

INDAGINI GEOFISICHE PRESSO LA VILLA DEL TELLARO (NOTO – SR)

**IL DIRETTORE
SCIENTIFICO**

Dott.ssa Costanza Miliani

IL RESPONSABILE

Dott. Giovanni Leucci

OTTOBRE 2020

1. PREMESSA



Si riportano di seguito i risultati della campagna di rilievi geofisici effettuati presso lo LA Villa del Tellaro a Noto (SR).

Le indagini sono state effettuate mediante metodologie non distruttive con apparecchiature in dotazione al Laboratorio di Geofisica Applicata ai Beni Archeologici e Monumentali dell'Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale (CNR-ISPC, sede secondaria di Lecce). In particolare é stato realizzato un rilievo georadar tridimensionale mediante GPR (Ground Penetrating Radar) Impulsato Hi Mod (IDS), dotato di antenna dual band da 600-200MHz.

Lo scopo delle indagini è stato quello di individuare l'eventuale presenza di strutture di interesse archeologico sepolte.

Le indagini in sito sono state effettuate in data 29/09/2020 dalla Dott.ssa Lara De Giorgi (geofisico), dai Dott. Ivan Ferrari, Francesco Giuri e Giovanni Fragalá. L'elaborazione dei dati è a cura del Dott. Giovanni Leucci

2. MODALITA' OPERATIVE

Le indagini geofisiche sono state realizzate all'interno di cinque aree secondo una griglia di passo pari ad 0.25 m con 512 campioni/traccia; gli altri parametri di acquisizione sono stati ottimizzati in loco e tenuti costanti per tutti i profili di ciascun rilievo.

Per quanto concerne le indagini georadar, la qualità dei dati acquisiti durante le misurazioni è risultata discreta grazie ad una serie di accorgimenti adottati nella fase di acquisizione. Tuttavia per eliminare una componente di rumore, comunque presente nei dati, e facilitarne l'interpretazione, è stata realizzata un'elaborazione dei profili acquisiti i cui passi sono elencati in Appendice. Successivamente, la planimetria di acquisizione dei profili, che come detto si è basata su una griglia di passo pari a 0.25 m, ha consentito di correlare spazialmente, in modo 3D, le anomalie presenti su ciascuna sezione utilizzando l'analisi dell'ampiezza degli eventi riflessi entro assegnati intervalli di tempo (time slices). Questo tipo di analisi, ampiamente descritta in Appendice, ha dato risultati soddisfacenti che hanno facilitato l'interpretazione delle anomalie. Sono state quindi costruite slices di ampiezza a intervalli temporali di 5 ns per l'antenna da 600MHz, cosicché ogni slice corrisponde a uno spessore di terreno di circa 0,25 m per l'antenna da 600MHz (se si considera una velocità media di propagazione dell'onda elettromagnetica pari a circa 0.1m/ns). Il colore blu indica debole ampiezza del segnale riflesso (materiale sostanzialmente omogeneo); i colori dal celeste

chiaro al rosso più intenso indicano variazioni di ampiezze del segnale riflesso e quindi presenza di discontinuità elettromagnetiche significative. Le variazioni di ampiezza (quindi di colore) in una stessa slice sono indice di variazioni orizzontali nelle caratteristiche elettromagnetiche del mezzo indagato. Per meglio comprendere la distribuzione 3D delle anomalie, riferibili a probabili strutture di interesse archeologico, sono state realizzate le iso-superfici di ampiezza dell'onda elettromagnetica che consentono i) di correlare in modo 3D le anomalie di una determinata ampiezza; ii) di isolarle fissando successivamente un valore detto di soglia.

Infine, il rilievo fotografico da drone delle aree indagate e la misurazione della loro esatta estensione hanno consentito la realizzazione di una sorta di scavo virtuale realizzato con l'inserimento delle anomalie all'interno delle aree indagate, facilitando l'interpretazione delle anomalie geofisiche anche in rapporto alle strutture esistenti.

2.1 - Analisi ed interpretazione dei dati acquisiti

Le aree indagate sono 5 e sono indicate in Fig. 1.



Fig. 1: aree indagate con la geofisica

2.1.1 Area 1

L'area 1 è stata suddivisa in due aree denominate rispettivamente area 1A e area 1B (Fig. 2).

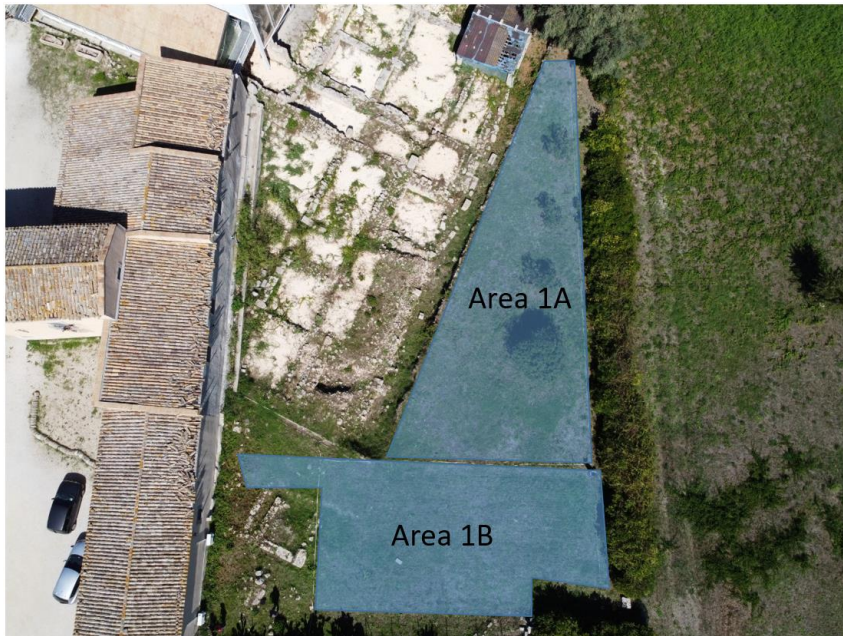


Fig. 2: Area 1

L'analisi dei dati per l'area 1A ha evidenziato una buona penetrazione del segnale elettromagnetico che ha consentito di indagare fino ad una profondità in tempi pari a 70 ns (per l'antenna da 600MHz) che corrisponde ad una profondità di circa 3,5 m, considerando una velocità media di propagazione delle onde elettromagnetiche nel sottosuolo pari a circa 0,1 m/ns. Nella Fig. 3 sono riportate le slices di ampiezza relative all'antenna da 600MHz. In esse è possibile individuare l'estensione delle probabili strutture di interesse archeologico (muri) indicate con le linee nere tratteggiate. Le profondità variano mediamente da 0.4 m a 1.1 m.

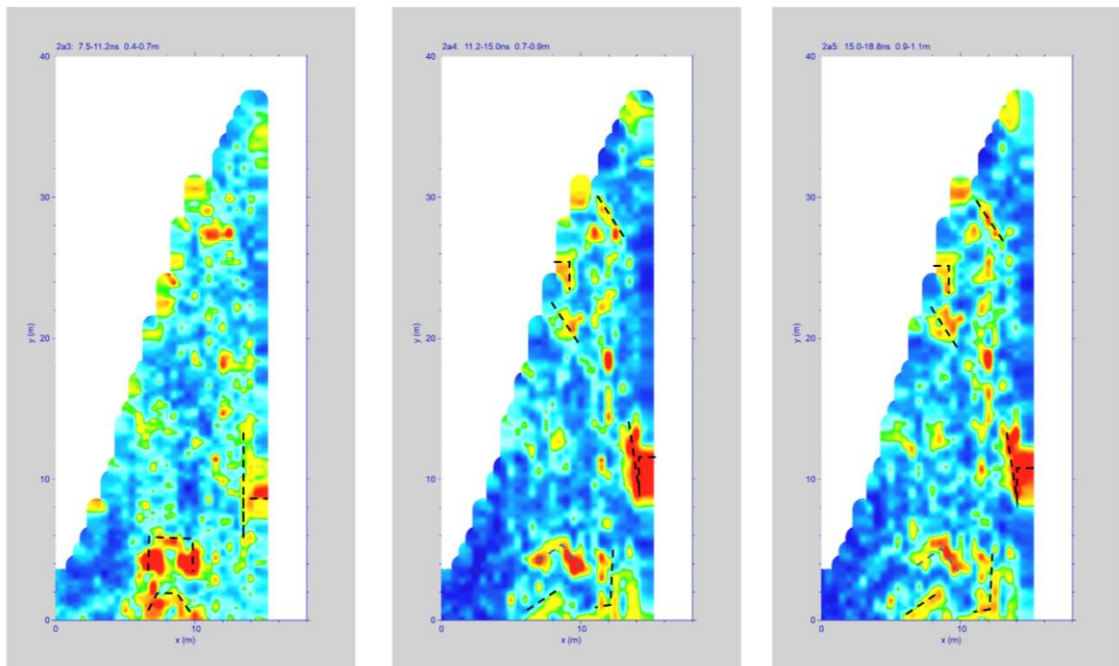


Fig. 3: area 1A: time slices. Le linee nere tratteggiate indicano probabili strutture

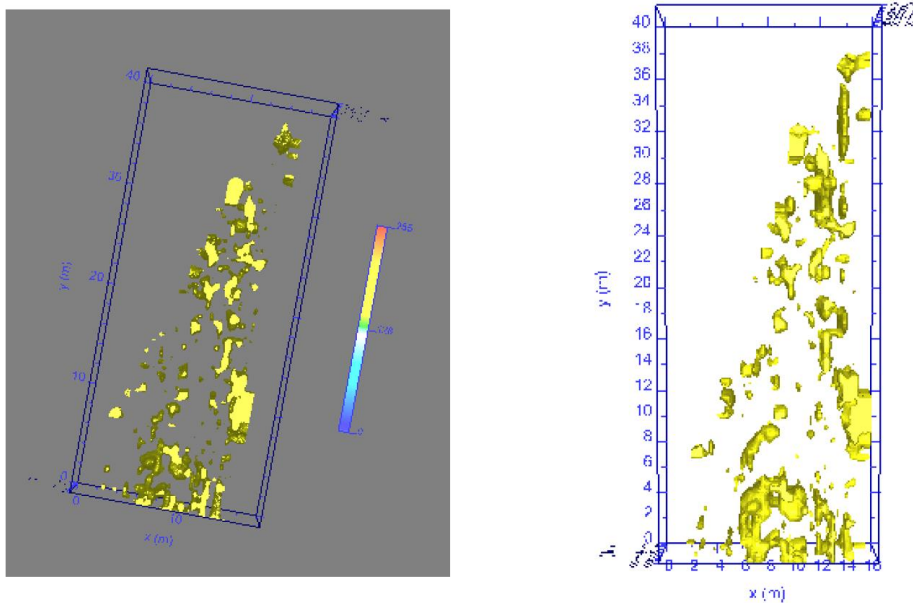


Fig. 4: area 1A: iso-superfici di ampiezza

In Fig. 4 sono riportate le iso superfici di ampiezza dell'onda elettromagnetica che meglio evidenziano le probabili strutture di interesse.

