



ATS s.r.l.

sede legale: via Biagi 192/ 53014 Monteroni D'Arbia (SI)

P. IVA 01253420523

info@atsenterprise.com - www.atsenterprise.com

Indagini Geofisiche



Committente: Comune di Crotone

Oggetto: servizi integrativi di prospezioni archeologiche, indagini archeologiche preventive, relative alla Linea di intervento 1.2.3 La riscoperta del Quartiere meridionale "sotto-intervento" 1.2.3.1 - Scavi su piazza della Resistenza e parcheggio dietro la posta-area BPER", CUP: F17B18000390009

Ditta esecutrice: A.T.S. s.r.l. Num. registrazione elenco operatori archeologici MiBAC n.3181

Per ATS srl
Il legale rappresentante
Dott. Francesco Pericci

A.T.S. srl
Archeo Tech and Survey srl
Via M.Biagi 192/c
53014 - Monteroni d'Arbia (SI)
PI:01253420523



1. Premessa

L'intervento di indagine presentato nella seguente relazione è stato commissionato a A.T.S. srl dal Comune di Crotona come servizi integrativi di prospezioni archeologiche, indagini archeologiche preventive, relative alla Linea di intervento 1.2.3 La riscoperta del Quartiere meridionale “ sotto-intervento “1.2.3.1 - Scavi su piazza della Resistenza e parcheggio dietro la posta-area BPER”, CUP: F17B18000390009 nell'ambito delle attività del programma “Valorizzazione dell'Antica Kroton e del sistema ambientale, turistico e culturale da Crotona a Capo Colonna”, per un più organico ed integrato sviluppo delle attività da realizzare ai fini della conoscenza e valorizzazione del cospicuo patrimonio storico-archeologico del territorio.

L'indagine svolta da ATS S.r.l. nelle date comprese tra il 15 e il 24 luglio 2019, è stata diretta sia come attività di approfondimento di quanto già parzialmente noto in termini di localizzazione e caratterizzazione dell'intero contesto, che come indagine di dettaglio della topografia antica dell'area. Le prospezioni geofisiche sono infatti uno strumento diagnostico a disposizione dell'archeologo che viene impiegato per indagare porzioni di territorio inesplorato o per approfondire le analisi in contesti archeologici noti, individuati attraverso altre metodologie di ricerca. Le prospezioni, rapide e non invasive, permettono la conoscenza del deposito archeologico sommerso ponendosi come metodo propedeutico allo scavo archeologico.

Sulle aree oggetto di indagini sono state realizzate indagini geofisiche attraverso il metodo magnetometrico con lo scopo di mappare i depositi archeologici sepolti. Il prodotto dell'indagine è costituito da mappe georeferenziate finalizzate a rappresentare la planimetria dei depositi.

2. Introduzione

La volontà di conoscere il paesaggio antropizzato ha portato negli ultimi anni alla ricerca di un compromesso tra la necessità di perfezionare strategie di indagine veloci senza tuttavia rinunciare ad un'alta scala di dettaglio, in modo da poter cogliere la complessità intrinseca dei vari contesti archeologici indagati. Queste esigenze hanno spinto a realizzare progetti di ricerca multidisciplinari in cui sono state sperimentate sia indagini geofisiche puntuali, in contesti archeologici noti, che indagini condotte in modo estensivo¹, analizzando più o meno estese porzioni di territorio. Tali ricerche hanno evidenziato la straordinaria efficacia delle prospezioni geofisiche non solo per la

¹ PIRO 2001; POWLEWSLAND D. 2008.



conoscenza di contesti puntuali, ma anche come strumento per lo studio del territorio: uno degli elementi più significativi emersi in tali ricerche è stata la possibilità di individuare tracce archeologiche estremamente labili, difficilmente individuabili da altre indagini invasive quali saggi e trincee con mezzo meccanico, ma verificabili attraverso un accurato scavo stratigrafico².

Inizialmente le prospezioni magnetometriche furono intraprese in ambito archeologico per la ricerca di strutture particolari come forni per la ceramica di periodo romano. La riuscita di queste prime applicazioni ha fatto sì che la tecnologia si estendesse per l'individuazione di qualsiasi tipologia di contesto archeologico purché i materiali presenti nel sottosuolo avessero suscettività magnetica diversa dall'ambiente circostante o fossero stati sottoposti a fonti di calore. È così che la sensibilità dello strumento si è dimostrata utile per il rinvenimento di strutture murarie, fossati, antiche scariche fornaci e persino singole buche in cui erano impiantati pali di legno³. Attraverso il calcolo dei diversi valori che ogni anomalia rilascia è possibile identificare un'ampia gamma di tracce archeologiche sepolte ricostruendone le dimensioni spaziali, l'articolazione interna e la profondità⁴. Il segnale che ogni varietà di traccia libera è diverso dalle altre e condizionato oltre che dalla natura della tipologia del materiale archeologico sepolto dalla costituzione geolitologica del terreno, dall'uso del suolo, dalla presenza di vegetazione e da disturbi dovuti all'antropizzazione del paesaggio⁵. La presenza di oggetti metallici abbandonati sulla superficie del campo o a pochi centimetri di profondità crea disturbo sia in fase di acquisizione che di elaborazione dati alterando i valori prodotti dal campo magnetico.

Tutte le alterazioni suddette possono tuttavia essere evitate o attenuate attraverso un'attenta programmazione della ricerca e la possibilità di ripetere l'indagine un numero illimitato di volte. La pianificazione è volta a far che si possa ottenere dalla metodologia la massima resa di individuazione delle tracce con il minor valore di disturbo e incertezza possibile.

Allo stato attuale della ricerca la tendenza è di creare progetti multidisciplinari eseguendo più metodi geofisici insieme sullo stesso contesto in modo da aumentare la conoscenza e ridurre il grado di

² CAMPANA S.R.L. 2018.

³ Per avere un quadro d'insieme sulle diverse indagini geofisiche nei vari contesti archeologici si veda: HASEK 1999, pp.42-49; MUSSET, AFTAB KHAN 2000, pp.429-438.

⁴MATH, VEQUE 2003, pp.241-251; CAMPANA S., PIRO S. 2009; GOODMAN D., PIRO S. 2013.

⁵GAFFNEY, GATER 2003, pp.77-88. Le condizioni ottimali che si possono presentare su un sito oggetto d'indagine sono: uso del suolo caratterizzato da un fondo piatto e vegetazione bassa per non generare disturbi in fase di acquisizione e permettere all'operatore di camminare in modo scorrevole.





incertezza nell'interpretazione del dato. Prospezioni geofisiche applicate sistematicamente al contesto territoriale in modo estensivo, rappresentano una strategia fondamentale per l'individuazione della risorsa culturale nella sua complessità⁶. Tale impiego è volto a superare i limiti di visibilità finora irrisolti a scala locale per ottenere una buona conoscenza del territorio.



⁶ CAMPANA S.R.L. 2018.



Il contesto archeologico

L'area presa in esame si colloca in quel settore di abitato antico che corrisponde, in letteratura, al cosiddetto settore sud-occidentale o meridionale caratterizzato da un orientamento nord-sud degli assi stradali antichi.

Il limite settentrionale del quartiere è stato generalmente posto in coincidenza con il corso dell'odierno torrente Pignataro, nel quale confluivano gli apporti del bacino imbrifero costituito dalla conca delle colline circostanti⁷. Un'indagine effettuata nei pressi dell'odierno Ospedale Civile⁸, ha permesso di accertare che la porzione di abitato messa in luce, in prossimità del corso d'acqua ora canalizzato, presentava lo stesso orientamento N-S caratterizzante il quartiere meridionale⁹, sarebbe pertanto da collocare qui la 'cerniera' tra quest'ultimo ed il settore centrale¹⁰.

La città di Crotona infatti presenta tre vaste aree con impianti urbani regolari caratterizzati da differenti orientamenti, determinati dall'andamento della linea di costa; si tratterebbe di un intervento urbanistico unitario, inquadrabile tra la seconda metà del VII e gli inizi del VI secolo a.C.¹¹. Il primo nucleo, orientato N-S, si sviluppa a SO dell'acropoli ed è delimitato verso N dal fosso Pignataro; il secondo, orientato 30° Est, è situato tra il fosso Pignataro e il fiume Esaro; il terzo, orientato 60° Est, si sviluppa a NO dell'Esaro¹² (fig. 1).

Questo tipo di orientamento dell'abitato, disposto in modo tale da risultare sempre perpendicolare alla linea di costa, doveva essere dettato da motivazioni geomorfologiche, come il corretto deflusso delle acque piovane e la giusta esposizione al sole e ai venti. I tre blocchi abitativi della città facevano dunque capo ad una rete di strade allineate e ortogonali tra loro, con *stenopoi* (generalmente larghi tra i 4.80 e i 5 m) e *ambitus* (vicoli) larghi circa 1 m, che dovevano intersecarsi ortogonalmente con strade più ampie, le *plateiai*. Queste ultime avevano misure oscillanti: quella individuata nel settore settentrionale, ai piedi della collina della Batteria, era larga circa 8,80¹³; sempre in questo settore

⁷ SPADEA 1983, p. 132.

⁸ VERBICARO, SPADEA, RACHELI 2005.

⁹ SPADEA 1983, pp. 128-130, 136; SPADEA 1998, p. 20

¹⁰ VERBICARO 2014.

¹¹ SPADEA 1993, p. 20. Lo studioso afferma inoltre che l'organizzazione dello spazio (limiti di lotto, assi viari principali, etc.) doveva esser stata impostata in epoca più antica, forse già all'epoca della *ktisis*, o poco dopo.

¹² SPADEA 1983, p. 128-130.

¹³ SABBIONE 1976, pp. 912-913; SPADEA 1983, p. 128. La *plateia* venne individuata nel corso dei lavori per la costruzione dell'acquedotto, parallela alla linea di costa era delimitata da strutture databili al IV-III secolo, ma gli scarichi che costituivano la massicciata ne datano l'esistenza già in età arcaica.

dell'abitato crotoniate le indagini magnetometriche effettuate dalla Fondazione Lerici hanno permesso di identificare un'altra *plateia* dalla ragguardevole larghezza di 20 m¹⁴; quella invece rinvenute nel settore centrale nei pressi dello scavo dell'Ospedale¹⁵ sembra avere una larghezza di 12 m, analoga a quella individuata nel settore meridionale, in via Veneto nei pressi del Municipio, durante lo scavo del metanodotto¹⁶.

Questa impostazione urbanistica, come documentata nei vari saggi di scavo effettuati in città, verrà mantenuta pressoché immutata sino all'età ellenistica.

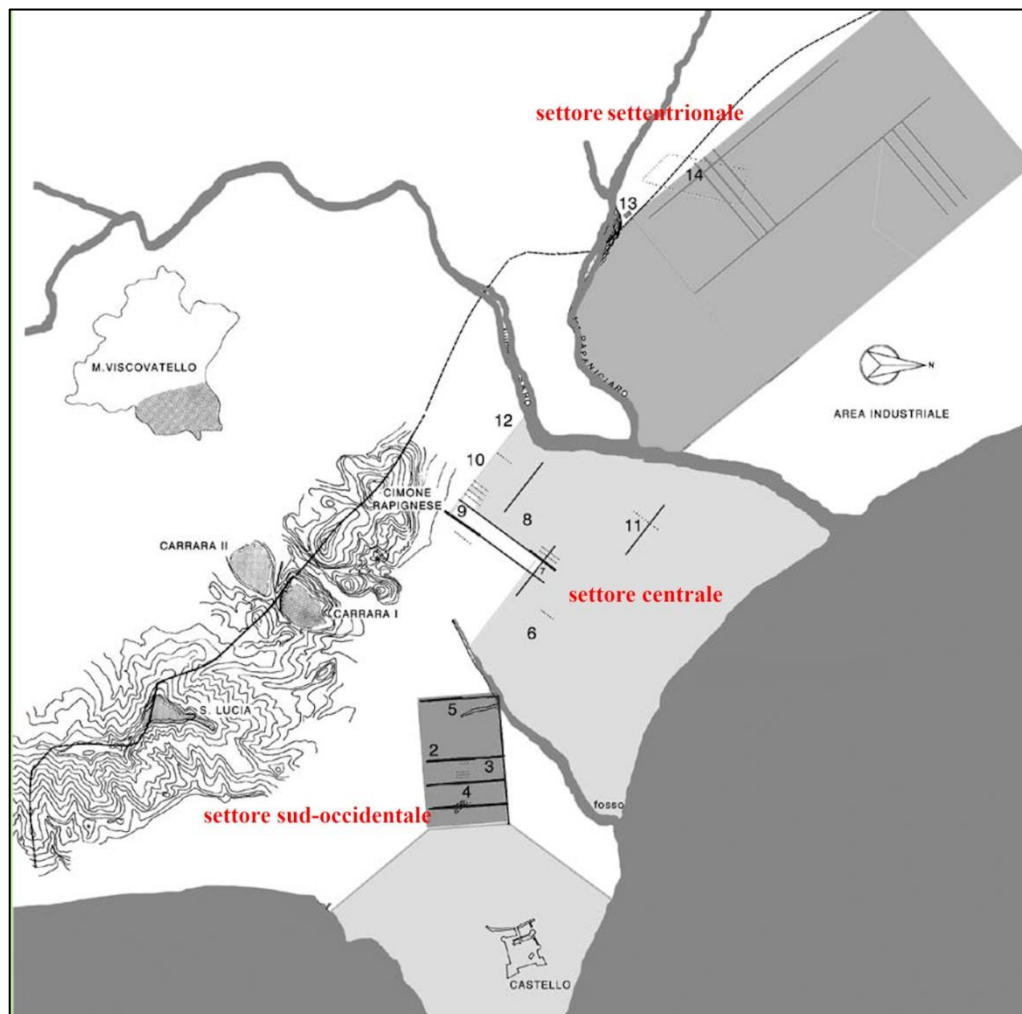


Figura 1: Crotona, impianto urbanistico con l'individuazione dei 3 settori: settore sud-occidentale o meridionale, settore centrale e settore settentrionale (da SPADEA 2014).

