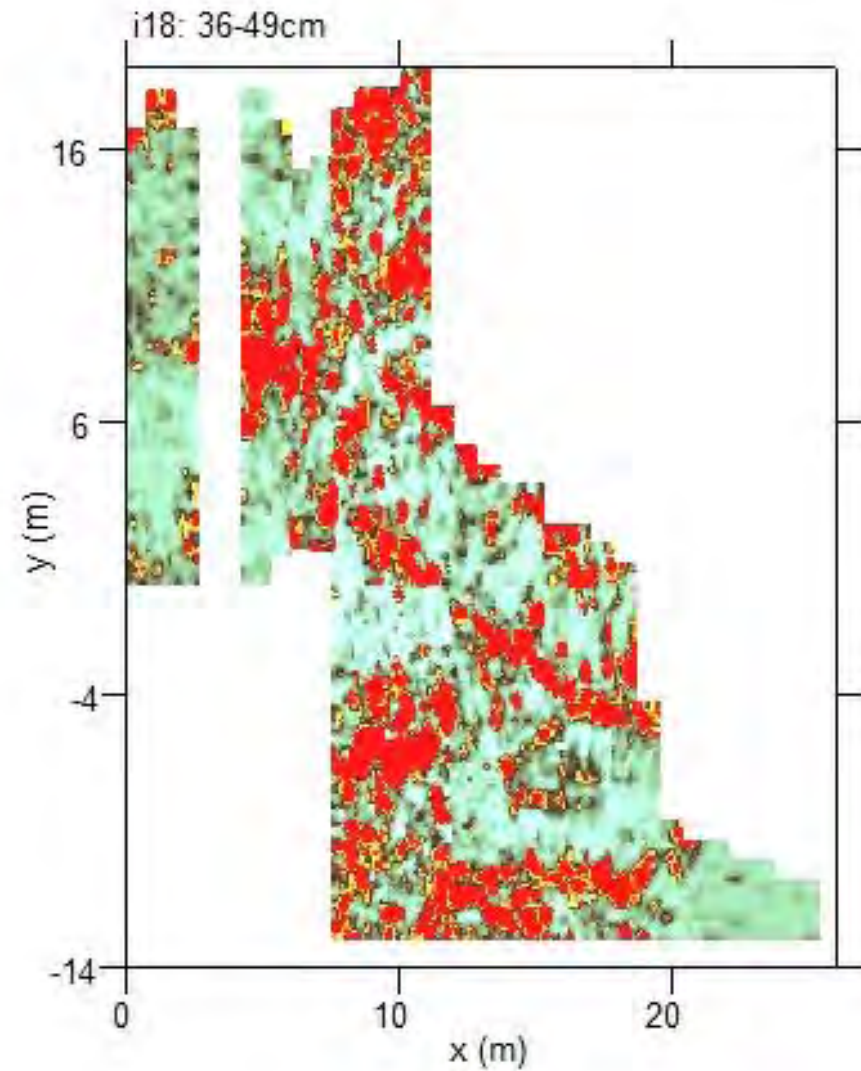