L'analisi dei dati per l'area 1B ha evidenziato una buona penetrazione del segnale elettromagnetico che ha consentito di indagare fino ad una profondità in tempi pari a 70 ns (per l'antenna da 600MHz) che corrisponde ad una profondità di circa 3,5 m, considerando una velocità media di propagazione delle onde elettromagnetiche nel sottosuolo pari a circa 0,1 m/ns. Nella Fig. 5 sono riportate le slices di ampiezza relative all'antenna da 600MHz. In esse è possibile individuare l'estensione delle probabili strutture di interesse archeologico (muri) indicate con le linee nere tratteggiate. Le profondità variano mediamente da 0.4 m a 1.5 m.

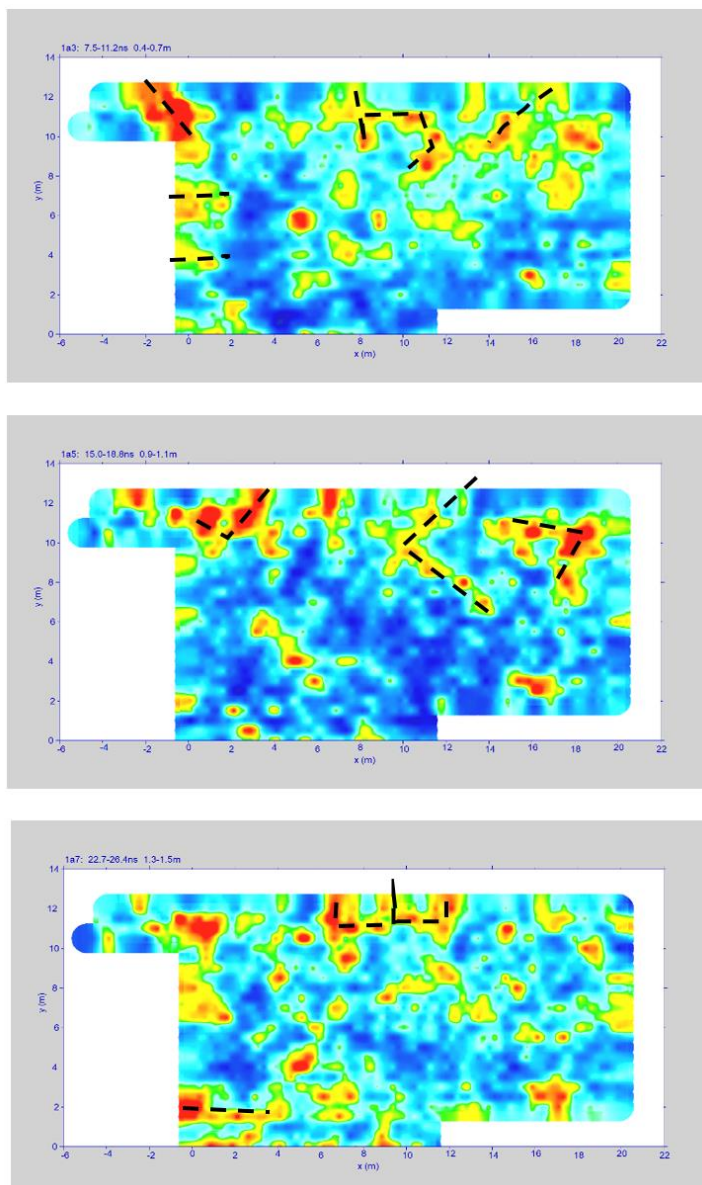


Fig. 5: area 1B: time slices. Le linee nere tratteggiate indicano probabili strutture

In Fig. 6 sono riportate le iso superfici di ampiezza dell'onda elettromagnetica che meglio evidenziano le probabili strutture di interesse.

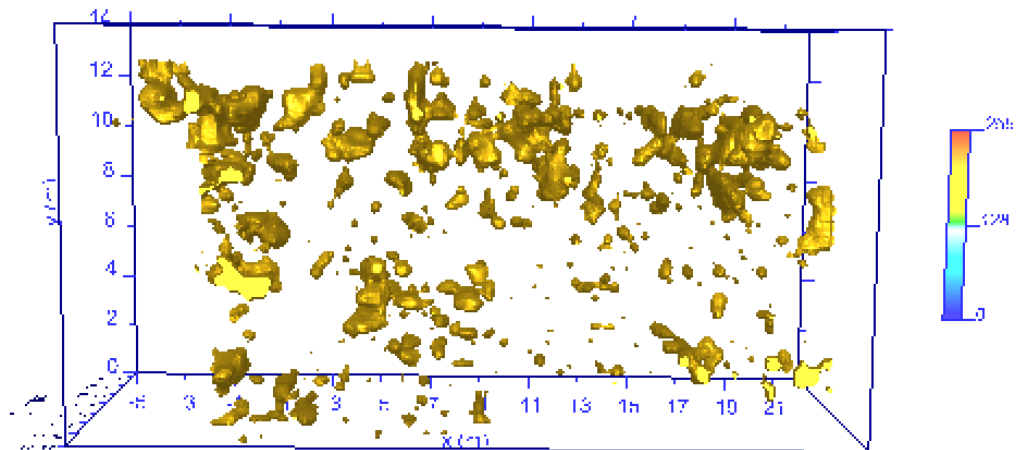


Fig. 6: area 1b: iso-superfici di ampiezza

I dati acquisiti con l'antenna da 200MHz confermano i risultati relativi all'antenna da 600MHz e non mostrano ulteriori rilevanti anomalie più in profondità.

2.1.2 Area 2

L'area 2 è stata suddivisa in tre aree denominate rispettivamente area 2A, area 2B e area 2C (Fig. 7).



Fig. 7: Area 2

La penetrazione del segnale elettromagnetico nell'area 2A é di circa 3,5 m. In Fig. 8 sono riportate le slices di ampiezza relative all'antenna da 600MHz. In esse è possibile individuare l'estensione delle probabili strutture di interesse archeologico (muri) indicate con le linee nere tratteggiate. Le profondità variano mediamente da 0.7 m a 2.2 m.

In particolare nella slices 0.7-0.9m si individua una sorta di probabile pavimentazione con alcune probabili strutture poste al di sotto. Questo è confermato anche dalla sezione radar 2D (linee gialle tratteggiate) di Fig. 9.

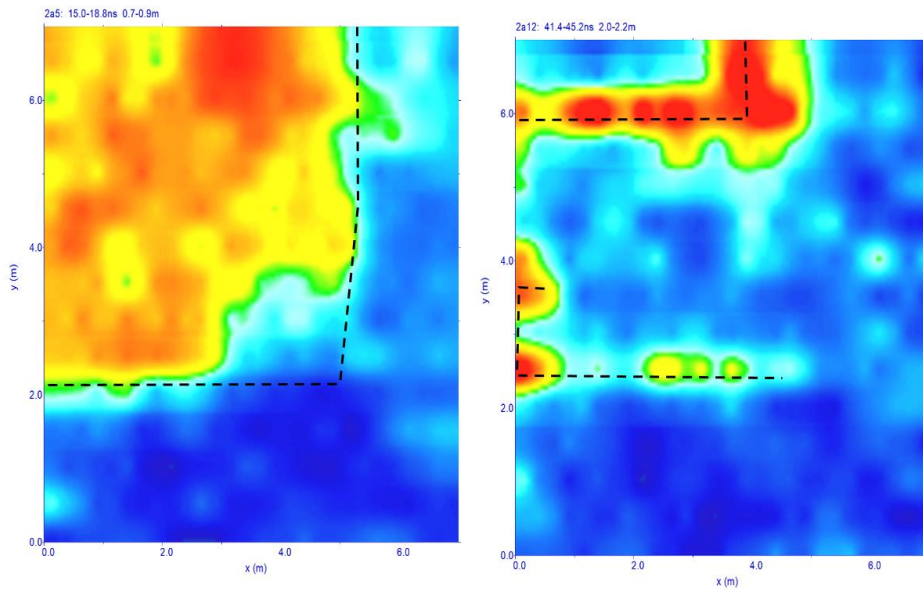


Fig. 8: area 2A: time slices. Le linee nere tratteggiate indicano probabili strutture

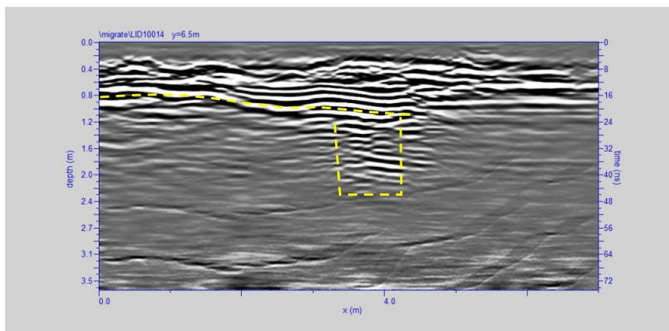


Fig. 9: area 2A: sezione radar 2D elaborata

In Fig. 10 sono riportate le iso superfici di ampiezza dell'onda elettromagnetica che meglio evidenziano le probabili strutture di interesse.