¹⁴ QUILICI 1977, p. 20; CAVAGNARO VANONI, LININGTON 1977, p. 682

¹⁵ LATTANZI 1999, p. 920; RUGA 1998, pp. 88-89.

¹⁶ SPADEA 1993, p. 23.



Nell'area corrispondente al settore sud-occidentale o meridionale della città antica le indagini archeologiche si sono succedute soprattutto a partire dagli anni '60, parallelamente all'espansione edilizia.

In questo settore l'abitato appare disposto su terrazze digradanti verso il mare e verso il torrente Pignataro, seguendo il lieve pendio naturale delle colline, opportunamente regolarizzato: come risulta in ogni fase edilizia, evidenziata nel cantiere della Banca Popolare Cooperativa, i piani di frequentazione della metà occidentale dell'isolato indagato sono posti, infatti, ad una quota leggermente inferiore (ca. 50 cm) rispetto a quella della metà orientale¹⁷.

Scavi condotti a più riprese in diversi settori hanno permesso di ricostruire, seppur parzialmente, il sistema stradale di quest'area che si articola su una serie di *stenopoi*, la *plateia* rinvenuta in via Veneto, e, verosimilmente, su di un asse di attraversamento importante, un'altra *plateia* identificabile con quasi totale certezza nel percorso dell'attuale via Cutro¹⁸. Seppur non archeologicamente documentata questa sopravvivenza sarebbe testimoniata dalla sua direttrice di sviluppo che partendo dall'acropoli, corre tra i due quartieri più importanti della città, e conduce verso le necropoli di contrada Carrara, la parte terminale del Fosso Pignataro e verso ovest, costituendo un asse di attraversamento importante per la città.

In questo settore l'impianto della rete stradale era stato attribuito in un primo tempo ai decenni tra la fine del VII e gli inizi del VI sec. a.C.¹⁹, mentre in base ai dati emersi dallo scavo del settore di abitato, individuato nel cantiere della Banca Popolare Cooperativa, la sistemazione urbana è stata datata entro la metà del VII²⁰.

Nel quartiere la larghezza degli *stenopoi* è di 4,7/5,3 m, distanziati, nelle zone individuate, di circa 35/36 m l'uno dall'altro. La lunghezza complessiva dell'isolato raggiungerebbe, invece, 70/70,5 m ca., in un'articolazione *per strigas* che pare rimanga invariata fino al IV sec. a.C.²¹. La *plateia* identificata nell'area dell'attuale edificio comunale, sulla base dei dati emersi dallo scavo di un tratto di metanodotto aveva una larghezza di 12 m²².

¹⁷ RACHELI 2014, p. 20.

¹⁸ LIPPOLIS, STOCICO 2014, p. 137, con bibliografia precedente.

¹⁹ SABBIONE 1976, pp. 589-595; SPADEA 1984, p. 127.

²⁰ RACHELI 2010, pp. 248, 256. In realtà, anche in quest'ultimo caso, le prime strutture murarie riconosciute sono databili tra la fine del VII e l'inizio del VI sec. a.C.

²¹ LIPPOLIS, STOCICO 2014, p. 135, con bibliografia precedente.

²² SPADEA 1993, p. 23.

Gli elementi del reticolo viario individuati nel corso degli scavi sono riferibili a tre *stenopòs*, cui si deve aggiungere quello del cantiere per il padiglione di Microcitemia²³ (fig. 2). Il primo ($\alpha 1$), largo m 5.20 a N e 4.80 a S, è stato messo in luce per un tratto di circa 20 metri nel cantiere di via Firenze. Un tratto più settentrionale del medesimo *stenopòs*, perfettamente allineato con esso, è stato individuato nel cantiere della Banca Popolare Cooperativa ($\alpha 2$), largo, come gli altri assi viari accertati nella città, circa 5 metri. Lo scavo di un saggio nella parte settentrionale di questo *stenopòs* ha permesso di offrire dati significativi relativi al reticolo viario, confermando che l'impostazione generale dell'impianto urbano e riconducibile alle prime fasi dell'impianto della colonia. Dai dati emersi dallo scavo è possibile ipotizzare la presenza di un altro *stenopòs* (β) anche se la presenza della strada e delle abitazioni moderne non ha consentito di verificarne la presenza. Un altro asse viario (η), della consueta ampiezza, è stato accertato più ad est, nell'area di via Tedeschi, per un tratto di circa 70 metri.

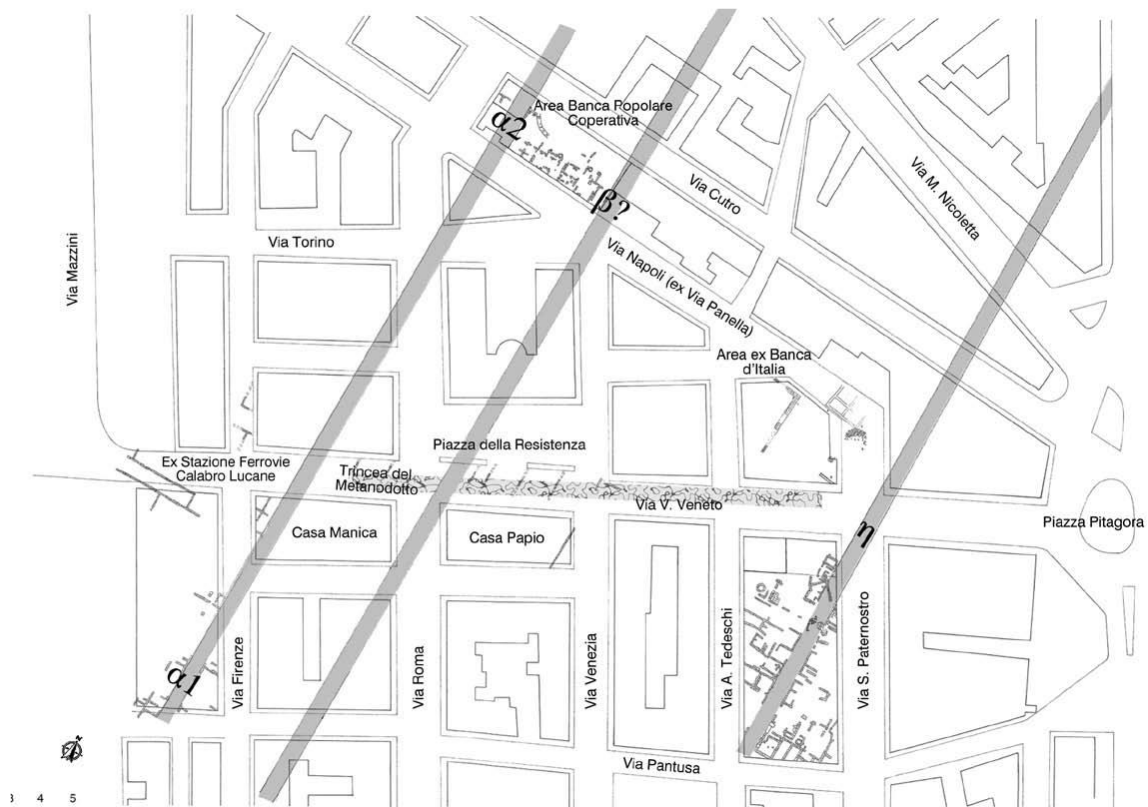


Figura 2. Settore meridionale o sud-occidentale, ricostruzione dell'impianto urbano da SPADEA 2014.

²³ VERBICARO 2014.



Una strada si potrebbe poi ragionevolmente ipotizzare a ridosso dell'ex Banca d'Italia, sulla base dello schizzo del Lucente, *stenopòs*, che pur con tutta l'incertezza dovuta all'imprecisione del posizionamento, rispetta la misura di 35-36 metri dall'asse viario η del complesso di Via Tedeschi. Tra le vie Tedeschi e S. Paternostro molti indizi fanno supporre la presenza di un santuario, ascrivibile almeno alla metà del VI secolo a.C.: in particolare una testa di kouros in terracotta, varie statuette votive, una massiccia ara in pietra arenaria e la testa mutila di un acrolito di marmo della metà del V secolo a.C. Tuttavia questi elementi non sono determinanti per l'attribuzione delle massicce strutture, rinvenute nell'area della via Tedeschi, ad un tempio²⁴. Lo Spadea formula analoghe considerazioni per l'area di via Firenze, qui infatti la presenza di un'area sacra di età arcaica sarebbe indiziata da un frammento di statuette di tipo sub-dedalico, rinvenuto nel corso degli scavi effettuati nel 1974, da mettere forse in relazione "ad altre problematiche tracce rinvenute nel corso dello scavo delle condutture del gas nella vicina via Veneto"²⁵, tra cui un muro in opera quadrata²⁶. Sia il cantiere di via Tedeschi che della Banca testimoniano un drastico cambiamento verso la fine del III sec. a.C., con la distruzione, apparentemente violenta, e un radicale cambiamento della destinazione d'uso dell'area in cui sono realizzate delle fornaci. L'area, ormai definitivamente abbandonata, non conosce più successive edificazioni fino alla fine del I secolo d.C., quando in essa si impianta una fitta necropoli, con fasi fino al IV secolo d.C.²⁷.

²⁴ SPADEA 1983, p. 136; RACHELI 2010, p. 244; RACHELI 2014, pp. 38-39.

²⁵ SPADEA 1983, p. 136 e nota 41.

²⁶ RACHELI 2010, p. 244.

²⁷ RACHELI 2014, p. 49.



Metodologie d'indagine

Al fine di caratterizzare la sottosuperficie sulla base di quanto sopra esposto, sono state impiegate le seguenti metodologie di indagine geofisiche:

- Tomografia elettrica 3D da superficie (ERT3D) per la caratterizzazione elettro-stratigrafica del sottosuolo fino ad una profondità di circa 11m dal p.c.;
- Georadar (GPR) metodologia Stream X – 200MHz e metodologia Raptor – 450Mhz per la verifica della presenza di strutture antropiche sepolte e disomogeneità fino ad una profondità di 1.5m dal p.c. con la prima metodologia e circa 3m dal p.c. con la seconda.

Tomografia di Resistività Elettrica (ERT 3D)

La tomografia di resistività elettrica (ERT) è una tecnica diagnostica che consente di determinare la distribuzione di resistività elettrica nel sottosuolo a partire da un gran numero di misure di potenziale elettrico compiute mediante elettrodi posti sulla superficie del terreno. Il sistema dei profili elettrici superficiali con dispositivo multi-array per Tomografia Elettrica di Resistività è una metodologia innovativa in quanto evoluzione delle misure geoelettriche classiche, intesa ed applicata in modo tale da ottenere risoluzioni spaziali elevate. Il sistema permette di ricostruire la distribuzione spaziale in 2 e 3 dimensioni della resistività reale nel sottosuolo con una risoluzione che dipende dalla distanza tra gli elettrodi. L'utilizzo di elettrodi in configurazione non convenzionale, lungo il perimetro di edifici o di manufatti in genere, rappresenta uno sviluppo di ultimissima generazione della tecnica (FISCHANGER et al., 2007). Ciò consente di analizzare con buon dettaglio le strutture di fondazione dell'edificio oltre alle caratteristiche locali del terreno di appoggio (tipo di litologia, zone umide o sature, anomalie resistive attribuibili a cavità o a disomogeneità del terreno al di sotto dell'edificio). Questa metodologia di indagine consente dunque il superamento di quei vincoli che il contesto urbano pone alle tradizionali indagini geotecniche (prove penetrometriche e sondaggi geognostici) e nel contempo consente di acquisire una informazione completa ma sulle caratteristiche volumetriche del terreno investigato.

La misura delle resistività del terreno viene effettuata, nella maggior parte dei casi, utilizzando dispositivi riconducibili ad uno schema di configurazione a quadripolo. Uno strumento, denominato georesistivimetro, immette nel sottosuolo mediante due elettrodi - in genere indicati con A e B - una corrente nota I e misura, tramite due altri elettrodi - M e N - la differenza di potenziale ΔV che tale

corrente produce nei punti del terreno nel quale sono stati posti gli elettrodi stessi (Figura 3).