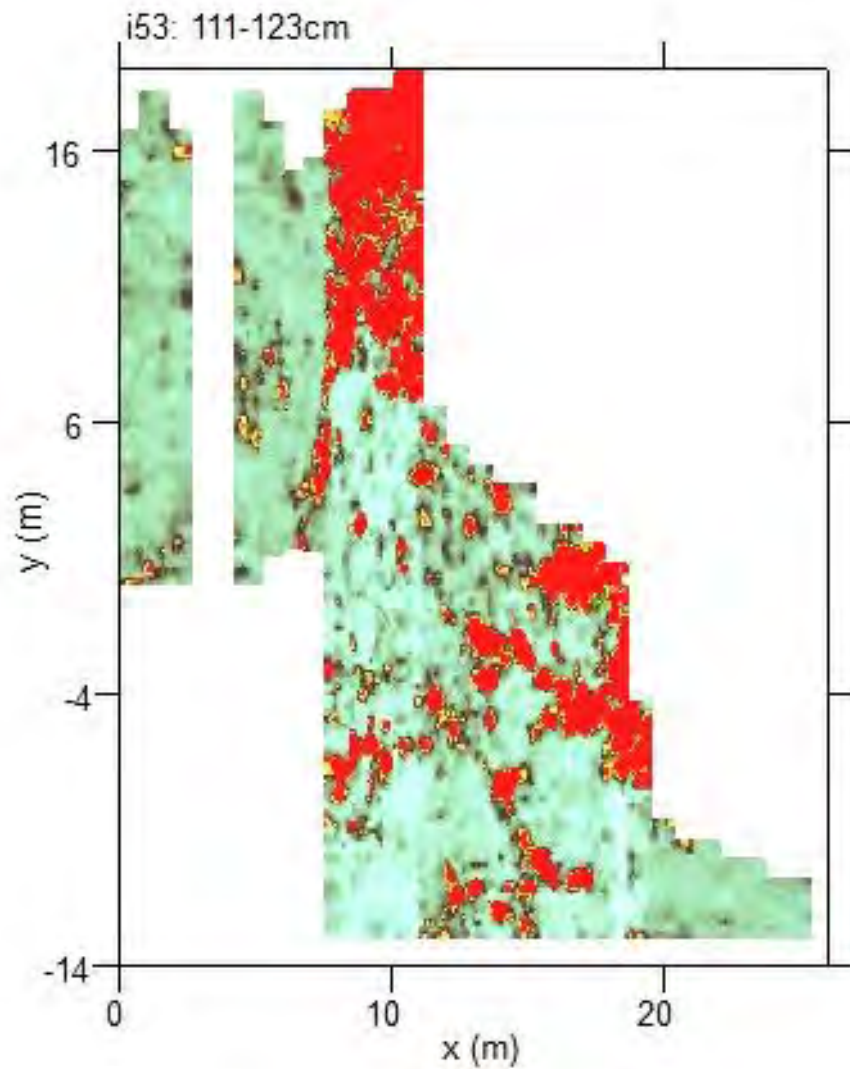