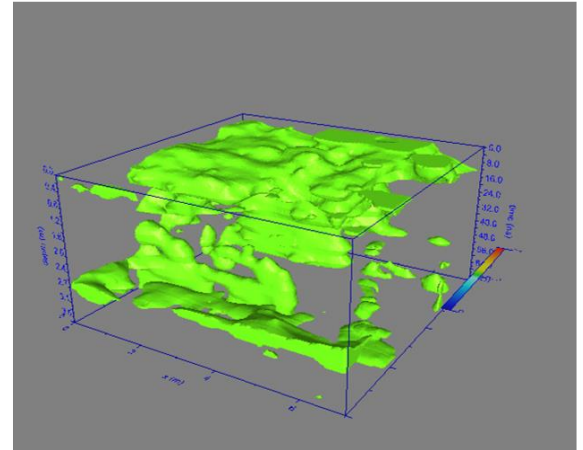
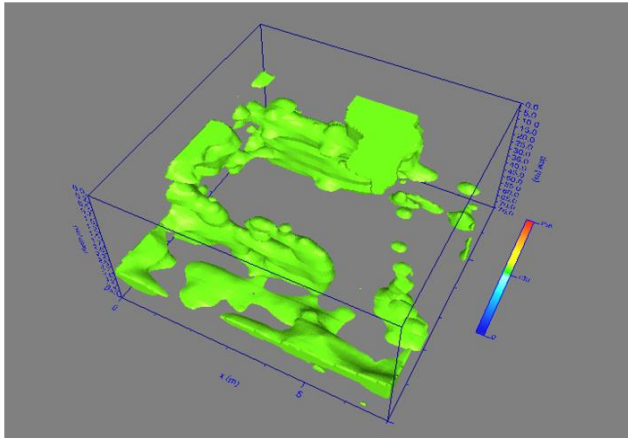


Fig. 10: area 2A: iso-superfici di ampiezza

L'analisi dei dati per l'area 2B ha evidenziato una buona penetrazione del segnale elettromagnetico che ha consentito di indagare fino ad una profondità in tempi pari a 70 ns (per l'antenna da 600MHz) che corrisponde ad una profondità di circa 3,5 m, considerando una velocità media di propagazione delle onde elettromagnetiche nel sottosuolo pari a circa 0,1 m/ns. Nella Fig. 11 sono riportate le slices di ampiezza relative all'antenna da 600MHz. In esse è possibile individuare l'estensione delle probabili strutture di interesse archeologico (muri) indicate con le linee nere tratteggiate. Le profondità variano mediamente da 0.5 m a 0.9 m.

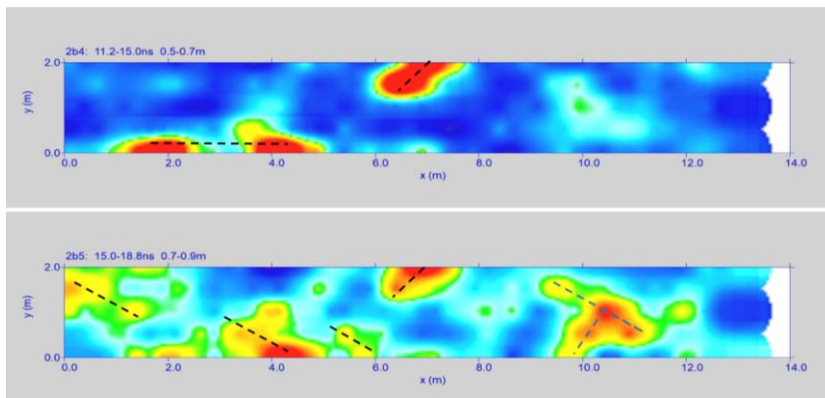


Fig. 11: area 2B: time slices. Le linee nere tratteggiate indicano probabili strutture

In Fig. 12 sono riportate le iso superfici di ampiezza dell'onda elettromagnetica che meglio evidenziano le probabili strutture di interesse.

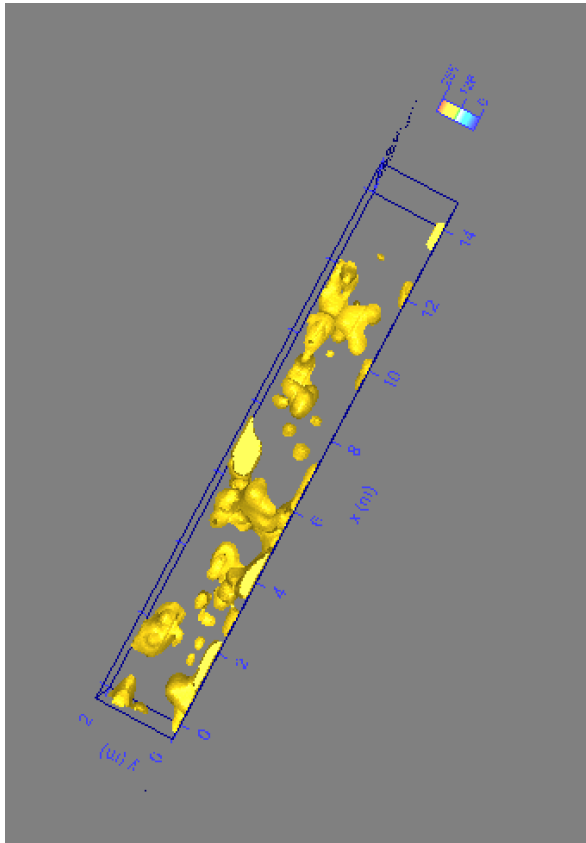


Fig. 12: area 2B: iso-superfici di ampiezza

L'analisi dei dati per l'area 2C evidenzia una penetrazione del segnale elettromagnetico di circa 3,5 m. Nella Fig. 13 sono riportate le slices di ampiezza relative all'antenna da 600MHz. In esse è possibile individuare l'estensione delle probabili strutture di interesse archeologico (muri) indicate con le linee nere tratteggiate. Le profondità variano mediamente da 0.4 m a 1.2 m. In particolare le anomalie evidenziate con un cerchio potrebbero essere dovute alla presenza di fornaci.

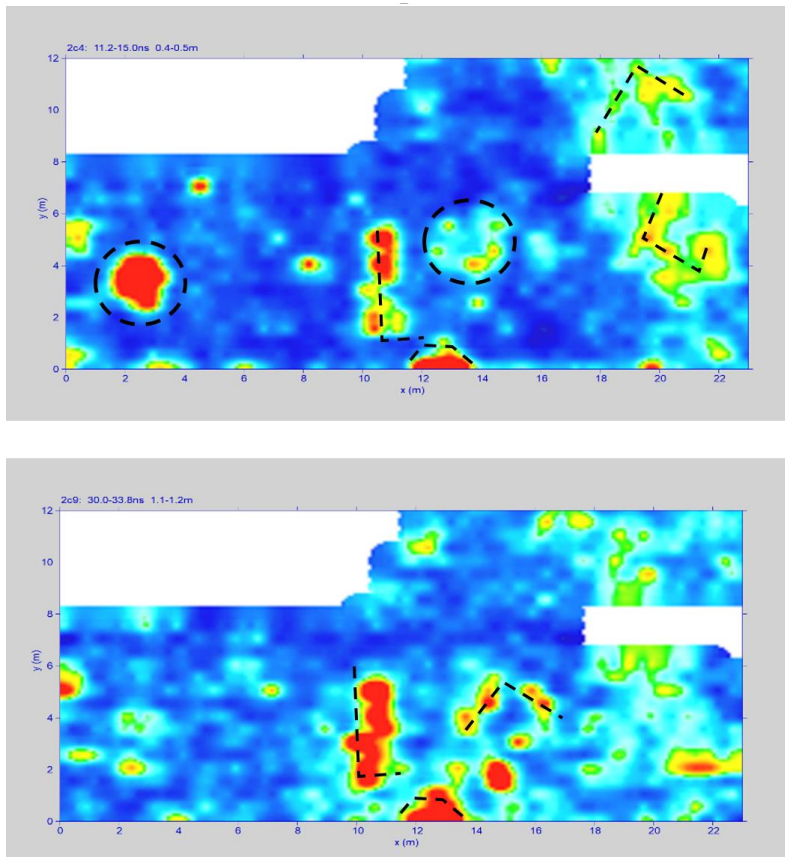


Fig. 13: area 2C: time slices. Le linee nere tratteggiate indicano probabili strutture

In Fig. 14 sono riportate le iso superfici di ampiezza dell'onda elettromagnetica che meglio evidenziano le probabili strutture di interesse.

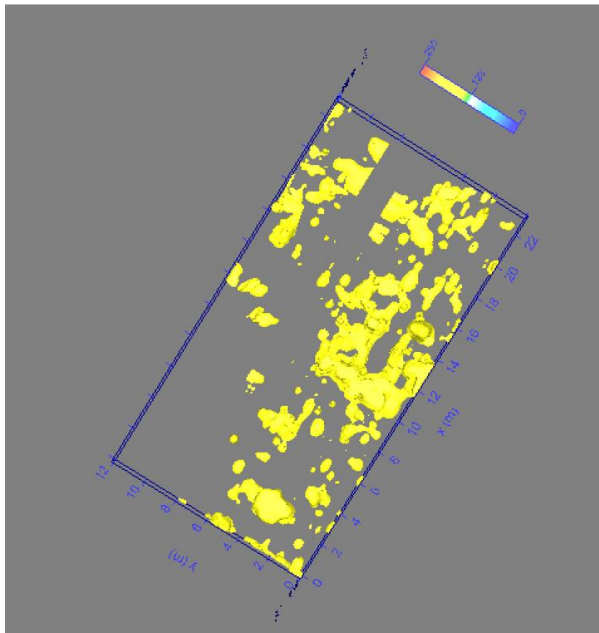


Fig. 14: area 2c: iso-superfici di ampiezza

2.1.3 Area 3

L'area 3 è mostrata in Fig. 15.



Fig. 15: Area 3

La penetrazione del segnale elettromagnetico nell'area 3 é di circa 3,5 m. In Fig. 16 sono riportate le slices di ampiezza relative all'antenna da 600MHz. In esse è possibile individuare

l'estensione delle probabili strutture di interesse archeologico (muri) indicate con le linee nere tratteggiate. Le profondità variano mediamente da 0.0 m a 1.6 m.

In particolare nella slices 0.0-0.2m si individua una sorta di probabile traccia di scavo.

