

Stefano Urbini<sup>A</sup>, Vincenzo Sapia<sup>A</sup>, Valerio Materni<sup>A</sup>, Marco Marchetti<sup>A</sup>,  
Anna Anguissola<sup>B</sup>, Emanuele Taccola<sup>B</sup>, Riccardo Olivito<sup>C</sup>

<sup>A</sup> Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

<sup>B</sup> Dip. di Civiltà e Forme del Sapere, Università di Pisa.

<sup>C</sup> Scuola IMT Alti Studi Lucca.

## INDAGINI GEOFISICHE NELL'HORTUS DEI PRAEDIA IULIAE FELICIS (POMPEI, II, 4). RISULTATI PRELIMINARI E PROSPETTIVE

**Abstract:** The paper presents the preliminary results of the integrated geophysical survey conducted in the *hortus* of the *Praedia Iuliae Felicis* (Pompeii, II, 4). The project aims to reconstruct the original arrangement of this vast open garden, belonging to one of Pompeii's largest and most discussed buildings. Together with archaeological consideration, the information collected during the survey guided the location of three trenches, opened in the summer of 2019. Logistic constraints prevented from opening the three trenches in the points deemed most interesting according to the geophysical survey. Nonetheless, the multiparametric approach adopted for the survey provided useful data to the purposes of archaeological interpretation.

**Keywords:** Geophysical survey, Pompeii, *Praedia Iuliae Felicis*, Magnetometry, Ground Probing Radar (GPR), Frequency Domain Electromagnetic Method (FDEM).

### Introduzione

In questo lavoro si presentano i risultati preliminari ottenuti attraverso l'integrazione di diversi metodi di indagine geofisica nell'*hortus* dei *Praedia Iuliae Felicis* (Pompeii, II, 4) a partire dall'estate del 2016.

Tali ricerche sono state condotte grazie al coinvolgimento dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia nell'ambito di un vasto piano di ricerca, il Progetto "Pompeian Residential Architecture Environmental, Digital and Interdisciplinary Archive" (PRAEDIA). Il Progetto vede impegnate differenti istituzioni: il Parco Archeologico di Pompeii, il Dipartimento di Civiltà e Forme del Sapere dell'Università di Pisa, la Scuola IMT Alti Studi di Lucca e il laboratorio SMART (Space-time Multiscale Applications for Research and Technology) della Scuola Normale Superiore. Grazie alla collaborazione tra prospettive e competenze diverse, PRAEDIA ha l'obiettivo di affrontare, in un'ottica ampia e articolata, l'edilizia domestica nella *Regio II* pompeiana. La prossimità di questo quadrante urbano, delimitato da due delle arterie principali di Pompeii (le strade oggi note come Via dell'Abbondanza e Via di Nocera), a luoghi intensamente frequentati quali l'anfiteatro, la Palestra Grande, una porta urbana e la necropoli di Porta Nocera, ne fa uno dei settori di più vivace interazione tra la sfera pubblica e quella privata. Si tratta, come è noto, di un'area a lungo considerata tra quelle di più recente urbanizzazione, sebbene gli indizi in favore di una frequentazione di questo settore urbano già in età arcaico-classica siano ormai significativi (Anguissola & Olivito, 2020; Olivito & Taccola, in press).