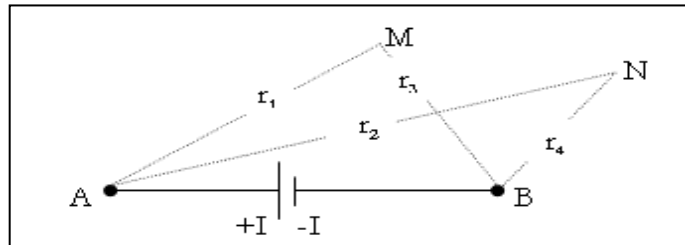


Figura 3: Configurazione elettrodica generica per la misura delle resistività del sottosuolo.

Se il sottosuolo fosse omogeneo e isotropo, la sua resistività ρ sarebbe calcolata attraverso la seguente relazione:

$$\rho = K \cdot \Delta V / I,$$

dove K, fattore geometrico, funzione solo della posizione reciproca degli elettrodi, è dato da:

$$K = 2\pi / (1/r_1 - 1/r_3 - 1/r_2 + 1/r_4).$$

Se il terreno è disomogeneo, la differenza di potenziale ΔV è funzione, oltre che della distanza tra gli elettrodi, anche della distribuzione di resistività nel sottosuolo: di conseguenza il valore di ρ calcolato mediante le espressioni sopra scritte non coincide con il valore di resistività di uno dei mezzi presenti, ma è una funzione della resistività e della posizione dei mezzi stessi nel sottosuolo. Tale valore viene chiamato resistività apparente e può essere pensato come la resistività di un mezzo omogeneo e isotropo che, energizzato con la stessa corrente, dia luogo alla stessa differenza di potenziale tra gli elettrodi. Al variare della posizione degli elettrodi rispetto ai mezzi presenti, la resistività apparente varia, indicando la presenza di tali mezzi: obiettivo della tomografia di resistività elettrica è dunque quello di ricostruire al meglio forma, posizione e resistività dei mezzi a partire da più misure di resistività apparente.

Per illustrare le ragioni che rendono percorribile nell'indagine geoelettrica 3D l'utilizzo di geometrie "non convenzionali", come quella anulare, sono riprodotte nella figura 3 le mappe ricavate dall'analisi di sensitività per un modello resistivo omogeneo, sottoposto a indagine con stendimento di elettrodi superficiali a forma di L. Tali mappe indicano le regioni dello spazio che influenzano ciascuna misura di potenziale, dando dunque un'idea circa la risoluzione spaziale del metodo.

Nella sezione a) è rappresentata la mappa di "sensitivity" per un piano orizzontale - profondità del piano campagna pari a 1,5 metri; nella sezione b) della figura 4 è presente una sezione verticale che

interessa gli elettrodi del quadripolo in esame (misura polo-dipolo di tipo cross-cable, cioè con trasmettitore su un ramo della L e dipolo di ricezione sull'altro ramo). Le immagini mettono bene in evidenza come per un tale quadripolo ci sia un ottimo grado copertura e di risoluzione della misura, anche in quelle zone che non sono direttamente occupate da elettrodi.

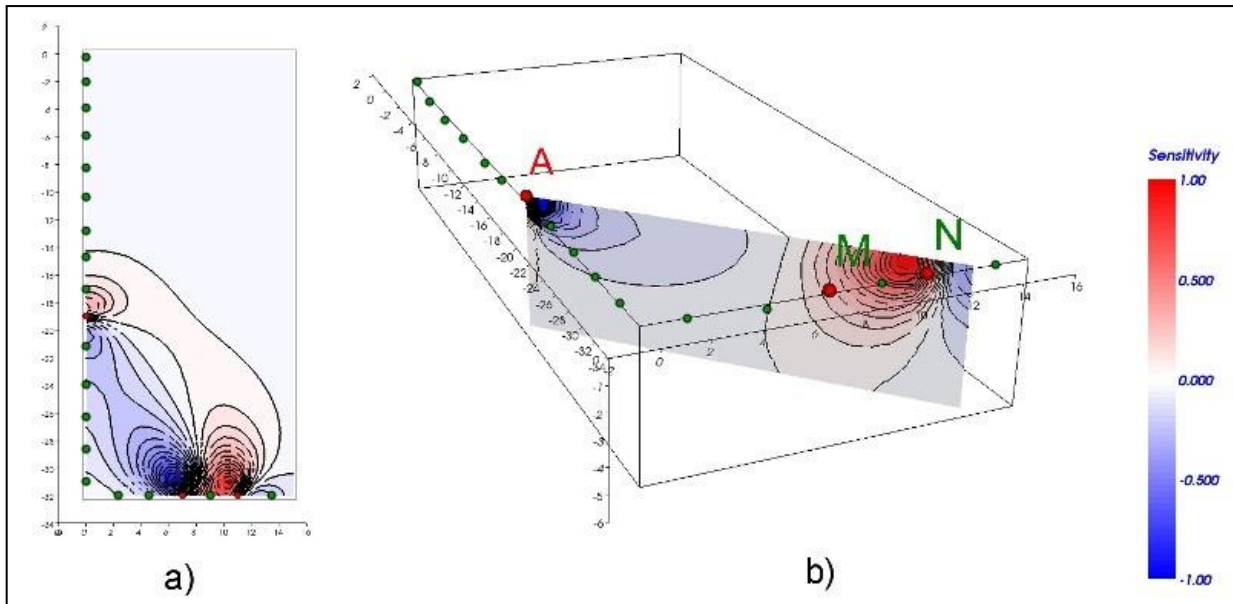
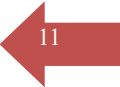


Figura4: Esempio di mappe di sensibilità per un quadripolo di geometria a L.

Si ottengono così centinaia di misure per ciascuna sezione di interesse e, con un apposito algoritmo di inversione, è possibile ricostruire la distribuzione di resistività reale del sottosuolo.

Le misure, infatti, sono interpretate mediante uno specifico software di inversione dei dati (ERTLab, sviluppato da Geostudi Astier srl), capace di ricostruire la distribuzione di resistività reale e caricabilità utilizzando il metodo degli elementi finiti.

Le misure a bassa frequenza (elettriche) permettono di minimizzare l'entità dei disturbi causati da servizi sotterranei e/o in superficie tipicamente presenti all'interno di aree urbane e complessi industriali.

Per quanto riguarda l'interpretazione delle sezioni geoelettriche, in funzione dei terreni presenti nelle aree indagate, è possibile schematizzare nel modo seguente:

Alta resistività (colori rosso-arancio)	Bassa resistività (colori blu-viola)
Terreni di riporto asciutti, sabbie e ghiaie, materiali elettricamente isolanti, guaine, solette e condutture in cemento non armato, trovanti, frammenti litoidi, massicciate stradali e ferroviarie, cavità, fluidi resistivi (idrocarburi, solventi, ecc.)	Terreni limo-argillosi, argille, masse metalliche, strutture con parti metalliche, serbatoi, zone umide, fluidi conduttivi (elevata salinità)

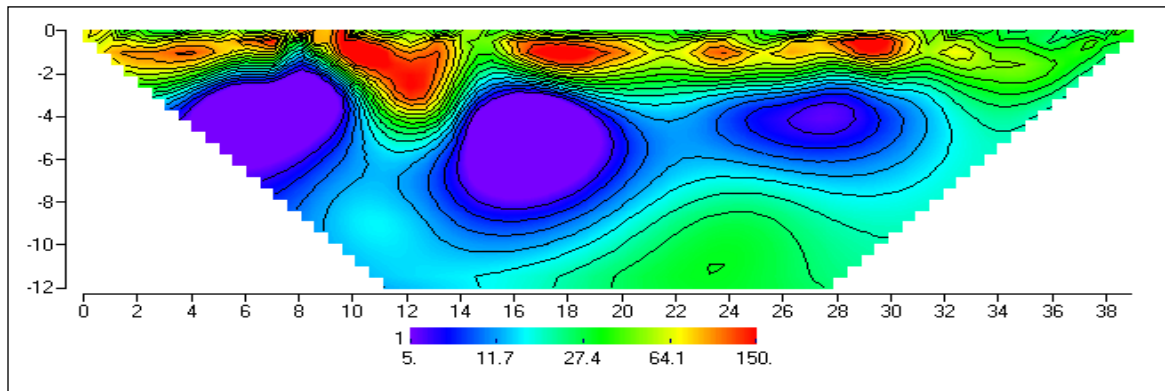


Figura 5: Esempio generico di un elaborato geoelettrico che evidenzia le zone conduttive (colorazione blu-viola) e quelle resistive (colorazione rosso-arancio).

Ground Penetrating Radar (GPR)

Il georadar (GPR) utilizza la riflessione delle onde elettromagnetiche per l’ esplorazione degli strati superficiali del sottosuolo. Nei casi più favorevoli, il metodo permette l’ investigazione fino a circa 30 metri di profondità utilizzando antenne di idonea frequenza.

Una antenna emittente manda nel sottosuolo impulsi di energia elettromagnetica di brevissima durata (nanosecondi). Quando questi impulsi incontrano un contatto tra materiali di diversa composizione, una parte dell’ energia è riflessa verso la superficie dove viene captata tramite un’ antenna ricevente, amplificata e registrata.

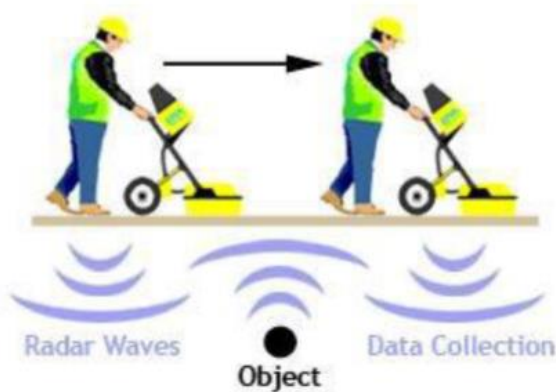


Figura 6: Schema che rappresenta in maniera stilizzata l'indagine tramite GPR

L'utilizzo di antenne a frequenza diversa (da 15 a 2500 MHz) permette l'applicazione del georadar per la risoluzione di uno svariato numero di situazioni. Più bassa è la frequenza dell'antenna, più grande è la penetrazione a scapito di una risoluzione (capacità di rilevare oggetti piccoli) decrescente. Per questo, dato che il potere risolutivo aumenta con la frequenza, le antenne ad alta frequenza sono adatte per la ricerca di anomalie a piccola profondità (1-5m); le antenne a bassa frequenza sono utilizzate per la prospezione di anomalie importanti a maggiore profondità (5-30m).

Una forte limitazione all'uso del georadar è data dalla presenza di formazioni geologiche con alta costante dielettrica le quali tendono ad assorbire, anche totalmente, gli impulsi elettromagnetici. In corrispondenza, quindi, di falde acquifere superficiali o terreni ad alto contenuto di argilla l'uso di questa tecnologia non permette di ottenere risultati adeguati.

Il risultato dell'indagine, immediatamente disponibile, è una sezione continua del sottosuolo, l'ascissa corrisponde al percorso dell'antenna, l'ordinata ai tempi andata-ritorno necessari alle onde elettromagnetiche per raggiungere nel sottosuolo gli orizzonti o gli oggetti riflettenti. L'interpretazione qualitativa è normalmente facile, poiché la correlazione tra le anomalie della sezione radar e le anomalie ricercate è immediata nella maggioranza dei casi. L'interpretazione quantitativa richiede la determinazione della velocità media delle onde nei terreni di copertura. Tra i targets riflettenti identificabili con una indagine georadar citiamo:

- contatti geologici e piani di stratificazione;
- livelli di asfalto e relativi spessori;
- piani di fratturazione;



- diversi strati di un rivestimento;
- vuoti, cavità, condotte, gallerie;
- reperti archeologici;
- terreni di riporto (discariche, servizi interrati etc.);
- fusti, mine e oggetti metallici in genere;
- tubazioni sotterranee di plastica, metallo o cemento;
- serbatoi;
- strutture in cemento armato;
- perdite di liquidi organici liquidi ad alta resistività.

Strumentazione utilizzata

Syscal Pro (IRIS Instruments)

Per l'acquisizione di dati geoelettrici, è stato utilizzato il georesistivimetro Syscal Pro Switch 96, prodotta dalla IRIS Instruments (Francia); è uno strumento solido e versatile, in grado di gestire fino a 96 elettrodi simultaneamente, utilizzabile sia per indagini in pozzi che in superficie tramite l'utilizzo di cavi posizionati a terra o sulla superficie dell'acqua. Le misure vengono eseguite e registrate automaticamente su più canali contemporaneamente, consentendo di collezionare fino a 40.000 letture.

Il trasmettitore (tensioni massime applicabili agli elettrodi di trasmissione intorno a 800 V e correnti massime intorno a 2,5 Ampere), il ricevitore (tensione massima 15 V, risoluzione) e l'unità di commutazione sono riuniti in un singolo box, dotato di una batteria interna di 12 V interno grazie alla quale è possibile evitare l'uso del generatore CA, riducendo una certa fonte di disturbo esterna. La potenza massima applicata è di circa 250 W (500 W con un convertitore DC / DC esterno). Il peso totale è solo di 15 kg. Se necessario, la gamma di fornitura Syscal Pro può essere estesa con una batteria esterna 12V standard.