Tavola 35

somma delle riflessioni radar negli intervalli 100-125 cm, e 130-150 cm nel settore esterno

Overlay 100-125 cm



Overlay 130-150 cm

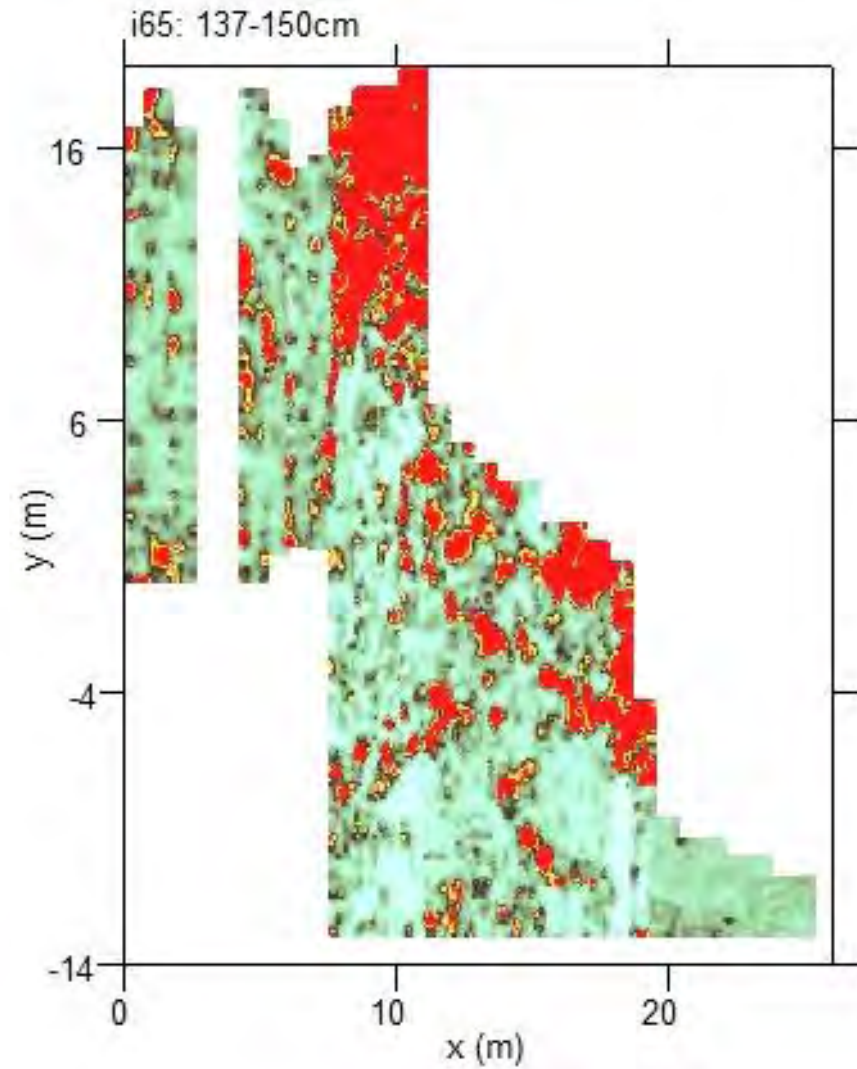
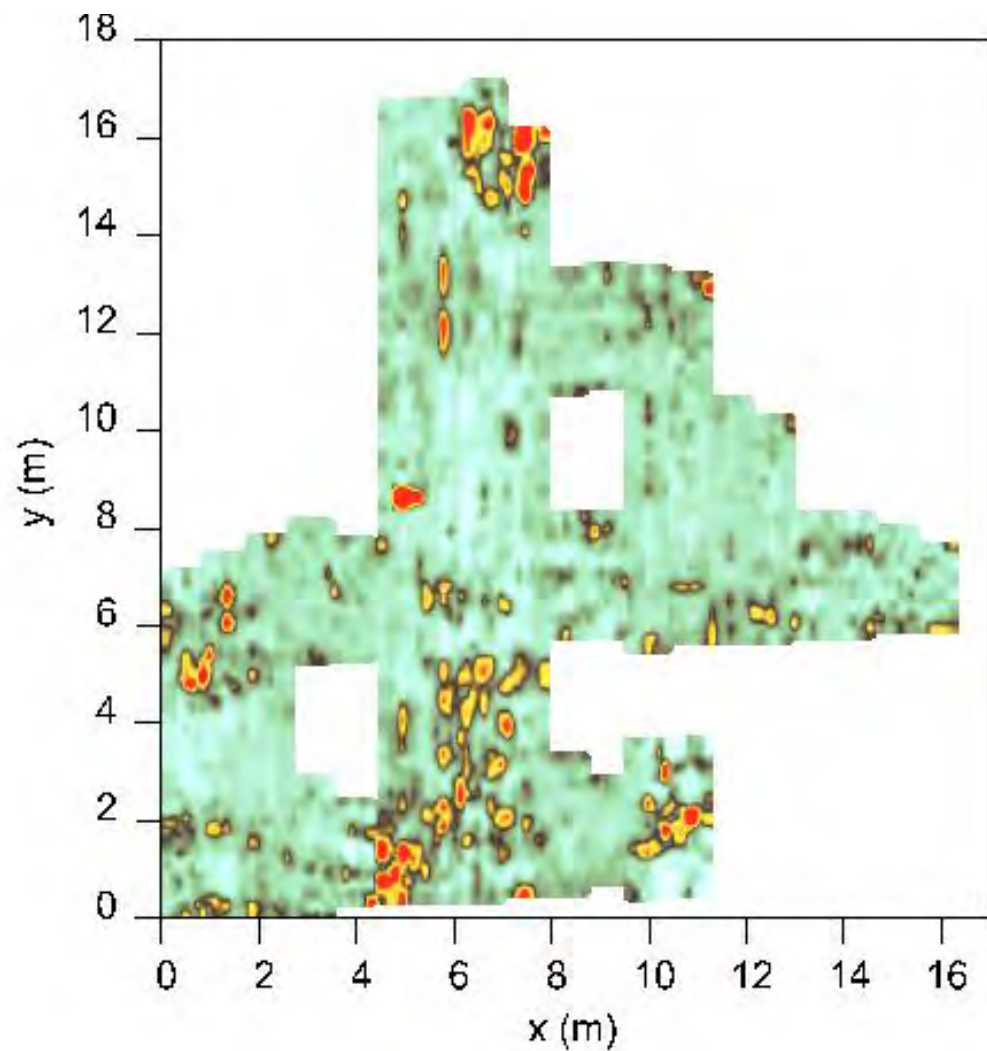