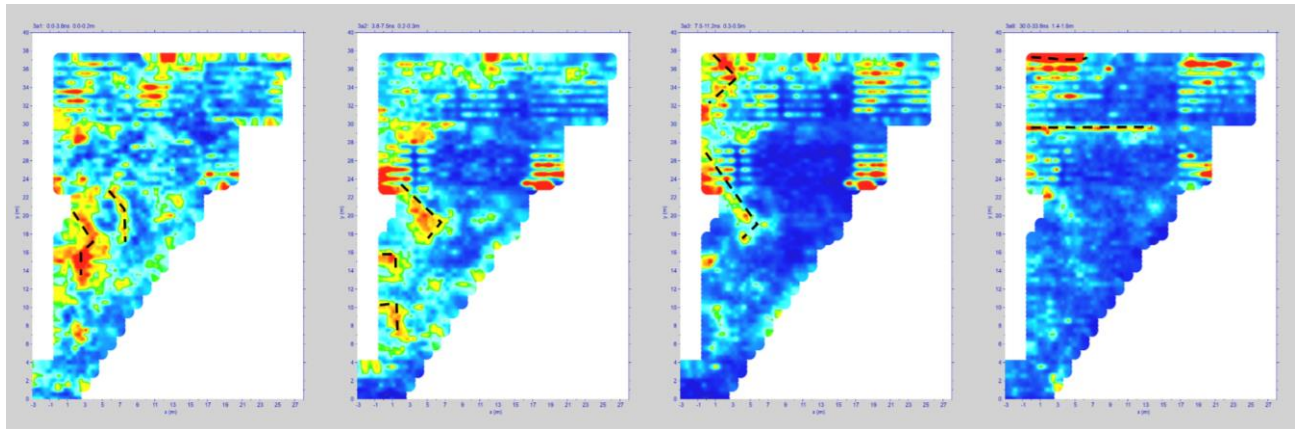


Fig. 16: area 3: time slices. Le linee nere tratteggiate indicano probabili strutture

In Fig. 17 sono riportate le iso superfici di ampiezza dell'onda elettromagnetica che meglio evidenziano le probabili strutture di interesse.

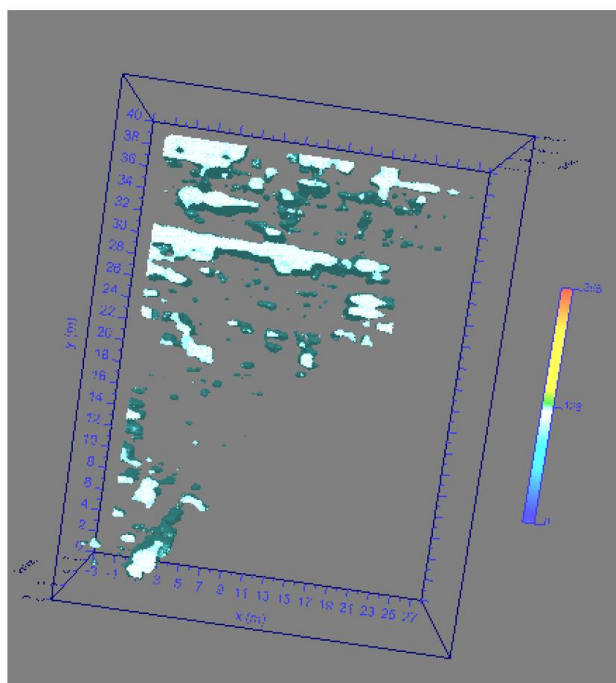


Fig. 17: area 3: iso-superfici di ampiezza

2.1.4 Area 4

L'area 4 è mostrata in Fig. 18.

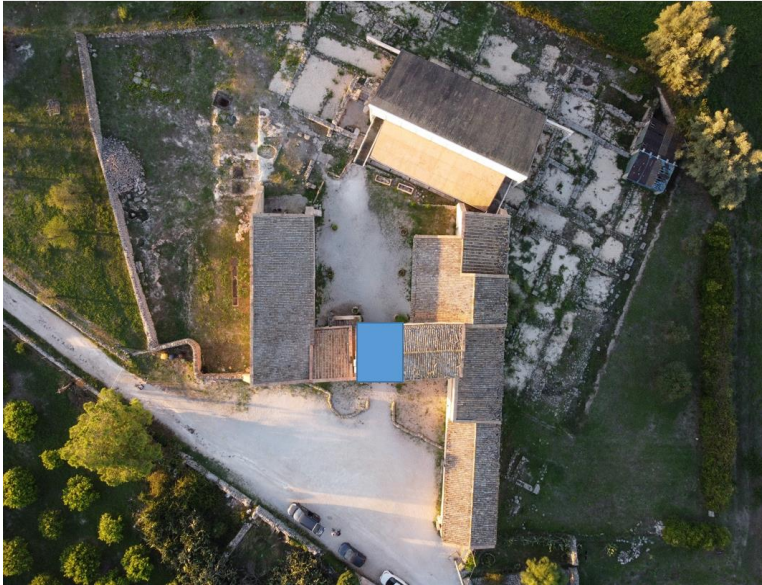


Fig. 18: Area 4

La penetrazione del segnale elettromagnetico nell'area 3 é di circa 3,5 m. In Fig. 19 sono riportate le slices di ampiezza relative all'antenna da 600MHz. In esse è possibile individuare l'estensione delle probabili strutture di interesse archeologico (muri) indicate con le linee nere tratteggiate. Le profondità variano mediamente da 0.3 m a 2.4 m.

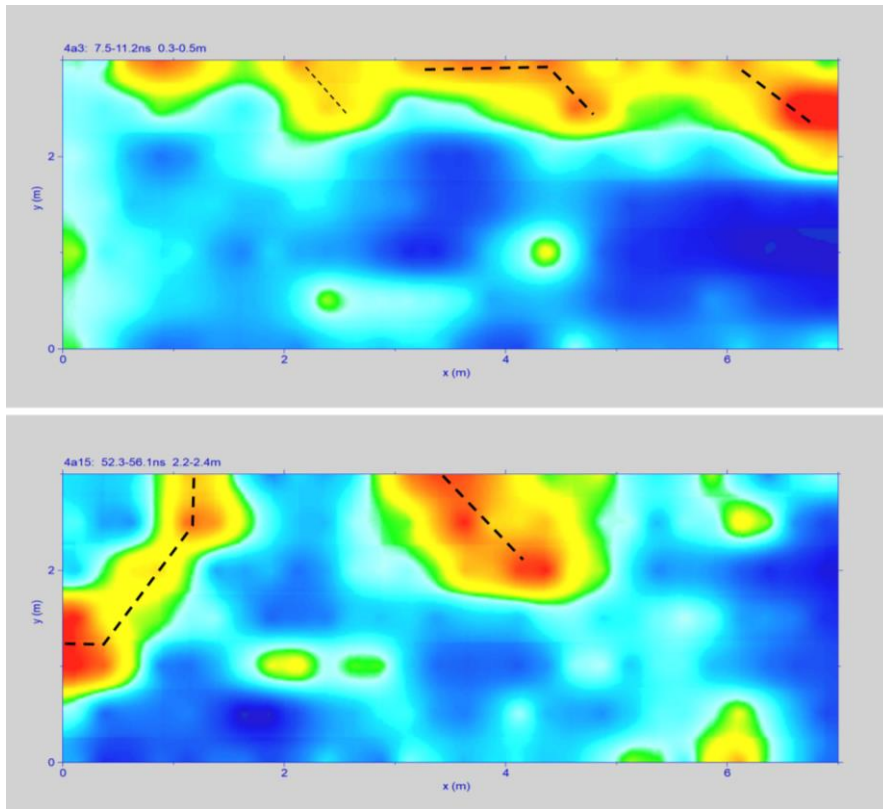


Fig. 19: area 4: time slices. Le linee nere tratteggiate indicano probabili strutture

In Fig. 20 sono riportate le iso superfici di ampiezza dell'onda elettromagnetica che meglio evidenziano le probabili strutture di interesse.

2.1.5 Area 5

L'area 5 è mostrata in Fig. 21.



Fig. 21: Area 5

La penetrazione del segnale elettromagnetico nell'area 3 é di circa 3,5 m. In Fig. 22 sono riportate le slices di ampiezza relative all'antenna da 600MHz. In esse è possibile individuare l'estensione delle probabili strutture di interesse archeologico (muri) indicate con le linee nere tratteggiate. Le profondità variano mediamente da 0.1 m a 0.7 m.

In particolare l'anomalia all'interno del cerchio nero tratteggiato potrebbe essere dovuta alla presenza di una cisterna che, come mostra la sezione radar 2D (Fig. 23) potrebbe essere collassata.

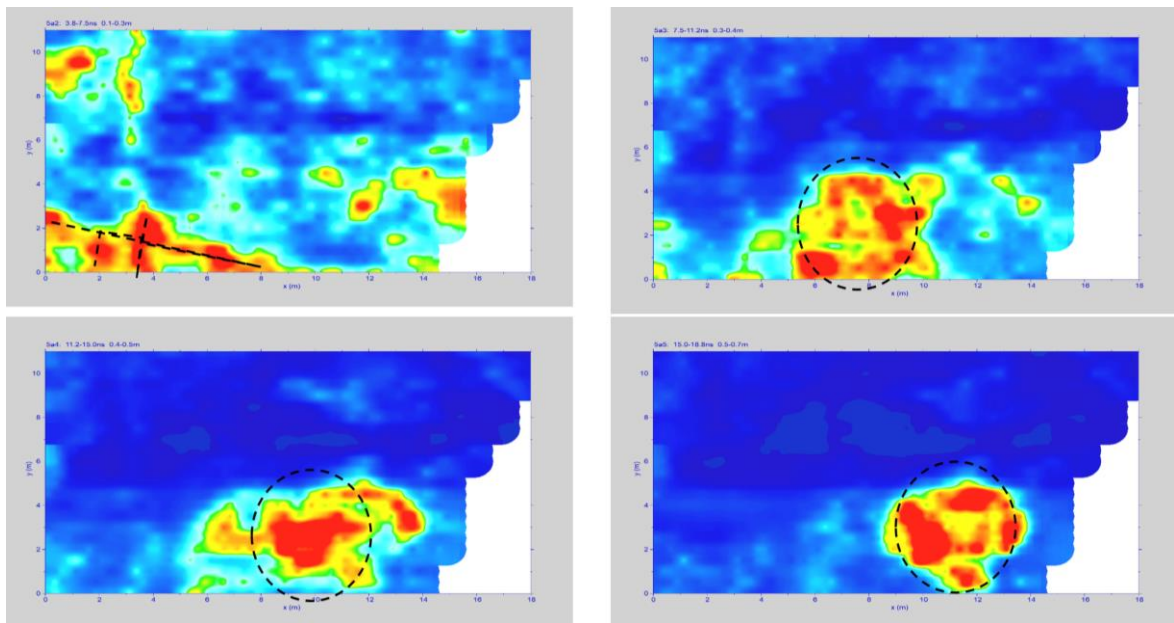


Fig. 22: area 5: time slices. Le linee nere tratteggiate indicano probabili strutture