Figura 7: Syscal Pro Switch della IRIS Instruments

I dati acquisiti sono stati elaborati mediante software ERTLab 64 sviluppato e prodotto da Geostudi Astier srl (Livorno).

Stream X (IDS)

Il sistema georadar multi-antenna IDS STREAM X, a differenza di un sistema tradizionale mono-antenna, richiede tempi di acquisizione ridotti e consente di ottenere una maggiore risoluzione. Stream X è in grado di soddisfare i seguenti requisiti:

- È adatto all'utilizzo su superfici relativamente sconnesse;
- Copre con un'unica passata una fascia di larghezza pari a circa 2m di superficie in copertura totale;
- La particolare disposizione delle antenne consente di non acquisire i profili trasversali.

Lo STREAM X è un sistema configurabile con una schiera di 16 antenne a 200 MHz, che assicura una griglia di campionamento pari a 12 cm, oppure in alternativa con una schiera di 16 o 32 antenne a 600 MHz, capace di fornire una migliore capacità di risoluzione in superficie (a fronte di una minore capacità di penetrazione in profondità) con una griglia di campionamento fino a 6 cm.

Questi intervalli di campionamento pongono sicuramente il sistema Stream X nella fascia di prodotti a più alta definizione assicurando risultati di alta qualità sia alle medie che alle alte profondità.

Nel caso in esame è stato utilizzato un sistema a 16 canali a 200 MHz, composto da 8 antenne TX e 8 antenne RX, distanziate tra loro di 12 cm:



Figura 2: georadar IDS Stream X

Il software di acquisizione dati radar gestisce in modo automatico tutti i canali di acquisizione registrando le direzioni e le relative coordinate di posizione cartografica.

Lo STREAM X vanta un sistema di posizionamento di tipo doppler che assicura accuratezze di misura elevate anche su superfici sconnesse. Ovviamente Stream X è in grado di gestire le informazioni di posizione provenienti da GPS o da Stazione Totale in modo da gestire i risultati in modo efficiente anche su sistemi GIS.

Durante fase di acquisizione dati l'operatore dispone a video di un navigatore che in tempo reale lo informa della sua posizione occupata dal sistema di antenne e quindi della copertura effettuata: questo gli consente di coprire l'area in modo completo ed omogeneo senza dover ripassare su aree già investigate.

Raptor- ImpulseRadar

Il sistema georadar multi-antenna IMPULSERADAR RAPTOR è un sistema GPR in grado di acquisire estese aree a copertura totale. E' costituito da un array di 18 antenne schermate ad una frequenza di 450MHz con trasmettitori e ricevitori separabili, consentendo quindi estrema versatilità sia nelle misurazioni radar standard che quelle più avanzate.

Si tratta di un sistema capace di acquisire ad elevate velocità senza la necessità di strusciare sulla

superficie da acquisire, garantendo quindi un buon risultato anche su superfici più accidentate. Inoltre, ha la possibilità di essere trainata da un mezzo (come in questo) velocizzando molto le tempistiche di acquisizione senza sacrificare la risoluzione e precisione del dato.

RAPTOR è in grado di gestire le informazioni di posizione provenienti da GPS in modo da gestire i risultati in modo efficiente anche su sistemi georiferiti.



Figura 3: georadar IMPULSERADAR Raptor

Sistemi di posizionamento

Le posizioni degli elettrodi e del sistema Stream X sono state rilevate tramite un rilievo piano – altimetrico di dettaglio con l’ausilio di una stazione totale (Total Station Leica, modello TS50) e di un GPS (GS18 Leica).

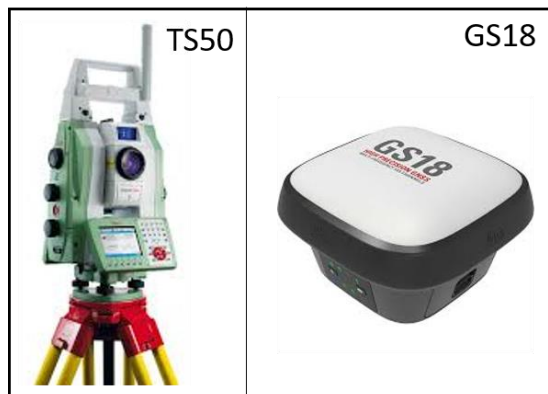


Figura 4: Ts50 e GS18 Leica

Acquisizione dati

Acquisizione dati GPR

L'indagine radar, eseguita tramite sistema multi-array *Stream X* e multi-array *Raptor* a copertura totale, ha interessato le seguenti aree evidenziata in Figura 10 (in rosso zona acquisita con metodologia Raptor, in blu con metodologia Stream X).

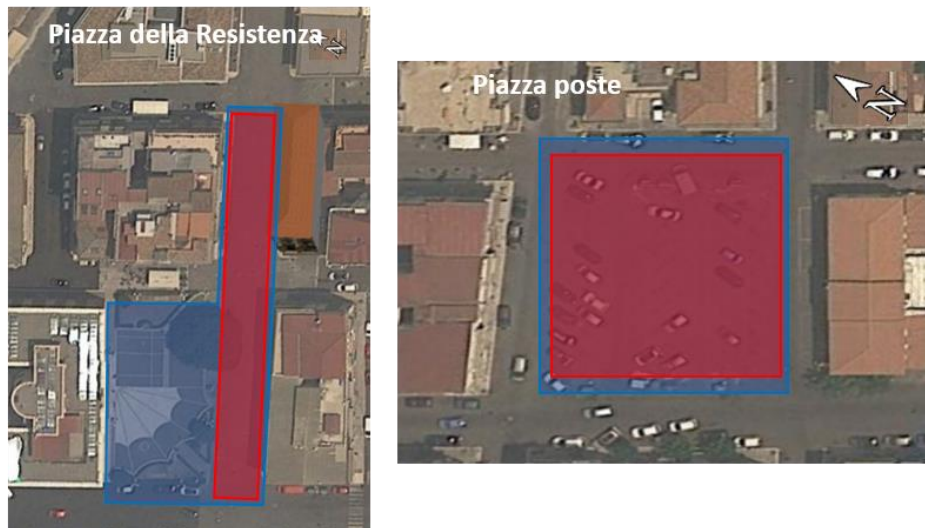


Figura 5: Aree acquisite tramite metodo GPR. In rosso acquisizione con Raptor, in blu acquisizione con Stream X

Acquisizione dati ERT

Le indagini ERT sono state acquisite tramite stendimenti da 96 elettrodi a passo di campionamento pari a 2m come mostrato in Figura 11, con configurazione polo – dipolo e Wenner – Schumberger.

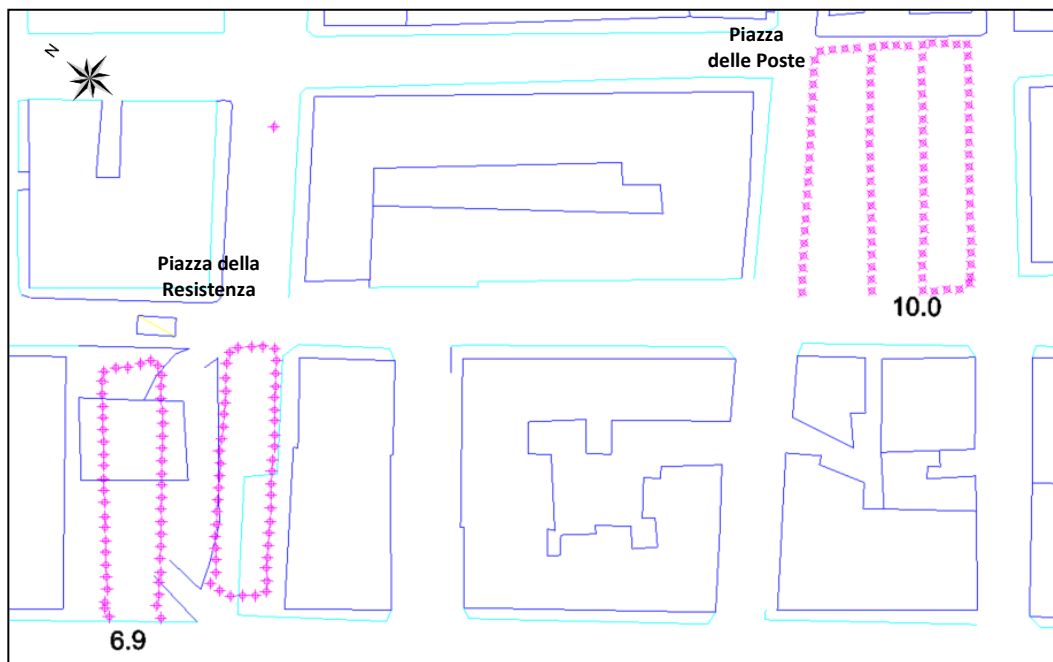


Figura 6: Geometria linee ERT, in rosa gli elettrodi

L'elaborazione 3D congiunta dei dati acquisiti con tali configurazioni ha permesso di ottenere risultati con buona risoluzione sia nella parte più superficiale che quella più profonda, raggiungendo circa 11m di profondità dal piano campagna.

Elaborazione dati

Elaborazione dati Georadar

I dati acquisiti tramite Stream X sono stati elaborati con il software GRED HD CAD (IDS), che offre all'operatore un ambiente di lavoro integrato tra il mondo radar e quello CAD.

Tramite appositi filtraggi ed elaborazioni specifiche, sono state prodotte sezioni verticali (radargrammi) e mappe orizzontali (Timeslices), che consentono la visione in pianta delle aree a diversa profondità.

Viene di seguito riportato un esempio di sezione verticale prima e dopo l'apposita elaborazione (Figura 12)

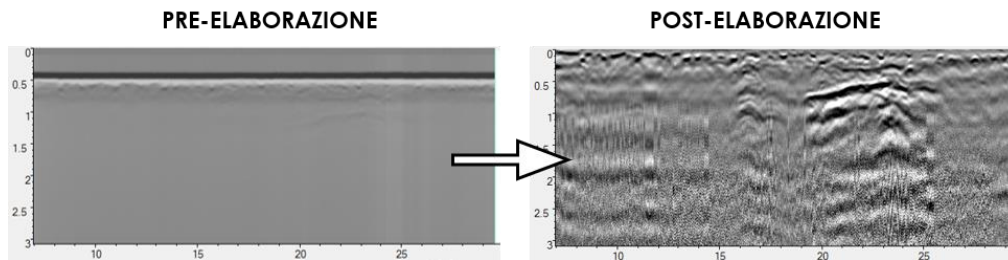


Figura 7: Esempio di radargramma acquisito con Stream X, prima e dopo l'elaborazione

A titolo di esempio viene riportata una sezione orizzontale relativa a -0.50m dal piano campagna per ogni area investigata (

). Le gradazioni in rosso corrispondono alle aree ad alta riflettività, causate da eterogeneità della sottosuperficie; in blu le aree a bassa riflettività.

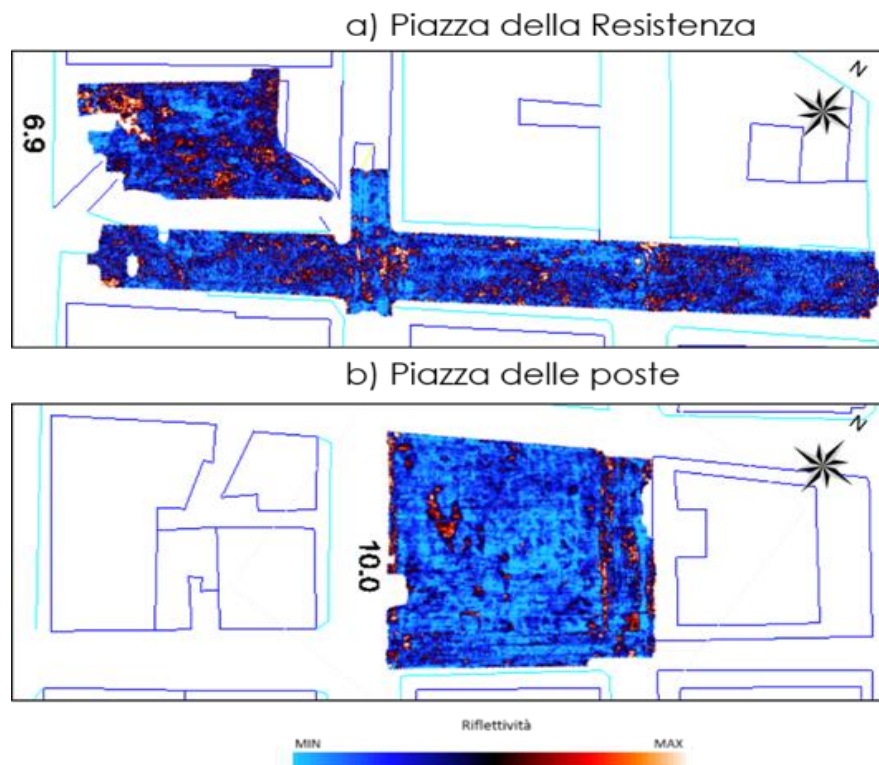


Figura 8: Sezioni orizzontali Stream X a -0.50m dal p.c

Per quanto riguarda invece l'elaborazione dei dati acquisiti tramite la metodologia Raptor è stato utilizzato un software interno, tramite il quale sono state prodotte mappe orizzontali a diverse profondità.