Tavola 36

sezioni radar orizzontali (time slice) e 30 cm e 90 cm di profondità nel settore interno

Z = 30 cm



Z = 90 cm

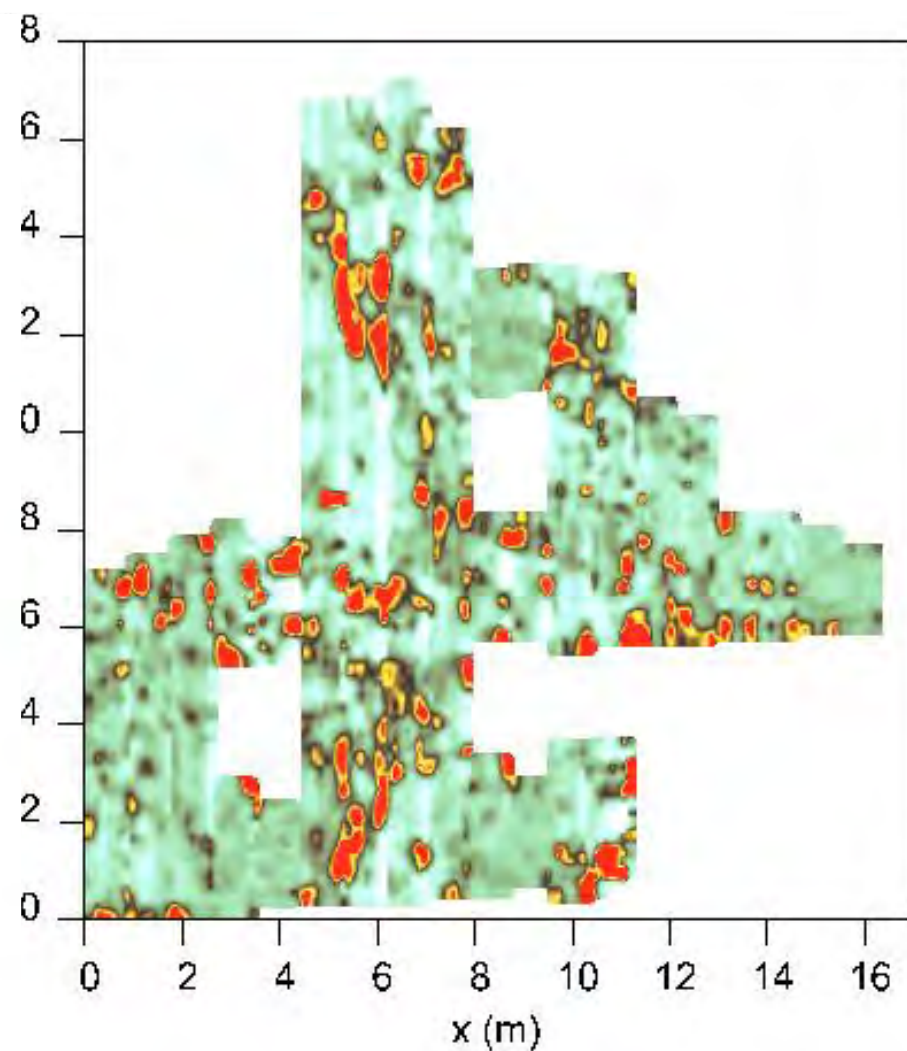
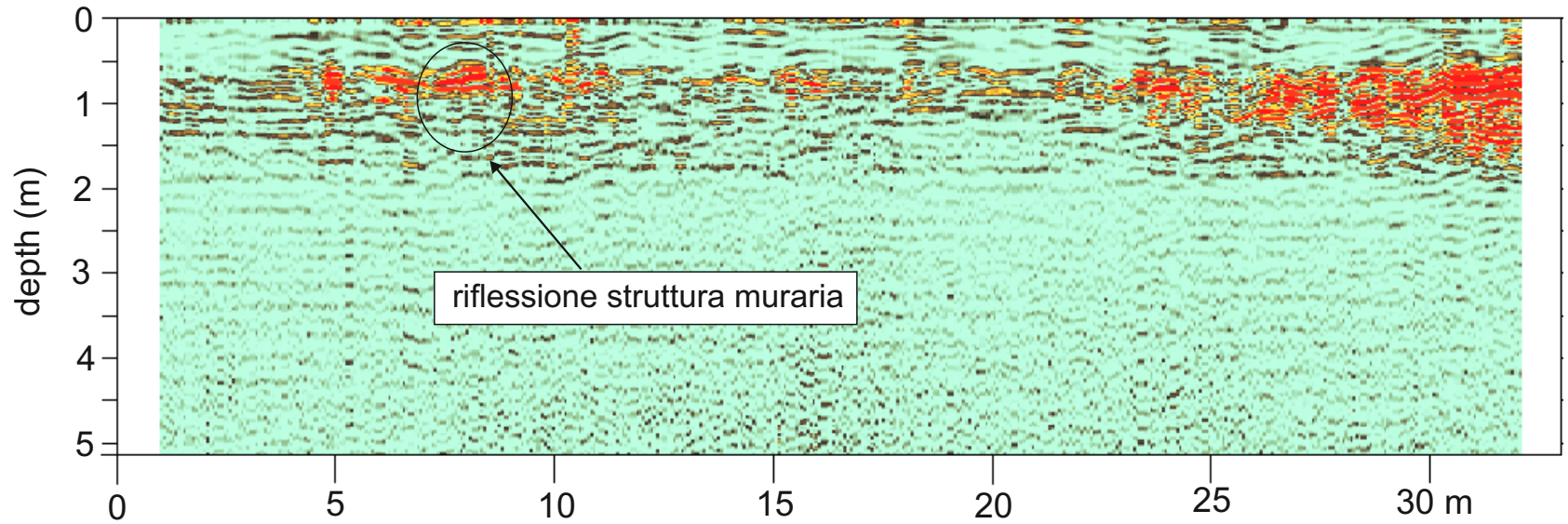