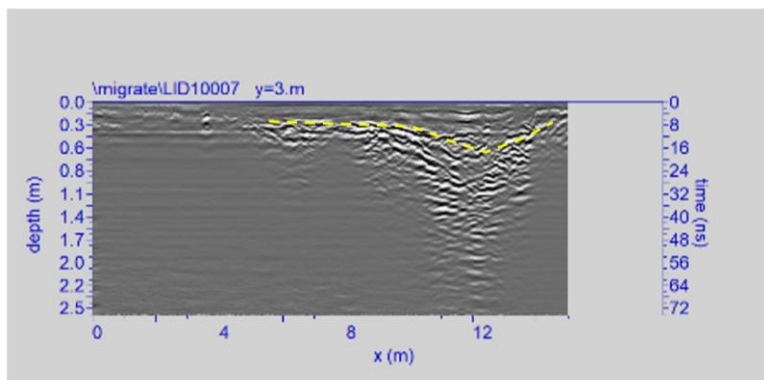


Fig. 23: area 5: sezione radar elaborata

In Fig. 24 sono riportate le iso superfici di ampiezza dell'onda elettromagnetica che meglio evidenziano le probabili strutture di interesse.

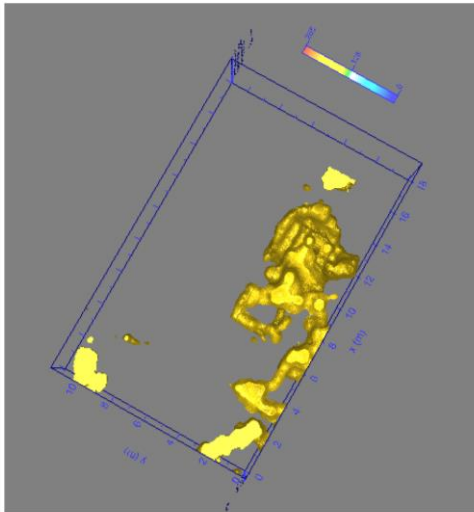


Fig. 24: area 5: iso-superfici di ampiezza

3. CONCLUSIONI

Nel complesso, le indagini geofisiche condotte hanno fornito buoni risultati in merito all'individuazione di strutture presenti nel primo sottosuolo. Nello specifico il metodo georadar ha permesso di indagare il sottosuolo fino alla profondità di 4 m circa, evidenziando anomalie nei primi 2 m di profondità. In particolare, si evidenziano l'individuazione di varie anomalie.

In Fig. 25 viene presentata la sovrapposizione delle anomalie individuate sulla foto da drone in una sorta di scavo virtuale.



Fig. 25. sovrapposizione delle anomalie individuate sulla foto da drone

**IL DIRETTORE
SCIENTIFICO**

Dott.ssa Costanza Miliani

IL RESPONSABILE

Dott Giovanni Leucci



APPENDICE

Il metodo georadar

Il metodo georadar (conosciuto anche con il nome anglosassone Ground Penetrating Radar – GPR) è una tecnica ad elevata risoluzione che consente di raccogliere una grande quantità di informazioni su vaste aree nei primi metri del sottosuolo, riferibili alla presenza di corpi sepolti, cavità, strutture di interesse archeologico, stratificazioni del sottosuolo, ecc. Un apparato radar strumentale opera mediante la generazione di onde impulsive ad elevata frequenza (tipicamente tra 10 MHz a qualche GHz), che vengono trasmesse nel sottosuolo mediante un'opportuna “ antenna trasmittente ” disposta sulla superficie del terreno. Il segnale elettromagnetico si propaga nel mezzo e subisce delle riflessioni se incontra un mezzo con discontinuità dei parametri elettromagnetici. L'onda riflessa che torna in superficie viene registrata da una “ antenna ricevente ”. Il segnale captato viene poi trasmesso all'unità di controllo che provvede ad amplificarlo e registrarlo in formato digitale.

Misurando l'intervallo di tempo impiegato dall'impulso a radiofrequenza per

- i) arrivare alla discontinuità sepolta,
- ii) riflettersi,
- iii) ritornare al ricevitore,

si può risalire alla posizione della struttura riflettente se è nota la velocità di propagazione.

Le modalità d'impiego del georadar sono due:

- 1) *Monostatico*, se si utilizza una sola antenna che funziona sia da trasmittente che da ricevente (Fig. 1a), ovvero essa trasmette l'impulso radar e subito dopo si pone in ricezione per captare l'energia riflessa da un eventuale bersaglio.
- 2) *Bistatico*, se vengono adoperate due antenne distinte (una per trasmettere Tx e una per ricevere Rx) che vengono tenute ad una distanza fissa l'una dall'altra mentre si esegue il rilievo (Fig. 1b).

Una differenza consiste nel fatto che utilizzando

il

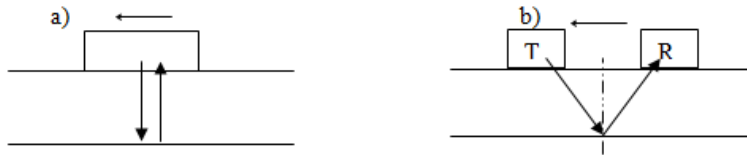


Figura 1- Illustrazione del sistema di acquisizione a) monostatico e b) bistatico

La tecnica di acquisizione può inoltre essere “*in continuo*”, ovvero con il sistema di antenne è mosso in modo continuo sulla superficie del terreno lungo un profilo ben definito, oppure “*per punti*”. Nella modalità in continuo, le antenne sono trascinate manualmente o mediante dei veicoli con velocità costante e anche l’energia radar è trasmessa nel sottosuolo costantemente e ad un ritmo fissato. Nella modalità per punti, una o entrambe le antenne vengono spostate ad intervalli spaziali discreti consentendo l’acquisizione dei dati solo in determinati punti. L’acquisizione per punti (molto più onerosa in termini di tempo) viene utilizzata solo in particolari situazioni; ad esempio quando la presenza di asperità sul terreno rende difficoltoso il trascinarsi delle antenne.

Le operazioni sul campo

Le indagini elettromagnetiche impulsive sono state eseguite con strumentazione georadar modello Hi Mod prodotto dalla IDS e con l’utilizzo delle antenne da 200 e 600 MHz.

La scelta della frequenza dell’antenna è strettamente legata allo scopo specifico dell’indagine. Le ricerche indirette, basate sull’individuazione di elementi legati a strutture di interesse archeologico e cavità, cunicoli e/o sottoservizi, hanno come obiettivo anomalie di medie dimensioni (0.2-2.0m) poste a profondità che possono variare da qualche decina di centimetri a qualche metro. In questo caso la configurazione strumentale tipica, è stata costituita da: i) antenna dual band 200-600 MHz; ii) tempo di fondo scala pari a 80 ns (nanosecondi) per l’antenna da 600MHz e 160 ns per l’antenna da 200 MHz. Ovviamente la configurazione proposta rappresenta uno standard e deve essere, in ogni caso, ottimizzata tramite prove di

taratura preliminari all'indagine in situ. La configurazione base è stata mantenuta costante al fine di ottenere risultati comparabili su tutte le aree indagate. In Fig. 2(a) viene riportato il sistema GPR utilizzato nella campagna di misure costituito da: i) un antenna dual-band 200-600 MHz munita di odometro per avere istante per istante la posizione dell'antenna lungo il profilo di acquisizione; ii) unità di controllo, che consente la visualizzazione, in tempo reale, del risultato grezzo e la memorizzazione dello stesso.

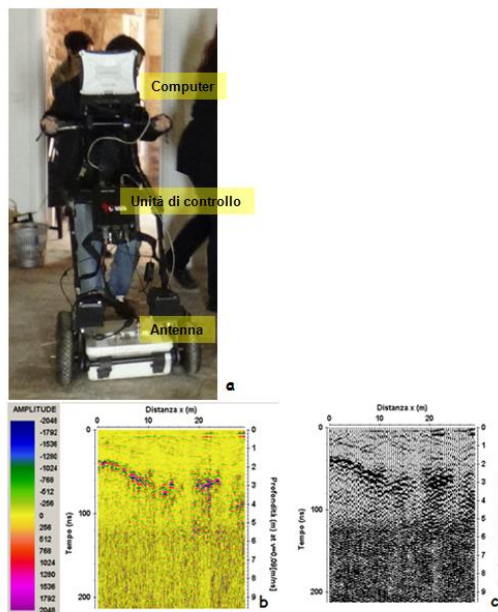


Fig. 2: (a) esempio di acquisizione dati col metodo del profilo continuo; sezioni radar in rappresentazione linescan a colori (b) e wiggle trace (c).

Il risultato è una “sezione radar” (Fig. 2b, c) in cui sull’asse delle ascisse è riportata la distanza (in metri) percorsa dall’antenna lungo il profilo e sull’asse delle ordinate è riportato il tempo doppio di viaggio dell’onda elettromagnetica nel sottosuolo, cioè il tempo che l’onda elettromagnetica impiega per andare dall’antenna trasmittente alla superficie di contatto tra due mezzi con caratteristiche elettromagnetiche distinte, essere riflessa e tornare indietro all’antenna ricevente.

Caratteristiche e limiti

La metodologia elettromagnetica impulsiva, comunemente conosciuta con il nome anglosassone Ground Penetrating Radar (GPR), utilizza impulsi elettromagnetici di breve durata per l’esplorazione del sottosuolo. Attraverso un’analisi degli impulsi riflessi da superfici di discontinuità dei parametri elettromagnetici è possibile risalire alle strutture presenti nel



sottosuolo. Tale metodo ha il vantaggio di fornire in tempo reale una descrizione dettagliata del sottosuolo indagato. Il GPR trova ottimi impieghi in terreni resistivi (spazi vuoti, ghiaie, sabbie sciolte, etc.), consentendo di individuare strutture con “caratteristiche elettromagnetiche” differenti rispetto all’ambiente circostante, mentre risulta praticamente “cieco” in terreni con alta conduttività, in cui l’assorbimento dell’energia da parte del materiale stesso ne limita la profondità di indagine (ad esempio in caso di strati di argilla, falde freatiche, umidità nel sottosuolo).