In tale contesto, i *Praedia Iuliae Felicis* costituiscono uno dei complessi più articolati della *Regio II*, frutto dell'accostamento di nuclei assai diversi tra loro: aree a destinazione commerciale aperte al pubblico (le *tabernae* lungo Via dell'Abbondanza); infrastrutture evidentemente riservate a un numero ristretto di clienti (l'elegante *balneum*, le *pergulae* e i *cenacula* in affitto, nonché, verosimilmente, il *viridarium* con triclinio estivo che occupa il settore centrale dell'edificio); una vera e propria *domus* privata aperta sul Vicolo di Giulia Felice; un esteso *hortus* messo a coltura. Alla luce di queste osservazioni e delle esigenze poste dal contesto in esame, i rilievi geofisici previsti nella zona dell'*hortus* hanno avuto come obiettivo principale una prima caratterizzazione del sottosuolo allo scopo di verificare la presenza di strutture residue anteriori al complesso di proprietà di *Iulia Felix*. Proprio l'*hortus*, infatti, sembra configurarsi come un settore di particolare interesse per lo studio delle differenti fasi dell'edificio: in quest'area, infatti, alcuni saggi stratigrafici realizzati nel corso degli anni '90 dello scorso secolo avevano portato in luce i resti spoliati di strutture murarie apparentemente riferibili ad età ellenistica (Parslow, 1998; Anguissola & Olivito, 2020). Le misurazioni geofisiche, dunque, si proponevano di intercettare, in forma di anomalie, la prosecuzione di tali strutture, al fine di programmare le successive fasi del progetto e, in particolare, la realizzazione di più puntuali indagini stratigrafiche.

Come è noto, infatti, l'applicazione di metodi geofisici esplorativi non invasivi (ad es. magnetometria; tecnica elettromagnetica radar GPR; tecnica elettromagnetica a induzione nel campo della frequenza FDEM) è divenuta pratica piuttosto consueta in ambito archeologico. Tali metodi consentono di raccogliere utili informazioni sulle caratteristiche del sottosuolo e quindi programmare con un maggior livello di precisione gli eventuali interventi di scavo (Basile et al., 2000; Brizzolari et al., 1992; Cardarelli et al., 2008; Boschi, 2020; Shi et al., 2020; Smiriglio et al., 2020). In generale, infatti, lo scopo principale di una prospezione geofisica è quello di rilevare ed enfatizzare i segnali prodotti da oggetti presenti nel sottosuolo caratterizzati da un contrasto più o meno netto rispetto al terreno inglobante, tale da generare pertanto una "anomalia". Come è facile immaginare, le caratteristiche fisiche dell'oggetto di indagine, così come quelle del terreno (resistività, composizione, ecc.) incidono anche profondamente sull'efficacia dei singoli metodi di misurazione (Weymounth & Huggins, 1985; Wynn, 1986), al punto che non sempre è possibile ricostruire con accuratezza dimensioni e profondità delle strutture sepolte. Per far fronte a tali ostacoli, è necessario dunque ricorrere all'impiego di metodi di misurazione differenti. In questo modo è infatti possibile ridurre la naturale indeterminazione di ciascuna tecnica (Harris et al., 1999) e pervenire ad una più accurata definizione dell'oggetto d'indagine. Ciò spiega la ragione per cui, negli ultimi dieci anni, l'integrazione dei risultati ottenuti con tecniche geofisiche diverse abbia condotto a definire una sorta di procedura d'indagine standard, applicata soprattutto in campo archeologico (Bottari et al., 2017; Di Mauro et al., 2014; Ghezzi et al., 2019; Keay et al., 2009; Urbini et al., 2011; Yuan et al., 2006). Anche nel caso dei *Praedia* si è dunque scelto di impiegare in maniera congiunta le seguenti tecniche geofisiche, combinandole in funzione degli obiettivi che l'indagine si proponeva:

- la magnetometria (MAG);
- la tecnica GPR;
- la tecnica elettromagnetica a induzione nel campo della frequenza (FDEM).

Nelle pagine che seguono si illustreranno in maggior dettaglio i metodi di indagine non invasiva impiegati nell'ambito Progetto PRAEDIA, presentando i risultati ottenuti nel corso di due campagne di prospezioni geofisiche svoltesi nel novembre del 2016 e nell'aprile del 2018. In particolare, si offriranno considerazioni di ordine metodologico relative alle potenzialità di ciascuna tecnica, ai suoi limiti e ai modi di interazione con l'indagine prettamente archeologica.