A titolo di esempio vengono riportate nella figura sottostante le mappe orizzontali alla profondità di -2.50 m dal piano campagna per ciascuna area.

Sono state utilizzate diverse scale colori al fine di esaltare al meglio i contrasti dovuti alle eterogeneità della sotto superficie.

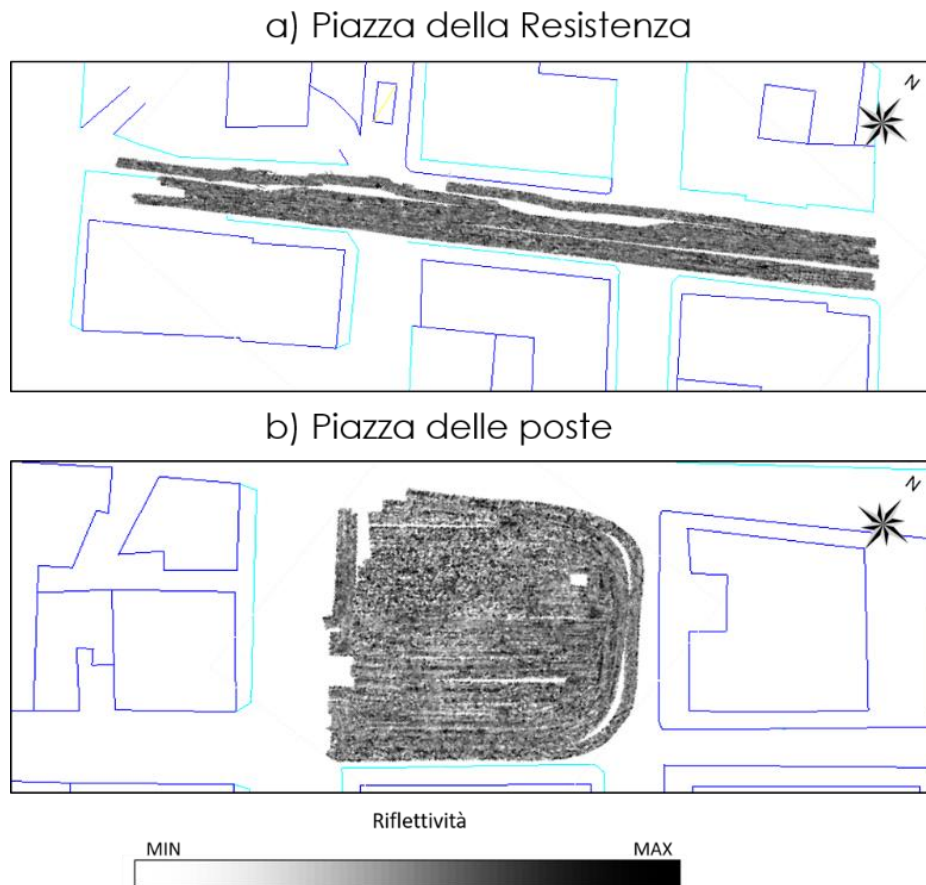


Figura 9: Sezioni orizzontali Raptor a -2.50m dal p.c.

Elaborazione dati ERT 3D

La campagna di misure ERT è stata effettuata sia in Piazza della Resistenza che in Piazza delle poste attraverso linee parallele caratterizzate da 96 elettrodi distanti tra loro circa 2 metri, come mostrato

in Figura 15.

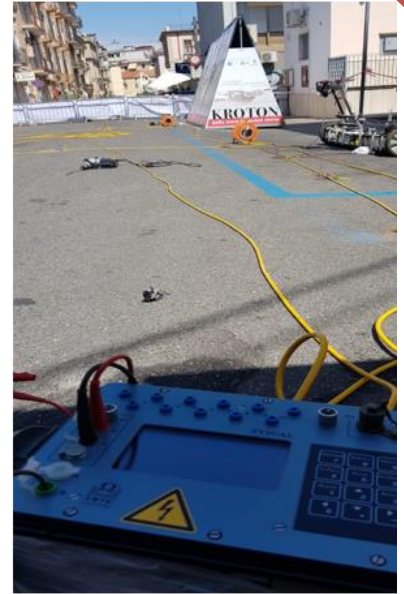
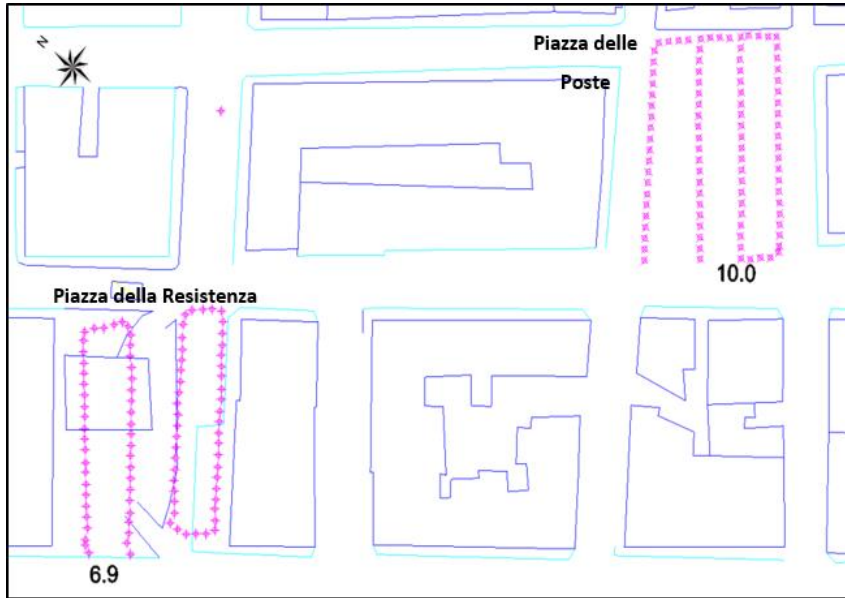


Figura 10: Geometria linee ERT a sinistra e SyscalPro a destra.

L'inversione dei dati, dopo opportuni procedimenti di filtraggio ed elaborazioni effettuati mediante il software ERTLab64 sviluppato da Geostudi Astier, ha fornito un volume di resistività elettrica delle aree indagate a partire dal piano campagna fino a circa **11 metri** di profondità dal piano campagna.

A titolo esemplificativo viene di seguito riportata una sezione verticale e orizzontale per entrambe le aree a profondità di circa -4metri dal piano campagna.

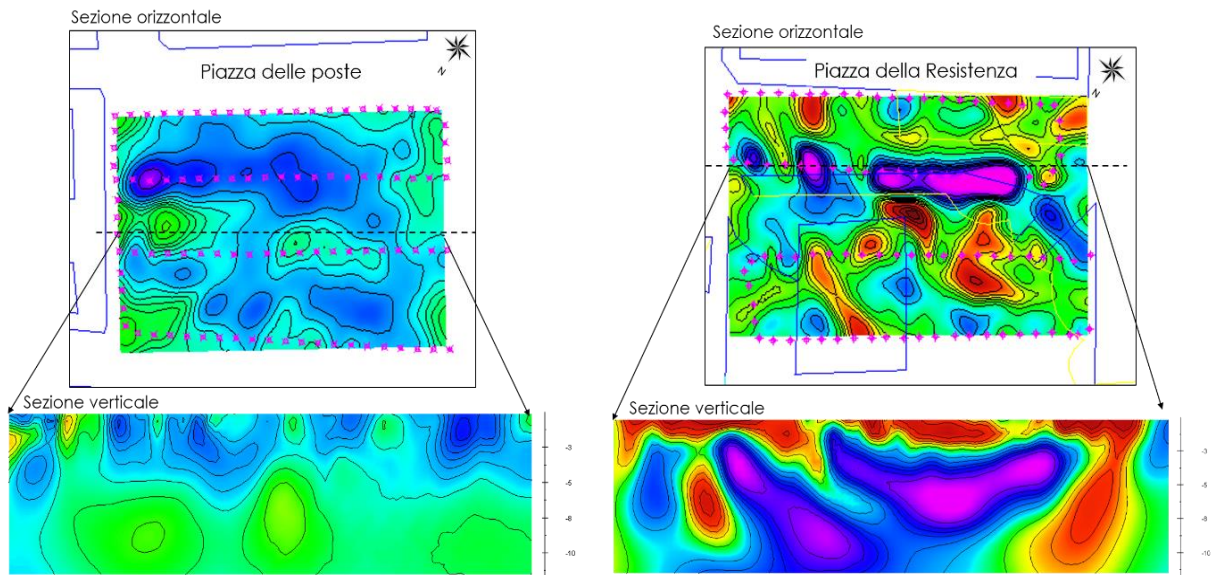


Figura 11: Esempio di Sezioni ERT orizzontali e verticali.

Analisi dei risultati

Risultati indagine ERT 3D

Le indagini ERT, effettuate sia in Piazza della Resistenza che in Piazza delle Poste, hanno permesso di investigare il sottosuolo a partire dal piano campagna fino a circa 11 metri di profondità.

La scala colori utilizzata per la visualizzazione dei risultati di entrambe le zone è caratterizzata da una graduale variazione di cromie (dal violetto che indica bassa resistività al bordeaux che indica alta resistività) che rispecchia il reale andamento delle resistività del terreno (Figura 17).



Figura 12: Scala colori per risultati indagine ERT

Come si può notare già dalla topografia (Figura 18), Piazza delle Poste si trova a quote più elevate rispetto a Piazza della Resistenza.

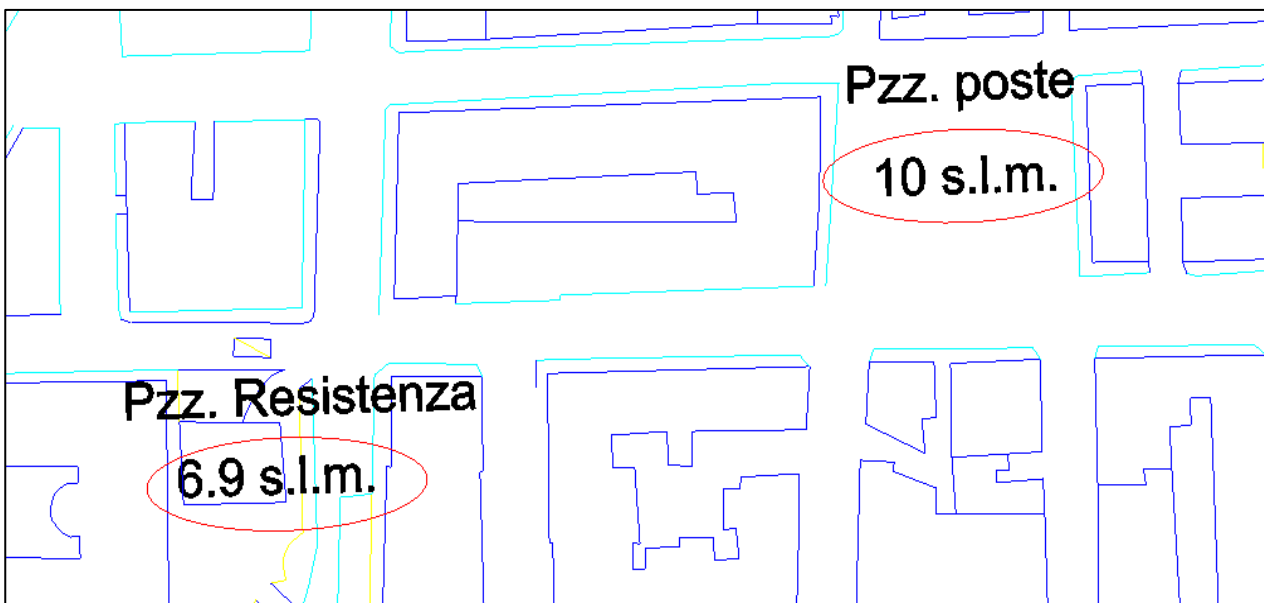


Figura 18: Planimetria Piazza delle Poste con indicazioni quote slm

I risultati dell'indagine elettrica mostrano chiaramente che il dislivello, di circa 3m, è colmato da materiale di riempimento estremamente conduttivo, il quale maschera il comportamento resistivo del terreno a profondità maggiori. Si tratta infatti di materiale caratterizzato dall'alternarsi di strati a matrice argillo-limosa e sabbia, in termini elettrici, di materiale caratterizzato da una bassissima resistività (5-20 Ω m).

In Piazza della Resistenza invece, come si nota in Figura 19, il materiale di riempimento è caratterizzato da resistività più elevate che lasciano apprezzare maggiormente la stratigrafia sottostante.