I parametri fisici che influenzano la propagazione delle onde elettromagnetiche nel mezzo (in questo nel sottosuolo) sono:

- la *conducibilità elettrica* σ (s/m). Essa è una caratteristica del mezzo e rappresenta la sua capacità di veicolare una corrente elettrica. Un buon conduttore è caratterizzato da alti valori di σ .
- la *permittività dielettrica* ϵ . Essa rappresenta la capacità del materiale di polarizzarsi elettricamente in risposta all’applicazione di un campo elettrico esterno. Un dielettrico perfetto è rappresentato dallo spazio vuoto in cui $\sigma = 0$. La permittività dielettrica del vuoto è $\epsilon_0 = 8,857 \times 10^{-12}$ (Farad/m). La permittività relativa al vuoto è chiamata costante dielettrica $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ ed è un numero puro.
- la *permeabilità magnetica* μ . Essa rappresenta la capacità del materiale di magnetizzarsi per effetto di un campo magnetico esterno. La permeabilità magnetica del vuoto è $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (Henry/m). La permeabilità relativa al vuoto $\mu_r = \mu/\mu_0$ è un numero puro. Per materiali geologici $\mu_r \approx 1$ e quindi è di solito un parametro poco significativo nelle indagini GPR.

La propagazione di un campo elettromagnetico in un mezzo materiale è governata dalle equazioni di Maxwell.

L’ampiezza dell’onda elettromagnetica (EM) subisce un’attenuazione man mano che si propaga in profondità nel sottosuolo.

La prima causa è lo smorzamento geometrico: l’ampiezza dell’onda EM diminuisce infatti all’aumentare della distanza dal punto sorgente in modo proporzionale all’inverso della distanza.

La seconda causa è legata al tipo di materiale che l’onda EM attraversa, e in particolare alle sue perdite per conducibilità e/o (caso più raro) per isteresi.

Se il mezzo attraversato dall’onda EM ha un’elevata conducibilità elettrica, l’ampiezza dell’onda EM viene attenuata molto rapidamente. Mezzi molto conduttivi sono quelli che contengono acqua, argilla, sali disciolti o elettroliti. Elevati valori di conducibilità si rilevano anche nei suoli agricoli saturi di azoto e potassio o nei suoli umidi impregnati di carbonato di calcio. La costante dielettrica varia in base alla composizione chimica, alla struttura fisica, alla quantità di umidità e alla temperatura del campione roccioso. Tanto più la differenza di ϵ_r



tra due materiali del sottosuolo è grande, tanto più aumenta l'ampiezza delle riflessioni generate e l'ampiezza stessa è tanto più pronunciata, quanto più la distanza tra la discontinuità e le antenne è piccola.

Nella tabella 1 sono riportati i valori tipici della costante dielettrica relativa ϵ_r , della conducibilità elettrica σ , della velocità v e dell'attenuazione α , osservati per diversi materiali ad una frequenza di 100 MHz:

Tabella 1 : Valori di ϵ_r , σ , v , α per alcuni materiali

Materiale	$\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$	σ (mS/m)	V(m/ns)	α (dB/m)
Aria	1	0	0.30	0
Acqua distillata	80	0.01	0.033	$2 \cdot 10^{-3}$
Acqua dolce	80	0.5	0.033	0.1
Acqua salata	80	$3 \cdot 10^4$	0.01	10^3
Sabbie asciutte	3-5	0.01	0.15	0.01
Sabbie sature	20-30	0.1-1	0.06	0.03-0.3
Calccare	4-8	0.5-2	0.12	0.4-1
Argillite	5-15	1-100	0.09	1-100
Limo	5-30	1-100	0.07	1-100
Argilla	5-40	2-1000	0.06	1-300
Granito	4-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Sale asciutto	5-6	0.01-1	0.13	0.01-1

Un'altra causa di attenuazione sono i fenomeni di riflessione e rifrazione che si verificano quando l'onda incide su una superficie di separazione tra due mezzi con differenti proprietà elettromagnetiche.

Riflessioni e trasmissioni possono inoltre manifestarsi in maniera pronunciata generando riflessioni multiple o fenomeni di *scattering* che disperdono ancora di più l'energia radar.

Le antenne utilizzate nei sistemi radar hanno un "range di frequenze" che va da 10MHz a circa 3GHz. Esse hanno generalmente una larghezza di banda di due ottave, cioè le frequenze variano tra 1/2 e 2 volte la frequenza dominante o frequenza di centro banda f_0 . In realtà, anche se un'antenna radar è identificata da una segnata frequenza di centro banda, non necessariamente l'energia che si propaga nel sottosuolo è esattamente centrata su quella frequenza, poiché il suolo ha un effetto di carico sull'antenna. Inoltre nel sottosuolo le alte

frequenze vengono assorbite più rapidamente delle basse e ciò provoca uno spostamento della frequenza centrale verso le basse frequenze.

L'energia radar non penetra nei metalli. Un oggetto metallico largo rispetto alla lunghezza d'onda incidente rifletterà il 100% dell'energia radar che lo colpisce e oscurerà ogni cosa al di sotto di esso.

La scelta delle antenne da adoperare in un rilievo va fatta in base alle dimensioni geometriche degli oggetti di interesse e della profondità a cui essi presumibilmente dovrebbero trovarsi.

Le onde elettromagnetiche prodotte dalle antenne standard, irradiano energia radar nel terreno secondo un cono ellittico il cui apice è al centro dell'antenna trasmittente. Il lobo di radiazione nel sottosuolo permette così di "guardare" non solo direttamente sotto l'antenna ma anche di fronte, in dietro e ai lati man mano che l'antenna viaggia sul terreno. Parliamo così di risoluzione orizzontale. La stima del lobo di radiazione è importante specialmente quando si progetta la spaziatura tra le linee di una griglia, in modo da rendere evidenti tutti i bersagli di una certa importanza nel sottosuolo, cioè in modo tale che questi ultimi siano colpiti dall'energia radar trasmessa e che perciò possano generare riflessioni. In generale, l'angolo del cono è definito dalla costante dielettrica relativa del materiale attraversato dalle onde e dalla frequenza centrale di emissione dell'antenna.

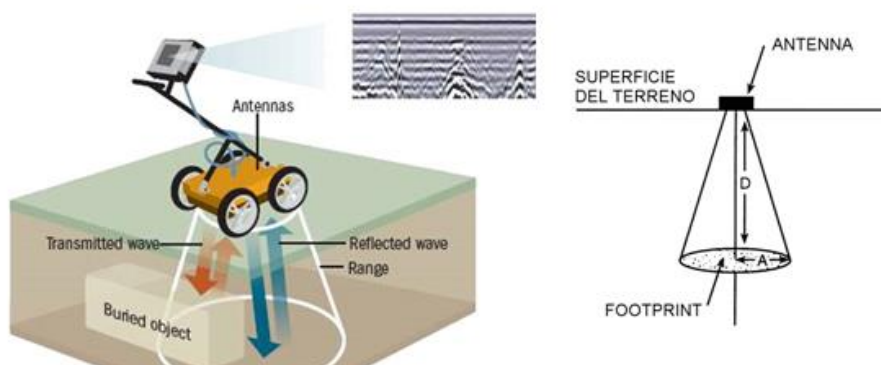


Figura 3 – Cono ellittico della penetrazione GPR nel terreno

Un'equazione che può essere usata per stimare la larghezza del fascio di trasmissione a varie profondità (il footprint) è la seguente (Leucci, 2015):

$$A = \frac{\lambda}{4} + \frac{D}{\sqrt{\epsilon_r + 1}}$$

dove A sono le dimensioni approssimate del raggio del footprint, λ è la lunghezza d'onda dell'impulso elettromagnetico in aria, D è la profondità a cui si trova l'oggetto riflettente e ϵ_r è la costante dielettrica relativa del mezzo attraversato.

Una volta scelta la frequenza da utilizzare nell'indagine geofisica bisogna conoscere la velocità di propagazione nel mezzo che ci consente di stimare la profondità (D) delle riflessioni: questa



si può misurare dagli stessi dati georadar. A parità di velocità, all'aumentare della frequenza aumenta il potere risolutivo verticale e orizzontale. È anche noto però che all'aumentare della frequenza aumenta il potere di assorbimento del mezzo e diminuisce quindi la profondità di penetrazione.

All'interfaccia aria-suolo si crea una prima rifrazione che provoca un cambiamento di direzionalità del fascio radar; la maggiorparte dell'energia è incanalata al di sotto dell'antenna e si propaga in un cono.

Più alta è la costante dielettrica relativa ϵ_r del materiale di cui è costituito il terreno, più bassa è la velocità dell'onda radar trasmessa, e più focalizzato è il cono di trasmissione delle onde che si propagano nel terreno.

L'espansione del cono di energia sotto l'antenna, permette di “vedere” un bersaglio non soltanto quando l'antenna gli passa effettivamente sopra, ma anche prima e subito dopo, generando le classiche “iperboli” che spesso si notano nei tracciati radar.

Alcune antenne non sono schermate e irradiano in tutte le direzioni. Le antenne non schermate, possono registrare riflessioni generate dallo stesso operatore che trascina l'apparecchiatura radar lungo il profilo, o da alcuni oggetti vicini, come per esempio un albero o una macchina, case e linee elettriche. Queste riflessioni rendono ovviamente più difficoltosa l'analisi dei dati, e per questo è consigliabile prendere nota degli oggetti presenti in superficie in prossimità del profilo radar eseguito.

Superfici sepolte, che contengono avvallamenti o creste, possono focalizzare o diffondere l'energia radar secondo la loro orientazione rispetto all'antenna in superficie. Se per esempio una superficie ha una convessità verso l'alto, molta dell'energia radar sarà riflessa lontano dall'antenna e non sarà registrata alcuna riflessione significativa. Questo è il cosiddetto “*scattering radar*”.