Tavola 37

sezioni radar verticali attraversanti l'area esterna indagata

LID10009



LID10015

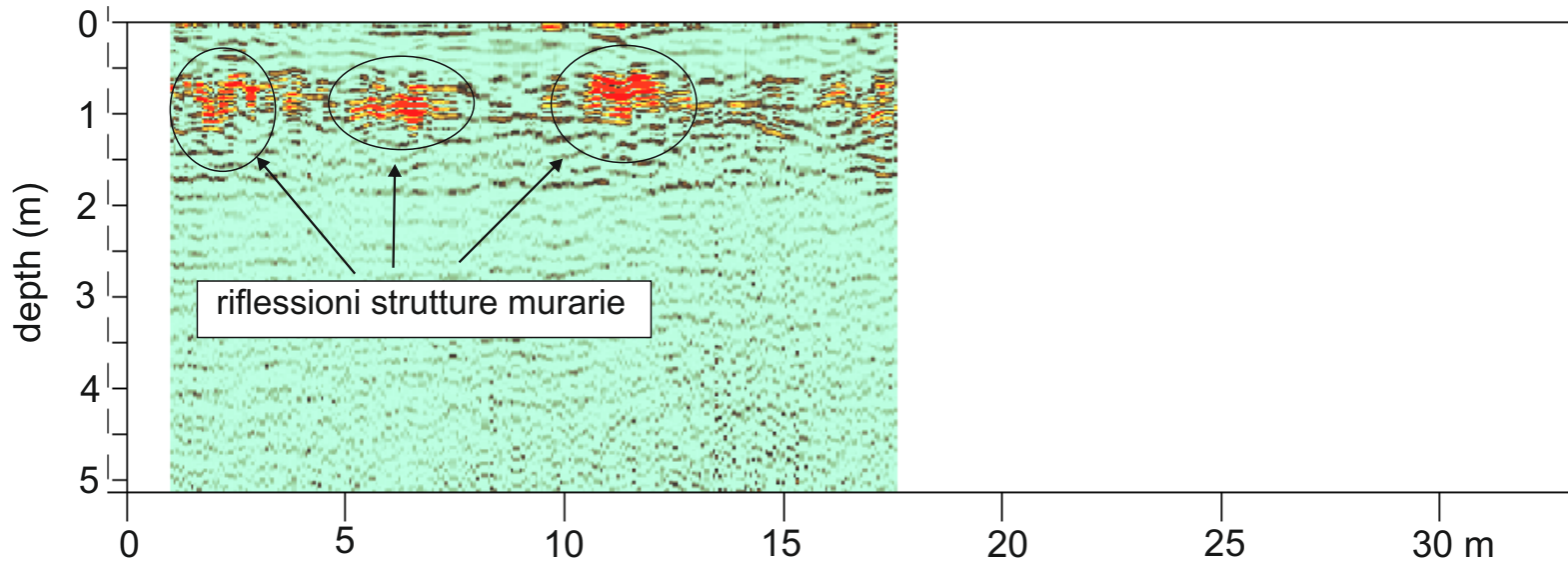
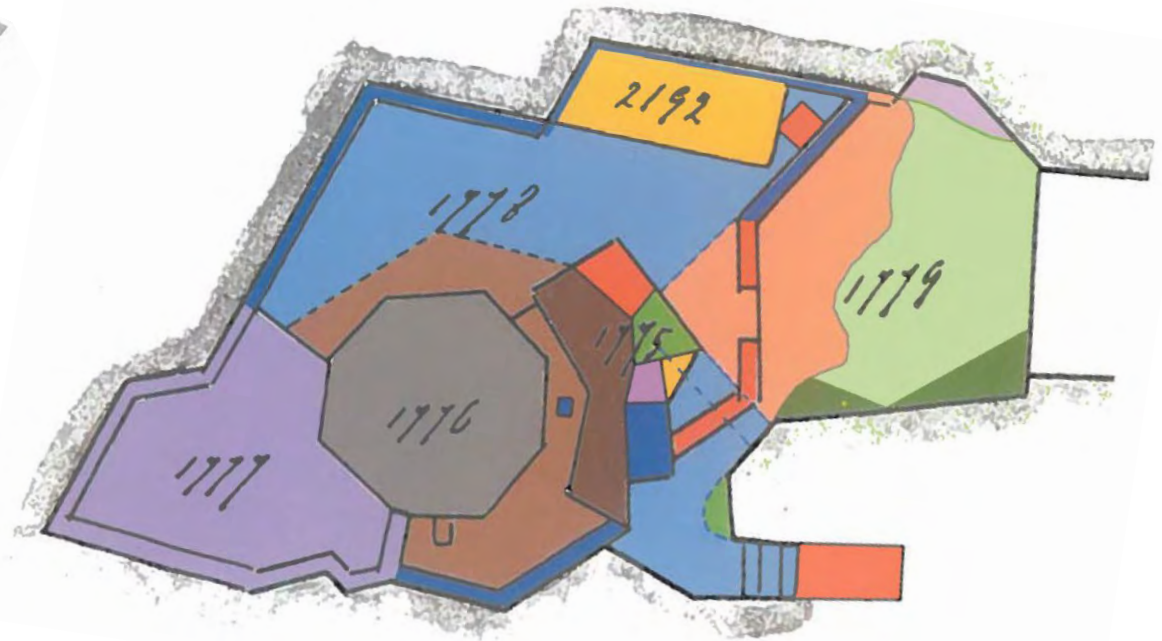