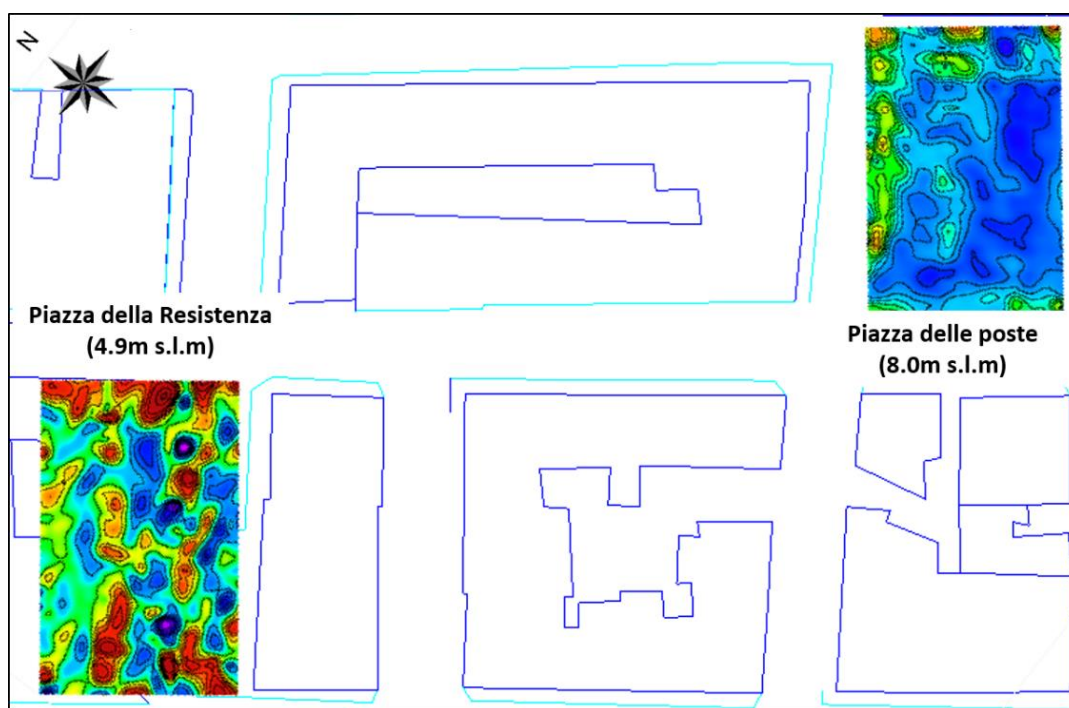


Figura 14: Sezione orizzontale ERT a -2m dal p.c., differenza tra Piazza della Resistenza e Piazza delle poste

Nonostante la difficoltà sopra descritta, in Piazza delle Poste, a partire da circa **3 metri** fino a circa **6 metri** di profondità dal piano campagna, si evince (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) una zona altamente conduttiva con geometria lineare allungata in direzione N-S.



Piazza delle poste

-3.0m dal p.c.

-4.0m dal p.c.

-5.0m dal p.c.

-6.0m dal p.c.

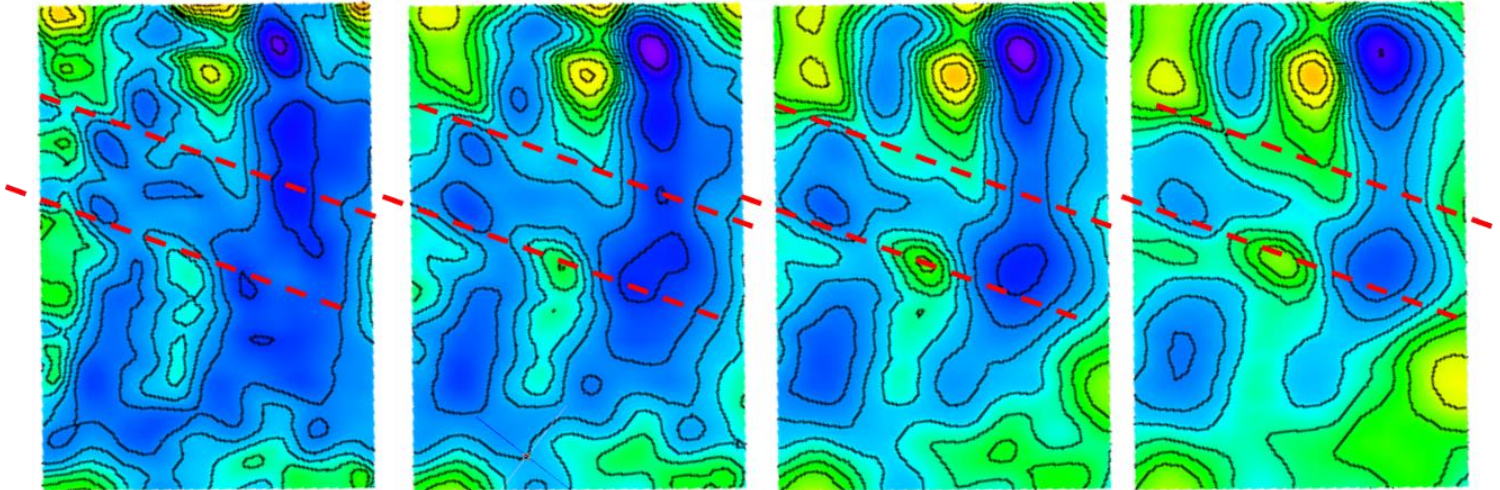


Figura 15: Risultati indagine ERT in Piazza delle Poste.

In Piazza della Resistenza, a 2 metri di profondità dal piano strada, si denota un'anomalia lineare altamente conduttiva con direzione NE-SO causata dalla presenza di tubazioni interrato (riquadro nero Figura 22). Inoltre, nella zona a nord, a circa 4 metri di profondità dal piano campagna, si evincono una serie di anomalie altamente resistive. La geometria allungata, parallela e perpendicolare delle stesse (puntinate in bianco in Figura 22) porterebbe a pensare che siano causate da antiche strutture antropiche.



Piazza della Resistenza

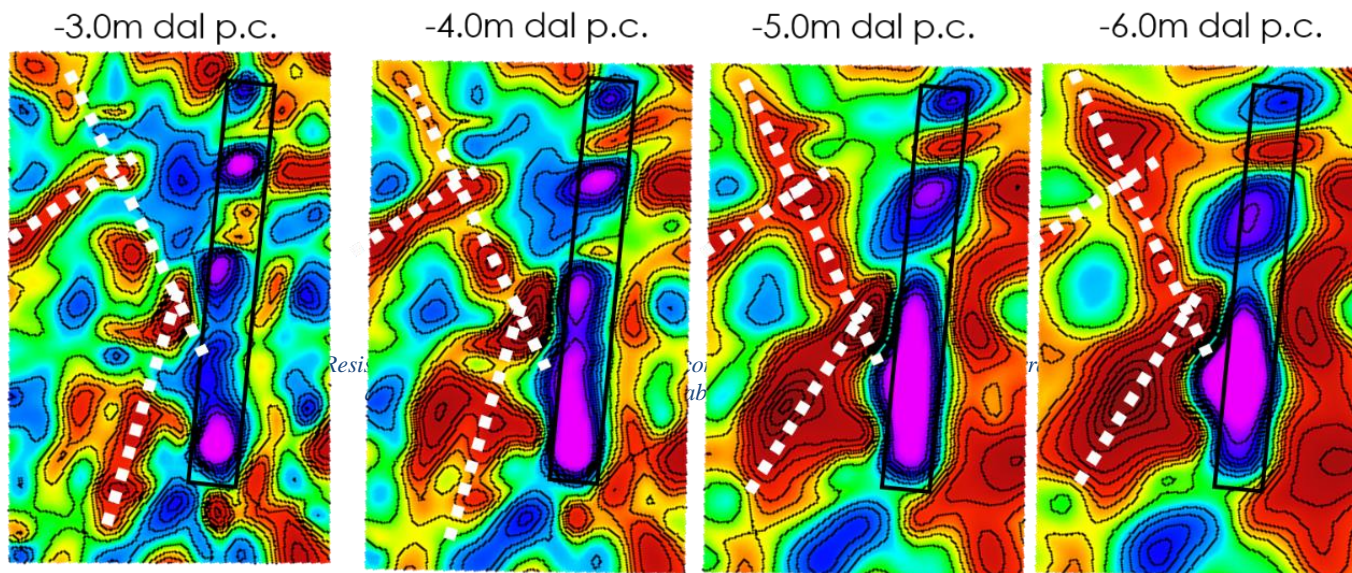


Figura 17: Piazza della Resistenza: Riquadro nero anomalia conduttiva dovuta a tubazioni sotterranee, puntinata in bianco anomalia resistiva dovuta a probabili strutture antropiche sepolte.

Risultati indagine Radar

Sia la presenza di materiale argillo-sabbioso al di sotto del calpestio e del materiale costituente la pavimentazione in Piazza della Resistenza sia le varie opere passate di dissesto in Piazza delle Poste, hanno provocato un forte assorbimento del segnale radar già nei primi decimetri di profondità causando quindi l'impossibilità nel generare risultati a profondità maggiori.

Le indagini effettuate con metodologia Stream X (Figura , **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) hanno permesso di investigare il sottosuolo nella porzione di terreno più superficiale fino a circa 1.50 metri di profondità dal piano campagna.

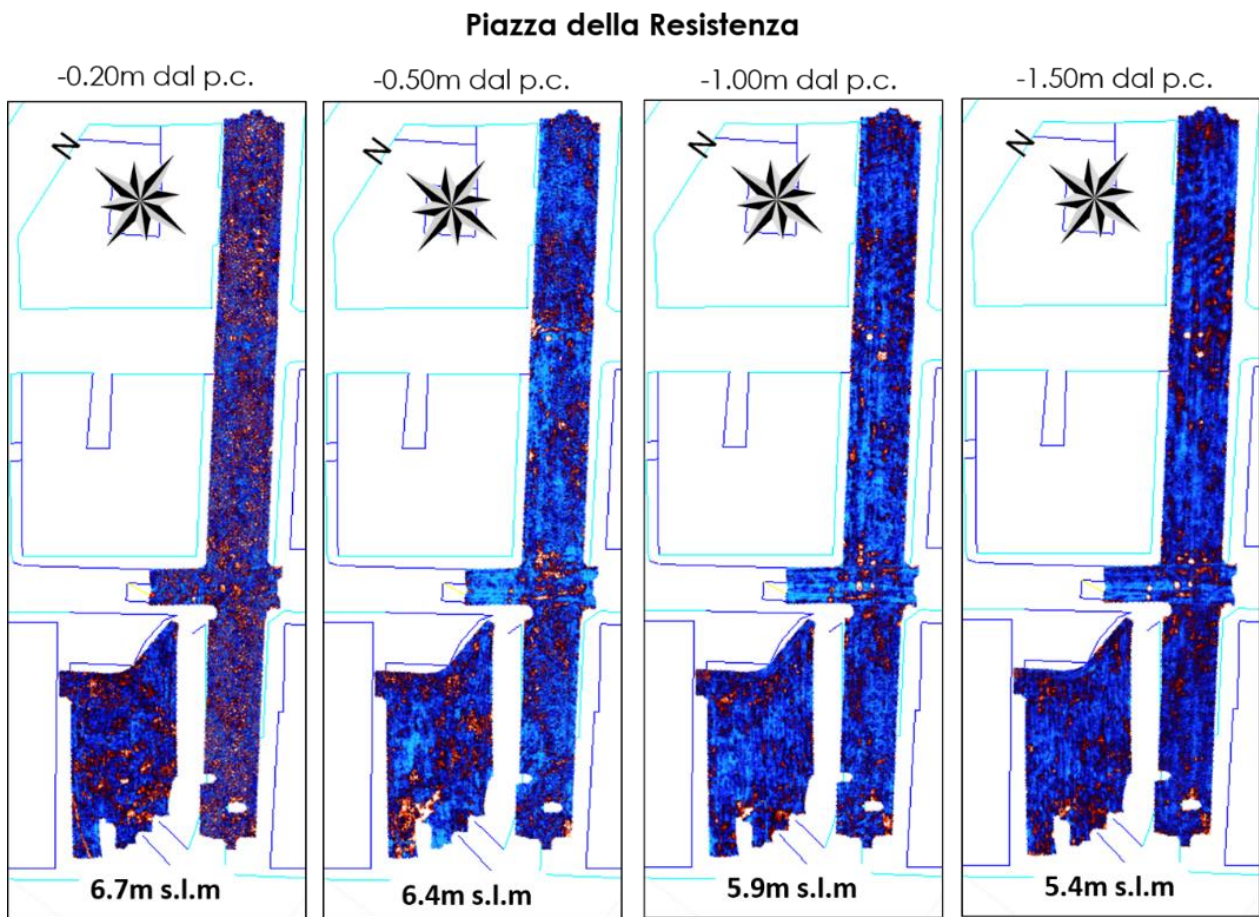


Figura 22: Sezioni orizzontali Radar Piazza della Resistenza, metodologia Stream X