Se invece la superficie sepolta ha una concavità verso l'alto, allora l'energia sarà focalizzata verso l'antenna e sarà registrata una riflessione più intensa.

Inoltre, poiché nel vuoto non si hanno perdite per assorbimento, una discreta quantità di energia può restare intrappolata all'interno di una cavità e l'onda può “rimbalzare” più di una volta da una parete all'altra, generando ogni volta delle riflessioni, che sulla sezione radar sono identificate come “*riflessioni multiple*”.

Molto importante è, dunque, la scelta dell'antenna da adoperare poiché è legata alla capacità di risolvere corpi sepolti e alla profondità che si vuole raggiungere. I fattori che devono essere considerati sono soprattutto le dimensioni e la profondità dell'oggetto che si vogliono rendere evidenti e inoltre occorre esaminare accuratamente l'area d'indagine, allo scopo di individuare la presenza di ostruzioni o impedimenti sulla superficie, linee elettriche, ripetitori, radio, ecc. che possono limitare o impedire l'utilizzo di alcune antenne.

Antenne ad alta frequenza (> 500 MHz) forniscono elevate risoluzioni spaziali, ma limitate profondità di penetrazione, quindi sono adatte per investigare spessori modesti (in genere minori di un metro). Al contrario, antenne a bassa frequenza consentono una penetrazione superiore, ma la risoluzione spaziale diminuisce. La banda di frequenza, normalmente utilizzata dai sistemi GPR, va da circa 10 MHz fino a superare 1 GHz (la profondità di penetrazione, in quest'ultimo caso, si riduce drasticamente). Inoltre le antenne a bassa frequenza sono più lunghe, più pesanti e meno maneggevoli rispetto alle antenne a frequenza maggiore.

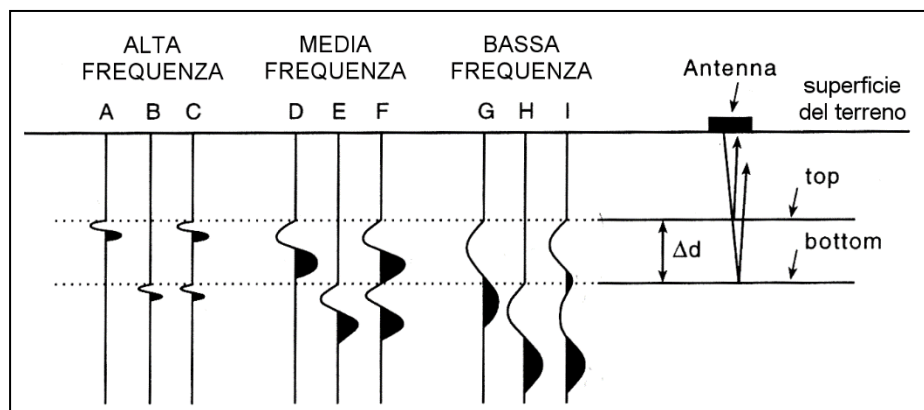


Figura –

4

Riflessione dal top, dal bottom e riflessione totale da due strati separati da una distanza Δd , corrispondenti a impulsi di diversa lunghezza d'onda (da Leucci, 2015).

Considerando due superfici di discontinuità pressoché parallele il segnale ricevuto si relaziona grossomodo alla riflessione dalla parte superiore e dalla parte inferiore di un oggetto sepolto. Affinché le due riflessioni siano distinguibili è necessario che la distanza fra le superfici stesse, sia maggiore o uguale ad una lunghezza d'onda; infatti se la distanza è minore (caso G, H e I in Fig. 4), allora le onde riflesse risultanti dalla sommità e dal fondo dell'anomalia sepolta non saranno riconoscibili in quanto sovrapposte l'una all'altra, mentre se è maggiore si individuano due riflessioni distinte e l'oggetto può essere risolto (vedere le riflessioni A, B e C in Fig. 4).

Generalmente, nel caso del metodo radar, la risoluzione verticale si considera idealmente tra $\lambda/4$ e $\lambda/2$ dove $\lambda = v/f_0$ è la lunghezza d'onda nel terreno corrispondente alla frequenza centrale dell'antenna (Leucci, 2015).



Tabella 2 - Valori della lunghezza d'onda λ al variare della frequenza e della velocità di propagazione dell'onda elettromagnetica.

Freq. (MHz)	P(ns)	λ (m) a v=c	λ (m) v=(1/3)c	λ (m) v=(1/6)c
1	1000	300	100	50
10	100	30	10	5
30	33	10	3.3	1.65
100	10	3	1	0.5
300	3.3	10	3.3	1.65
500	2	0.6	0.2	0.1
1000	1	0.3	0.1	0.05
2000	0.5	0.15	0.05	0.025
3000	0.33	0.1	0.03	0.015

La fase più delicata dell'indagine GPR è la stima della velocità media con cui l'impulso elettromagnetico si propaga all'interno del terreno oggetto dell'indagine. Una buona conoscenza di questo importantissimo parametro, permette all'operatore di stabilire approssimativamente la profondità a cui si trovano gli oggetti responsabili delle riflessioni osservate nelle sezioni radar.

Le velocità che si riscontrano nelle prospezioni GPR sono comprese tra 30 cm/ns dell'aria e circa 1 cm/ns per l'acqua salata.

Le tecniche di acquisizione dati, per le misure di velocità, sono essenzialmente due: WARR (riflessione e rifrazione a grande angolo) e CMP o CDP (punto medio comune o punto profondo comune). Entrambe richiedono l'utilizzo di due antenne separabili fra loro.

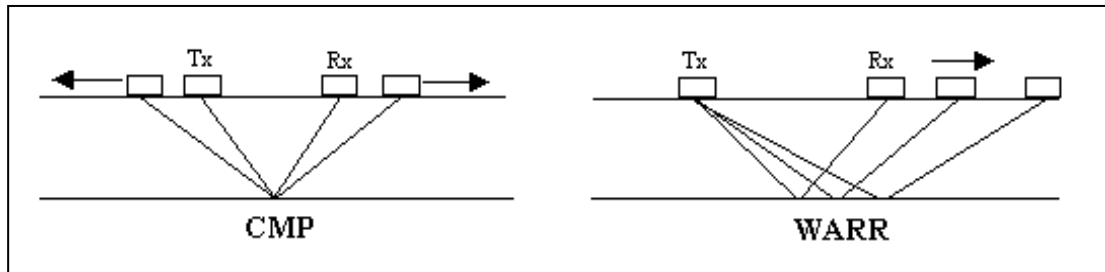
La tecnica di acquisizione WARR prevede che un'antenna, in genere la trasmittente, sia tenuta fissa mentre l'altra si muove lungo il profilo scelto ad una velocità molto bassa e il più possibile costante.

Il problema delle misure di velocità, è comune per i due metodi di prospezione GPR e sismico ed infatti il WARR si ispira concettualmente agli schemi di acquisizione dei dati sismici "common-source" o "common-receiver" a seconda se, a rimanere fissa, sia rispettivamente l'antenna trasmittente o la ricevente.

Nel CDP, le antenne devono essere spostate, di una uguale distanza, lungo versi opposti rispetto ad un punto medio che resta fermo. Entrambi i metodi prevedono che il riflettore venga individuato preliminarmente dall'analisi dei profili radar eseguiti precedentemente sul sito. La grande difficoltà di spostare entrambe le antenne alla stessa velocità, per la registrazione in continuo, porta ad eseguire il CDP soltanto per punti.

Il WARR necessita di un riflettore orizzontale mentre il CDP può essere utilizzato anche con riflettori debolmente inclinati.

Figura 5 - Tecniche radar di acquisizione per la determinazione delle stime di velocità.



Sono disponibili diversi metodi per la stima della velocità delle onde elettromagnetiche. Ognuno di questi presenta vantaggi e svantaggi nelle applicazioni pratiche.

Metodo 1 - Localizzazione di oggetti a profondità conosciuta: Il tempo doppio di viaggio è il tempo che occorre ad un'onda EM per percorrere il tragitto, nel terreno, dall'antenna trasmittente fino all'oggetto e ritorno al ricevitore. Denotando la profondità dell'oggetto conosciuto con z_{noto} e la velocità dell'onda e.m. con v , il tempo doppio di viaggio per una configurazione monostatica dell'antenna è dato da:

$$t = \frac{2z_{\text{noto}}}{v}$$

Poiché la profondità dell'oggetto è conosciuta, si può piccare il tempo doppio di viaggio da una sezione radar e esprimere la velocità dell'onda EM usando l'equazione sopra. L'accuratezza di questa velocità, dipende dall'errore t_{err} con cui conosciamo il tempo doppio di viaggio piccato.

Denotando con t_{picc} il tempo doppio di viaggio piccato, questo può essere espresso come una funzione del tempo doppio di viaggio accurato e dell'errore introdotto tramite la relazione:

$$t_{\text{picc}} = t \pm t_{\text{err}}$$

Per cui il range della velocità dell'onda EM stimata può essere espresso da:

$$v = \frac{2z_{\text{noto}}}{t_{\text{picc}} \pm t_{\text{err}}}$$

oppure

$$\frac{2z_{\text{noto}}}{t_{\text{picc}} + t_{\text{err}}} \leq v \leq \frac{2z_{\text{noto}}}{t_{\text{picc}} - t_{\text{err}}}$$

Più è alto l'errore sul tempo doppio di viaggio e più è alta l'imprecisione sulla velocità. Assumendo la velocità dell'onda EM come costante nell'area vicino l'oggetto noto, la profondità di un oggetto sconosciuto nelle vicinanze dell'oggetto noto può essere facilmente calcolata usando la velocità ottenuta.