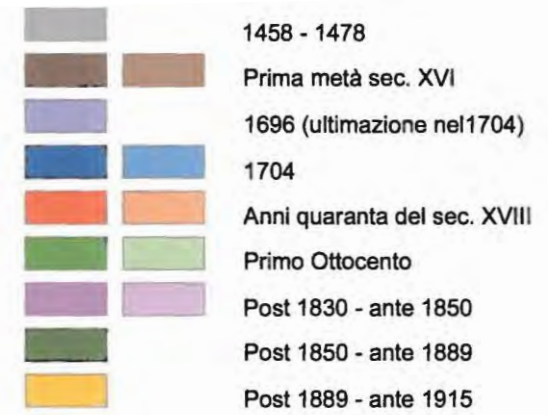
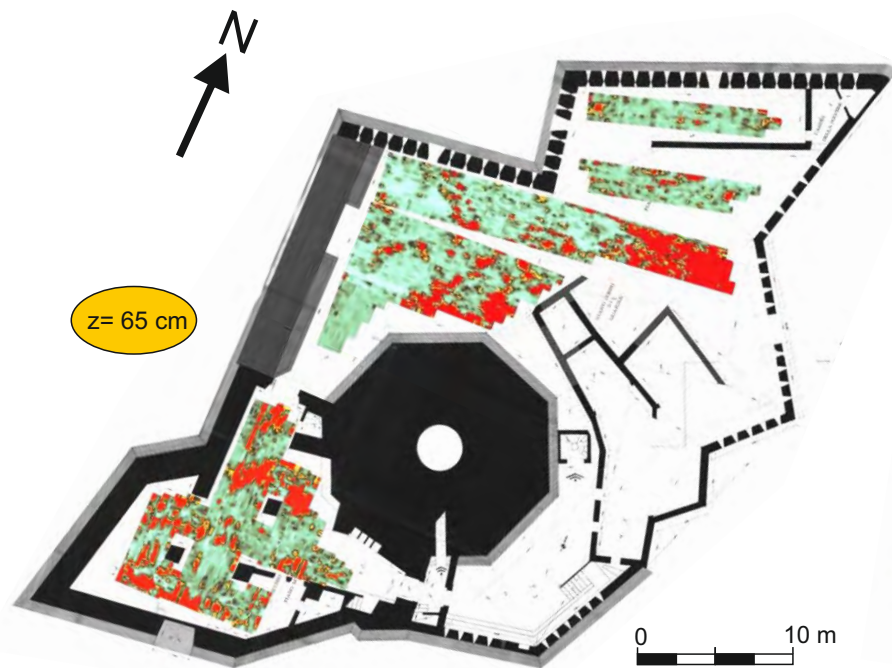


Tavola 38

confronto fra immagine radar e ricostruzione delle fasi costruttive della Torre Morzocco



da Trotta, 2005