Piazza delle poste

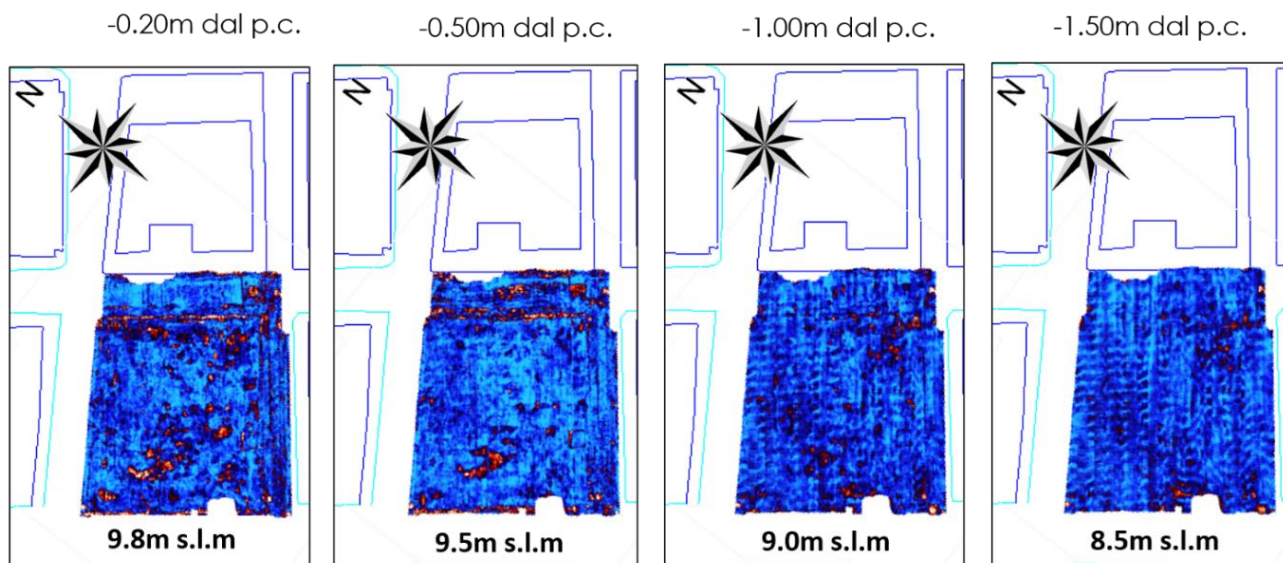


Figura 18: Sezioni orizzontali Radar Piazza delle poste, metodologia Stream X

La metodologia **Raptor** invece, pur essendo meno dettagliata nella parte superficiale, ha permesso di generare delle sezioni orizzontali fino a circa 2.7 metri di profondità dal piano campagna.

In Piazza della Resistenza tramite indagine radar non è stato possibile apprezzare alcun contrasto significativo di riflettività a causa delle problematiche sopra esposte (Figura).

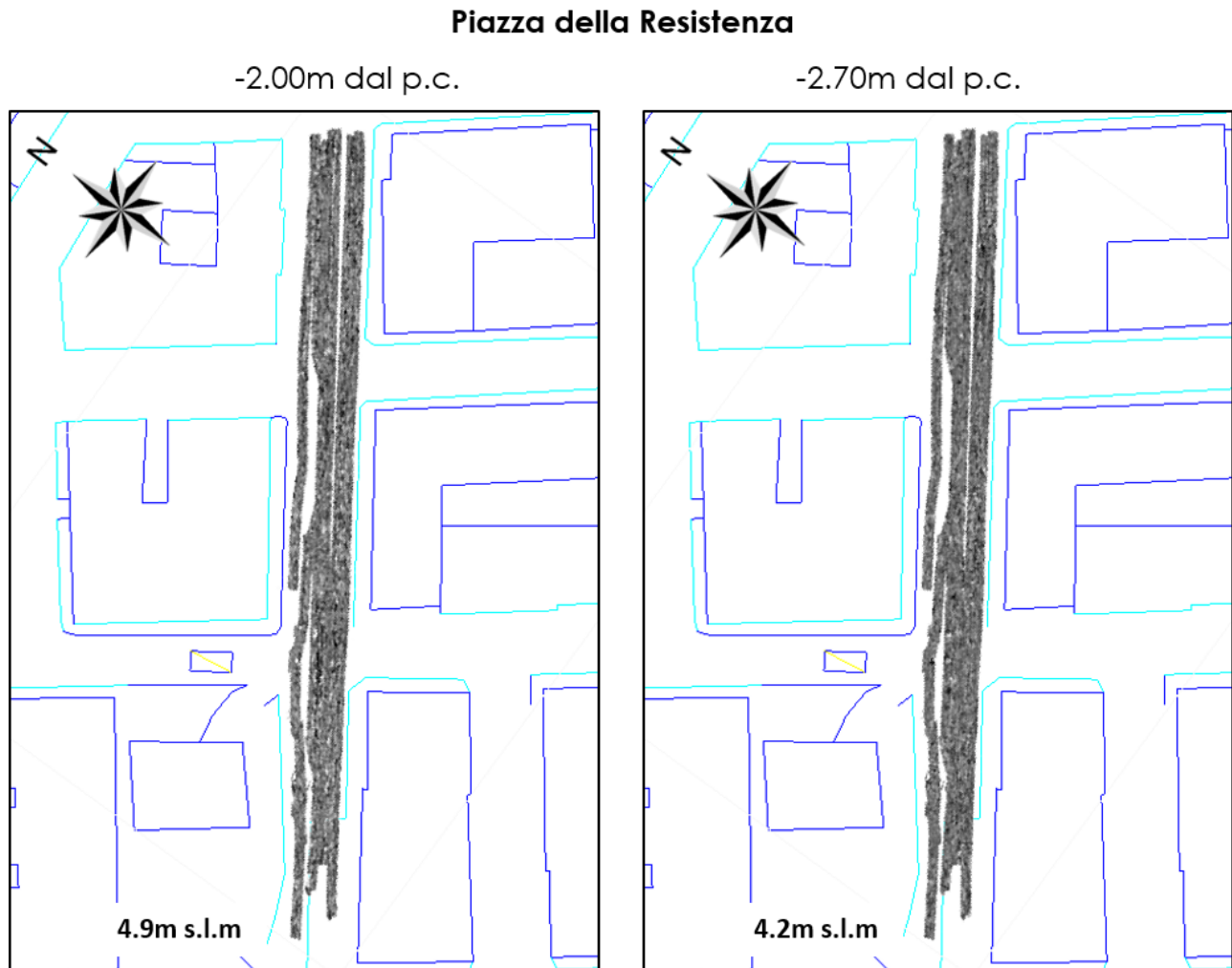


Figura 24 Sezioni orizzontali Radar Piazza della Resistenza, metodologia Raptor

In Piazza delle Poste invece la metodologia Raptor ha permesso di evidenziare la presenza di una porzione di terreno a maggior riflettività (evidenziate dalle linee tratteggiate rosse in Figura 19) a partire da circa 2.12 metri di profondità dal piano campagna.

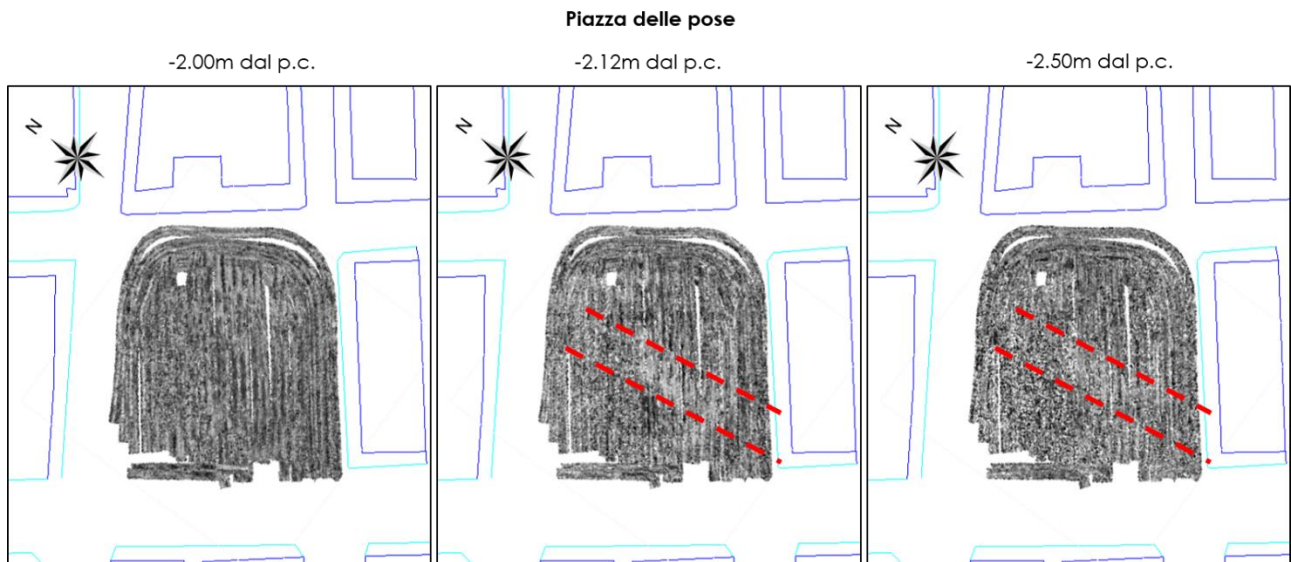


Figura 19: Sezioni orizzontali Radar Piazza delle poste, metodologia Raptor



Conclusioni

Nel presente rapporto vengono presentati i risultati delle indagini Radar e di Resistività Elettrica, all'interno del progetto "*Antica Kroton*", effettuate presso la zona urbana di Crotona in particolare in Piazza della Resistenza ed in Piazza delle Poste, al fine di studiare il sottosuolo e individuare eventuali resti archeologici sepolti.

L'uso combinato dei metodi non invasivi (ERT e GPR) ha permesso di indagare la sottosuperficie con diverse potenze risolutive e secondo aspetti diversi ma al contempo complementari.

Le indagini Radar, a causa della composizione del sottosuolo, hanno consentito di investigare i primi metri della superficie (circa 2.50 metri dal piano campagna), mentre le indagini ERT hanno permesso di analizzare il sottosuolo fino a circa 11 metri di profondità dal piano strada.

In **Piazza delle Poste** è stato riscontrato sia col metodo radar che elettrico una porzione di terreno con caratteristiche diverse dal resto dell'area circostante.

Si tratta di un'anomalia che **parte da circa 2.10 metri** di profondità dal piano campagna (risultati GPR) fino a circa 6 metri (risultati ERT) con una forma lineare allungata in direzione N-S ubicata trasversalmente per tutta l'area della piazza. Considerando la profondità di tale anomalia potrebbe essere associata ad una struttura archeologica sepolta.

In **Piazza della Resistenza** invece il radar, a causa sia della composizione litologica del sottosuolo che della pavimentazione, non ha prodotto risultati abbastanza esaustivi.

In compenso tramite la metodologia ERT sono state riscontrate una serie di anomalie altamente resistive, nella porzione a Nord **a partire da circa 4 metri di profondità**. La geometria allungata, parallela e perpendicolare di tali anomalie porterebbe a pensare che siano causate da strutture antropiche sepolte.

Per quanto riguarda le anomalie registrate in piazza della Resistenza, per quanto non perfettamente allineate²⁸, sembrano coerenti con l'impianto urbano ricostruito per questo settore.

In particolare, l'anomalia con andamento N/S sembra in parte coincidere con una struttura muraria emersa nel corso degli scavi del metanodotto (fig. 26).

²⁸ A tal proposito bisogna sottolineare che esistono evidenti differenze di posizionamento delle evidenze archeologiche emerse nel corso degli scavi eseguiti in questo settore di abitato nel corso degli anni, e delle relative planimetrie. Pertanto risulta piuttosto difficile una esaustiva interpretazione delle anomalie riscontrate nel corso del seguente studio. Per quanto riguarda il presente lavoro si è fatto affidamento alla planimetria generale (Piegevole 3 Carta Archeologica di Crotona antica) pubblicata in SPADEA 2014.