Metodo 2 – Riflessione da un punto sorgente: Questo è un metodo veloce per la stima della velocità e si basa sul fenomeno che un piccolo oggetto, per esempio la sezione d'urto di un tubo, riflette le onde radar in quasi tutte le direzioni (Fig. 6)

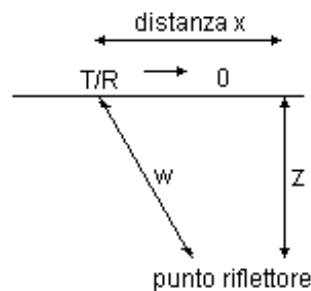


Figura 6 - Geometria del punto riflettore

Denotando la profondità dell'oggetto ancora con z e la distanza laterale dell'antenna monostatica dall'oggetto con x , la lunghezza w del cammino dell'onda può essere semplicemente espressa da

$$w^2 = 4(x^2 + z^2)$$

e dunque la funzione del tempo doppio di viaggio con

$$t(x) = \frac{w}{v} = \frac{2\sqrt{x^2 + z^2}}{v}$$

Denotando con t_0 il tempo doppio di viaggio, sulla verticale all'oggetto, si ha

$$t_0 = \frac{2z}{v}$$

l'equazione che definisce $t(x)$ può essere riscritta come:

$$t(x) = \sqrt{\frac{4x^2}{v^2} + t_0^2}$$

che è la formula per la cosiddetta “*diffrazione iperbolica*”.

Poiché conosciamo, dalla sezione radar, per ogni posizione x , il corrispondente tempo doppio di viaggio $t(x)$, la velocità può essere calcolata invertendo l'equazione sopra.

La forma dell'iperbole è governata dalla velocità dell'onda nel terreno e dalla geometria dell'oggetto sepolto. L'inclinazione dei suoi asintoti è una funzione solo della velocità

media. Il tempo di viaggio al suo vertice è funzione sia della profondità dell'oggetto che della velocità dell'onda nel terreno.

Se l'oggetto riflettore è più allargato e di diametro circolare, come per esempio un cilindro, il vertice dell'iperbole rappresenta il top del cilindro, mentre la forma è identica a quella di un punto diffrattore sepolto al centro del cilindro.

Metodo 3 – Registrazione di un semplice CDP: Il percorso di un'onda EM dal trasmettitore al riflettore e da questo al ricevitore, può essere espresso come una funzione della distanza x tra il trasmettitore e il ricevitore (Fig. 7) nella forma:

$$w^2 = x^2/4 + z^2$$

e la funzione del tempo doppio di viaggio come

$$t(x) = \frac{2w}{v} = \frac{2\sqrt{\frac{x^2}{4} + z^2}}{v}$$

Denotando la distanza zero del tempo doppio (distanza nulla tra le antenne) di viaggio con t_0 , allora

$$t_0 = t(x = 0) = \frac{2z}{v}$$

L'equazione di $t(x)$ può essere riscritta come

$$t(x) = \sqrt{\frac{x^2}{v^2} + t_0^2}$$

Può essere stimata la velocità di propagazione dell'onda e.m. nel mezzo.

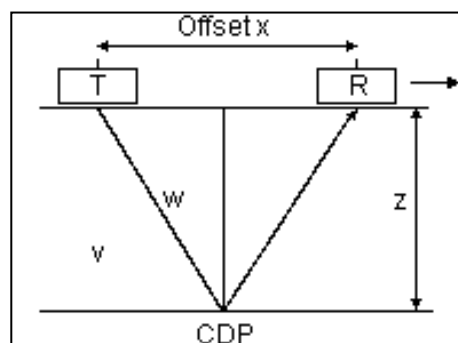


Figura 7 - Configurazione Trasmettitore / Ricevitore per una semplice registrazione CDP.



Il trattamento dei dati GPR

La fase di elaborazione ed interpretazione dati è principalmente basata sull'individuazione di riflettori, sul calcolo della loro posizione in profondità e delle loro dimensioni.

La presenza di colui che interpreterà i dati durante la fase di acquisizione è sicuramente consigliata per una corretta integrazione dei risultati con i vari fattori ambientali.

Una valutazione preliminare dei risultati può essere effettuata già in fase di acquisizione favorendo le eventuali correzioni della configurazione strumentale al fine di ottimizzare la qualità dei dati in funzione dello scopo dell'indagine.

La fase di elaborazione è generalmente preceduta da una di filtraggio durante la quale una serie di filtri applicata ai dati consente il miglioramento del rapporto segnale/rumore. Successivamente, tenendo in considerazione gli scopi dell'indagine, ogni profilo viene trattato in modo da mettere in maggior risalto le informazioni richieste.

In caso quindi di indagini finalizzate all'individuazione di target di piccole dimensioni, i dati verranno filtrati in modo da rimuovere le riflessioni a profondità costante evidenziando principalmente le variazioni laterali del segnale. Una volta ottenuta la sezione radar-stratigrafica relativa ad ogni profilo, viene effettuata la sua conversione dalla scala verticale in tempo alla scala in profondità. Quest'ultima fase richiede la stima della velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche che può essere effettuata utilizzando uno dei metodi sopra elencati. Nel caso in studio è stato utilizzato il metodo denominato "riflessione da un punto sorgente".

L'elaborazione dei dati GPR è stata molto complessa ed i passi del "processing" sono di seguito elencati:

- 1) rimozione della traccia media: questo tipo di filtro permette la rimozione della banda orizzontale visibile nelle sezioni radar, che può rappresentare riflessioni da oggetti che si mantengono a distanza costante dall'antenna. L'algoritmo, basandosi su un semplice processo aritmetico, che somma tutte le ampiezze delle riflessioni generate allo stesso tempo lungo il profilo e divide per il numero delle tracce sommate, permette di rimuovere la traccia media e di esaltare, così, gli eventi non orizzontali presenti nelle sezioni radar;
- 2) normalizzazione dell'ampiezza (*declipping*): per eliminare locali saturazioni nell'ampiezza delle tracce. Si sceglie un fattore di scala (0.6 nel nostro caso) per il quale saranno moltiplicati tutti i valori dell'ampiezza: una procedura di interpolazione che utilizza un polinomio di terzo ordine permetterà la ricostruzione delle forme d'onda saturate.

3) migrazione: una tecnica che permette di eliminare distorsioni introdotte nei dati registrati. una sezione GPR non contiene informazioni unidirezionali a causa del lobo conico di radiazione dell'energia per cui alcune riflessioni presenti possono essere generate anche da oggetti posti lateralmente rispetto alla posizione dell'antenna. Questo carattere multidirezionale della registrazione delle riflessioni GPR si manifesta nella generazione di iperboli che possono causare seri problemi nell'interpretazione. La migrazione risolve questo problema di immagine riportando l'energia al suo vero punto di riflessione.

4) filtro passa basso: consente di eliminare la componente di rumore ad alta frequenza (effetto nebbia) presente nelle sezioni radar.

La planimetria dei profili ha consentito di correlare spazialmente, in modo 3D, le anomalie presenti su ciascuna sezione utilizzando l'analisi dell'ampiezza degli eventi riflessi entro assegnati intervalli di tempo e costruendo le isosuperfici di ampiezza.

La planimetria dei profili ha consentito di correlare spazialmente, in modo 3d, le anomalie presenti su ciascuna sezione utilizzando l'analisi dell'ampiezza degli eventi riflessi entro assegnati intervalli di tempo (*time slices*) (Fig. 13).

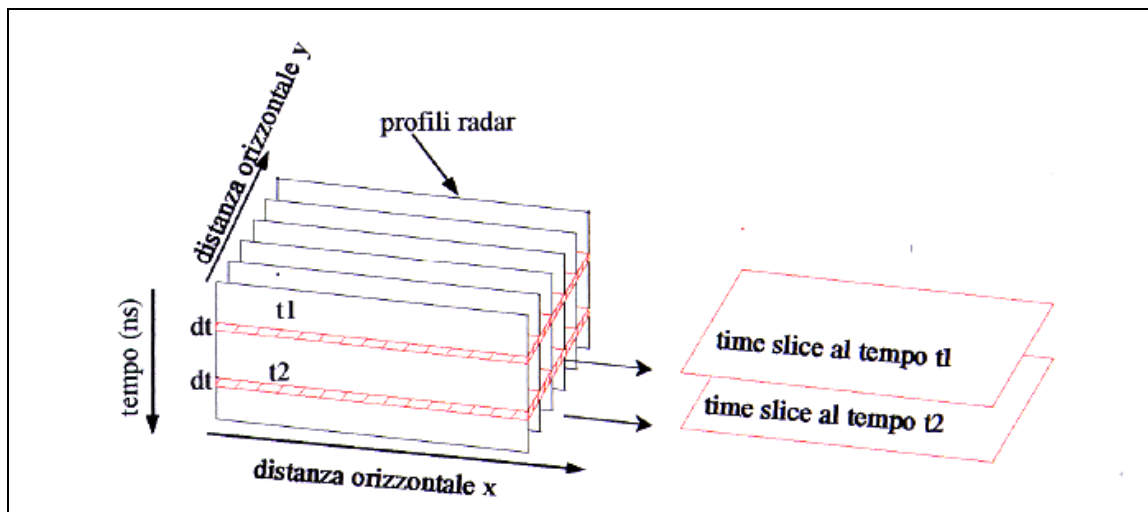


Figura 13: schema di costruzione delle time slices; l'ampiezza visualizzata nelle time slices rappresenta la media dei quadrati delle ampiezze degli eventi riflessi nella finestra temporale dt

Come è noto, l'ampiezza degli eventi riflessi è direttamente correlabile con il contrasto tra le caratteristiche elettriche dei mezzi presenti nel sottosuolo, pertanto la visualizzazione tridimensionale, per intervalli di ampiezza, della distribuzione degli eventi riflessi consente la



localizzazione spaziale delle strutture che determinano le riflessioni stesse. Ogni time slice corrisponde ad uno strato di terreno la cui profondità ed il cui spessore dipendono, oltre che dai valori assunti per il tempo, dalla velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche nel sottosuolo.

Il tipo di analisi precedentemente descritto applicato alle aree in studio ha dato risultati soddisfacenti. Sono state costruite slices di ampiezza a intervalli temporali di 5ns; ogni slice corrisponde ad uno spessore di terreno di circa 0.17m.

Il colore blu indica debole ampiezza del segnale riflesso (sottosuolo costituito da materiale sostanzialmente omogeneo); i colori dal celeste al rosso più intenso indicano ampiezze via via crescenti del segnale riflesso e quindi presenza di discontinuità elettromagnetiche significative. Le variazioni di ampiezza (quindi di colore) in una stessa slice sono indice di variazioni orizzontali nelle caratteristiche elettromagnetiche del terreno.

Bibliografia

Leucci G., 2015, Geofisica Applicata all'Archeologia e ai Beni Monumentali, Dario Flaccovio Editore Palermo, pp 368.



FIGURE