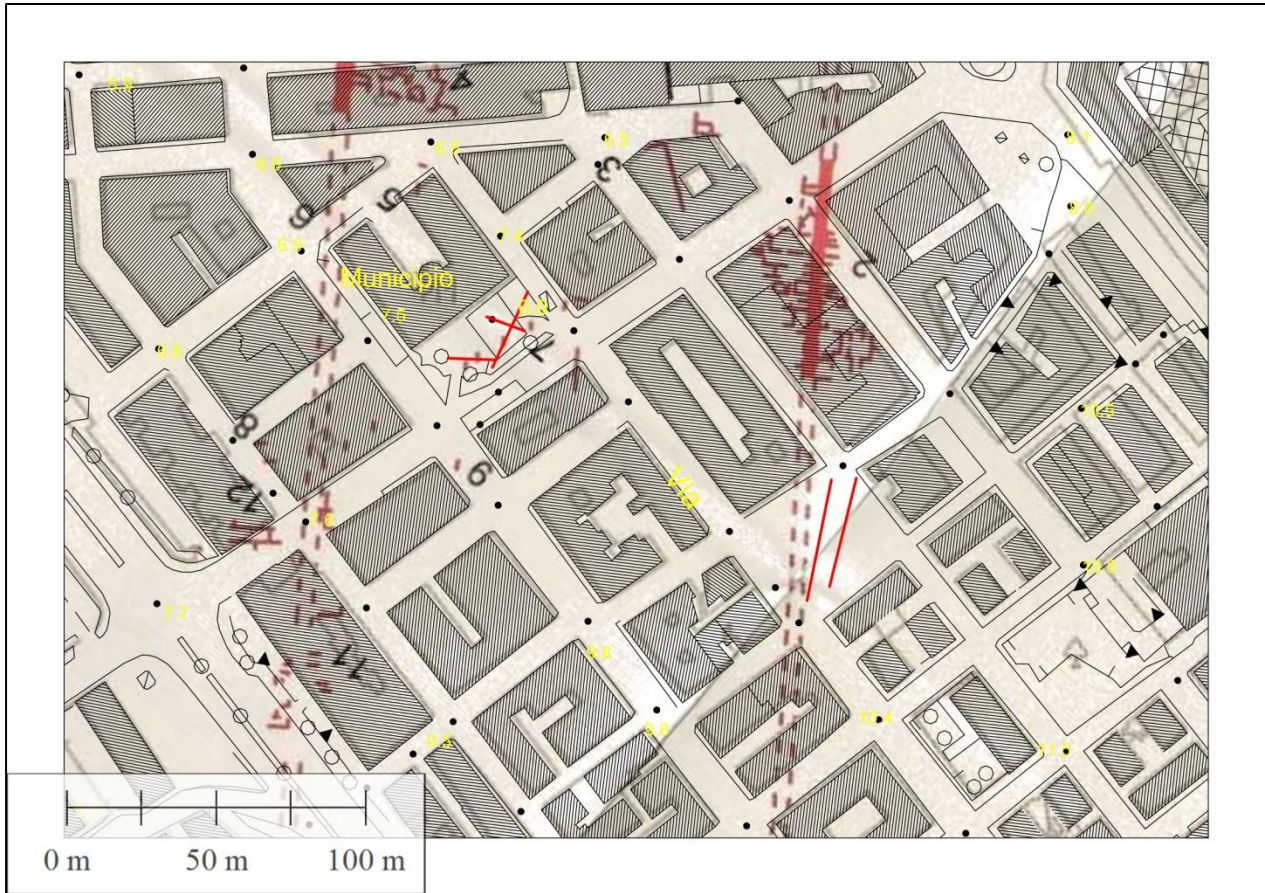


Figura 26: Crotona, piazza della Resistenza e Piazza delle Poste - Sovrapposizione delle anomalie ETR con le evidenze archeologiche note per questo settore. L'anomalia individuata N/S individuata in piazza della Resistenza va in parte a coincidere con i resti di una struttura emersa nel corso dello scavo del metanodotto di via Veneto, individuati con il numero 7.

Anche l'anomalia individuata in Piazza delle Poste presenta le stesse caratteristiche della precedente, ha infatti lo stesso orientamento N/S dell'assetto urbanistico ricostruito per questo settore, ma risulta più spostata ad E rispetto allo *stenopos* individuato nel corso degli scavi al di sotto della proprietà Madia-Messinetti (scavi via Tedeschi). La forma allungata e l'orientamento potrebbero far ipotizzare che l'anomalia possa essere interpretata come asse viario relativo all'impianto urbano dell'antica *Kroton*.

Le indagini geofisiche, proprio per loro peculiarità intrinseca, non consentono di formulare ipotesi sullo stato di conservazione delle emergenze archeologiche segnalate. E quindi pur avendo individuato anomalie identificabili con strutture antiche, non è possibile avanzare altre ipotesi sul loro stato di conservazione.

La profondità delle emergenze segnalate, l'impossibilità di inserirle in un preciso contesto urbanistico, considerando che i dati emersi saranno propedeutici alla realizzazione di attività di scavo in questo settore, al fine di valutare meglio la consistenza e la conservazione del deposito archeologico si consiglia di effettuare ulteriori analisi preventive.

In particolare sarebbe opportuno eseguire una serie di **carotaggi** per dare più consistenza alle evidenze archeologiche.

I carotaggi dovrebbero essere realizzati in corrispondenza delle anomalie in particolare nelle aree indicate, (figura 27 Piazza della Resistenza; figura 28 Piazza delle Poste), e in corrispondenza delle seguenti coordinate:

Piazza della Resistenza:

Carotaggio 1 x = 683839.298233887; y = 4327786.54708014

Carotaggio 2 x = 683833.494110054; y = 4327775.94303834

Carotaggio 3 x = 683823.924590648; y = 4327777.09135826

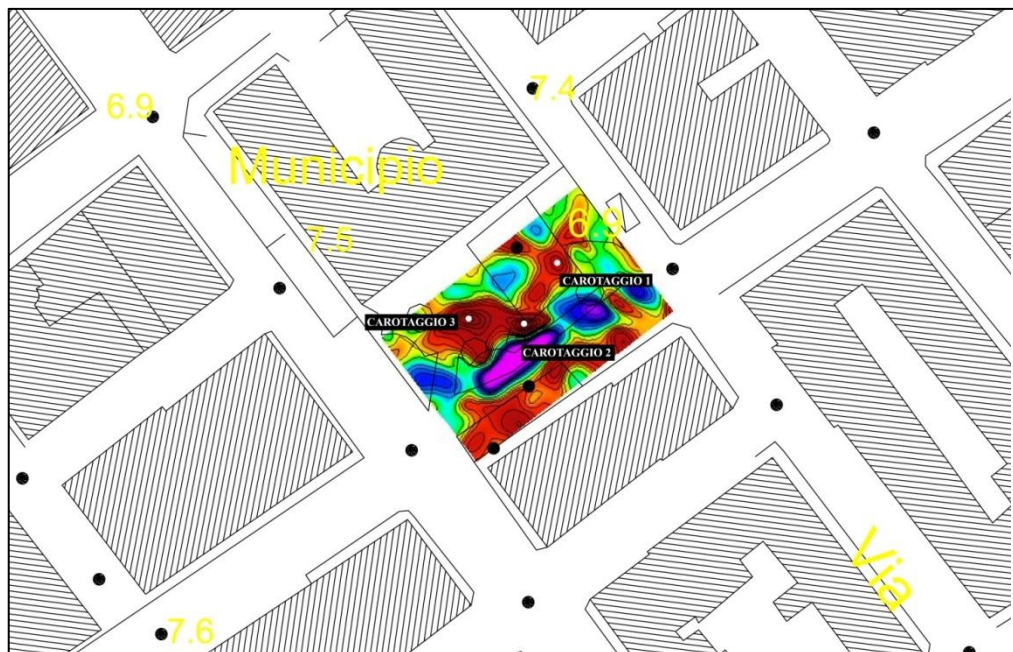


Fig. 27: Crotona, Piazza della Resistenza – proposta di ubicazione dei carotaggi.

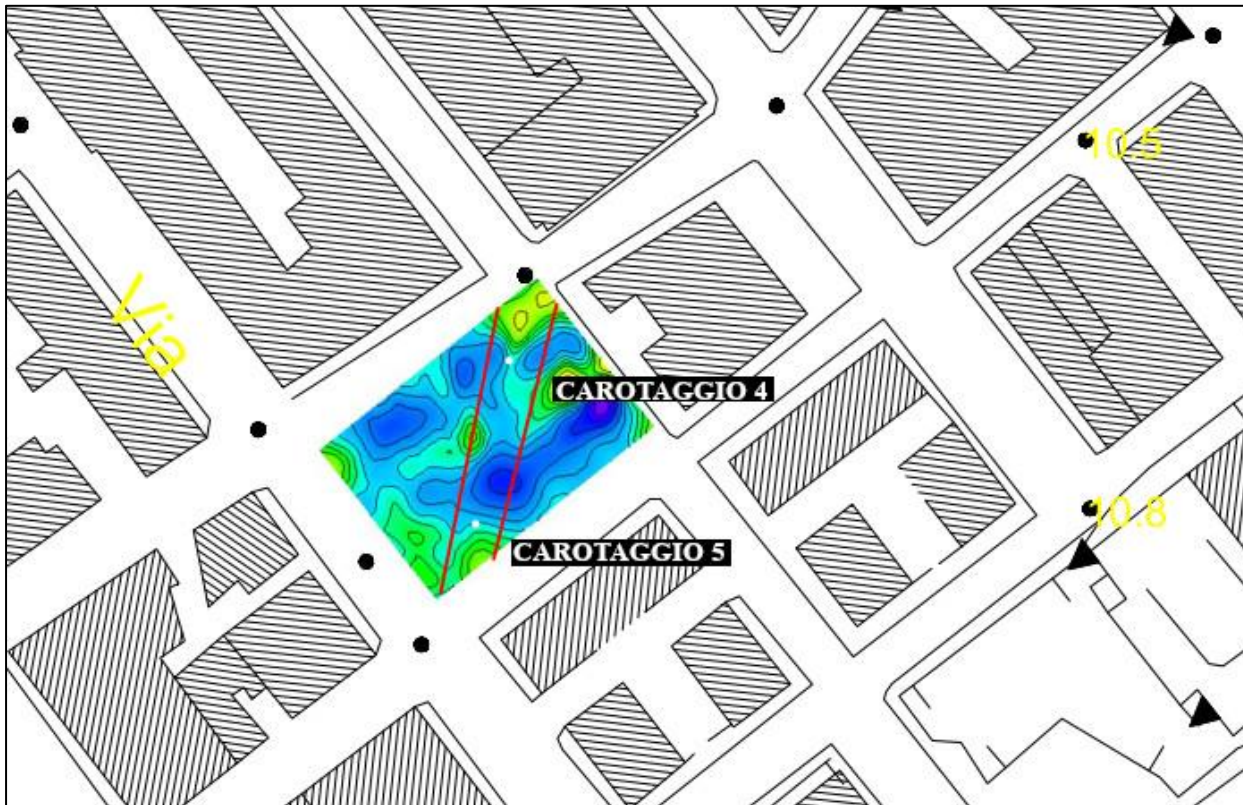


Figura 28: Crotona, piazza delle Poste – proposta di ubicazione dei carotaggi

Piazza delle Poste :

Carotaggio 4 x = 683947.047354195; y = 4327728.32618083

Carotaggio 5 x = 683942.314450031; y = 4327705.10834095



BIBLIOGRAFIA

- CAVAGNARO VANONI, LININGTON 1977: L. CAVAGNARO VANONI, R. E. LININGTON, *Nuove indagini con i metodi di prospezione archeologica a Crotona*, in *Atti della Accademia Nazionale dei Lincei, serie ottava. Rendiconti. Classe di Scienze morali, storiche e filologiche*, vol. XXXII, Roma 1977.
- LATTANZI 1999: E. LATTANZI, *L'attività della Soprintendenza Archeologica della Calabria nel 1997*, in *Confini e frontiera nella grecità d'occidente. Atti del XXXVII convegno di studi sulla Magna Grecia (Taranto, 3-6 ottobre 1997)*, Taranto 1999, pp. 907-928.
- LIPPOLIS, STOCCO 2014: E. LIPPOLIS, R. STOCCO, *Pianificazione e sviluppo urbano a Crotona: nuovi dati dall'area ex-Montedison*, in R. SPADEA (a cura di) *Kroton. Studi e Ricerche sulla polis achea e il suo territorio. Atti e Memorie della Società Magna Grecia*, Roma 2014.
- QUILICI 1977: L. QUILICI, *Magna Graecia*, XII, 1977, nn. 5-6, pp. 19-23.
- RACHELI 2010: A. RACHELI, *Continuità e discontinuità nella struttura della città: il caso della Banca Popolare Cooperativa*, in *Atti Firenze*, pp. 243-271.
- RACHELI 2014: A. RACHELI, *Continuità e discontinuità nella struttura della città: l'area meridionale dell'antica Kroton*, in R. SPADEA (a cura di) *Kroton. Studi e Ricerche sulla polis achea e il suo territorio. Atti e Memorie della Società Magna Grecia*, Roma 2014.
- RUGA 1998: A. RUGA, *Lo scavo dell'Ospedale*, in *Kroton*, pp. 88.
- SABBIONE 1976: C. SABBIONE, *Attività della Soprintendenza Archeologica della Calabria nelle province di Reggio e Catanzaro*, in *Locri Epizefirii, Atti del XVII Convegno di studi sulla Magna Grecia (Taranto 3-8 ottobre 1976)*, Napoli 1977, pp. 893-940.
- SPADEA 1983: R. SPADEA, *La topografia*, in *Atti Taranto 1983*, pp. 119-166.
- SPADEA 1993: R. SPADEA, *Crotona tra IV e III sec. a.C.: precisazioni topografiche*, in *Atti Napoli*, pp. 19-36.
- SPADEA 1998: R. SPADEA, *Urbanistica*, in *Kroton*, pp. 24-29.
- VERBICARO, SPADEA, RACHELI 2005: G. VERBICARO, A. RACHELI, R. SPADEA, *Ricerche sull'edilizia domestica in Magna Grecia*, "Siris" 6, 2005, pp. 5-25.
- VERBICARO 2014: G. VERBICARO, *Aree residenziali ed officine ceramiche di Crotona antica: un contributo sull'organizzazione dello spazio urbano nel quartiere centrale della polis tra l'VIII secolo a.C. e il III secolo a.C.*, in R. Spadea (a cura di) *Kroton. Studi e Ricerche sulla polis achea e il suo territorio. Atti e Memorie della Società Magna Grecia*, Roma 2014.