## Materiale e metodi

Come anticipato, nel caso delle indagini geofisiche nell'*hortus* dei *Praedia Iuliae Felicis* sono stati adottati tre metodi differenti. Accanto ad una sintetica descrizione dei tre metodi,

di seguito si forniscono informazioni più dettagliate sulle strumentazioni impiegate e sui relativi settaggi.

### Metodo magnetico

Questo metodo d'indagine consiste nel misurare le variazioni spaziali del campo magnetico terrestre dovute alla presenza nel terreno di corpi magnetizzati. Oggetti di ferro, ceramiche o altre tipologie di materiali presenti nel sottosuolo, caratterizzati da una propria magnetizzazione, producono una deformazione (o anomalia) del campo magnetico terrestre naturale che è tanto più intensa quanto maggiore è la massa del corpo sepolto e minore la distanza dal punto di osservazione. Le anomalie magnetiche rappresentano, in generale, una minima frazione del campo magnetico terrestre e per metterle in evidenza è necessario utilizzare strumenti denominati magnetometri.

La tecnica di acquisizione più impiegata in archeologia, fin dagli anni '50 dello scorso secolo (Belshé, 1957; Aitken, 1958; David et al., 2008) è la misura del gradiente magnetico verticale (magnetometria differenziale). Tale tecnica si basa sull'impiego di due sensori posti lungo la verticale a una piccola distanza (dell'ordine di 0.8-1 m) e fissa. Questa misura risulta particolarmente utile nell'identificazione di anomalie magnetiche legate a corpi magnetizzati superficiali. Inoltre, misurando il campo magnetico terrestre, allo stesso tempo, con due sensori posti ad altezza differente è possibile eliminare alcune fonti di disturbo sia naturali, sia artificiali senza dover ricorrere ai dati di una stazione base per le opportune correzioni in fase di elaborazione.

Le misure magnetiche vengono eseguite muovendosi sul terreno lungo profili paralleli per coprire in modo omogeneo tutta l'area di interesse. L'elaborazione dei dati consiste principalmente nel filtraggio degli *spikes*, ossia nell'eliminare il rumore provocato dalla presenza di disturbi fortemente localizzati del campo magnetico misurato (di origine antropica e in genere caratterizzati da grande ampiezze). Si procede inoltre alla rimozione delle misure influenzate dalla presenza di oggetti metallici presenti nell'area (ad esempio recinzioni, tombini, ecc.).

I dati elaborati vengono rappresentati mediante mappe che mostrano la distribuzione dei valori del campo magnetico terrestre e quindi di eventuali anomalie magnetiche rilevate. In particolare, per l'esame del giardino dei *Praedia*, si è utilizzato un magnetometro a pompaggio ottico ai vapori di Cesio della Geometrics, modello G-858, interfacciato con un GPS della Navcom Technology mod. SF-2110M e allestito in assetto gradiometrico, con due sensori posti in verticale alla distanza di 1 metro e frequenza di campionamento impostata a 1 Hz. Le variazioni del gradiente magnetico verticale (esprese in nanoTesla/m) sono state rese mediante isolinee e bande di colore, a formare carte magnetiche le cui coordinate sono rappresentate nella proiezione UTM Zona 33N Datum WGS84.

### Metodo GPR

Il metodo di indagine denominato Ground Penetrating Radar (GPR) è una tecnica di prospezione di tipo indiretto che sfrutta la generazione, propagazione e ricezione nel suolo di onde elettromagnetiche nel campo delle onde corte (0.11 m). Le frequenze impiegate possono variare tra i 10 MHz e i 2.5 GHz a seconda del tipo di obiettivo e del contesto ambientale in cui si opera. Questa tecnica di indagine sfrutta la capacità di rilevare mezzi caratterizzati da diversa permittività relativa e conducibilità, attraverso la riflessione delle onde elettromagnetiche generate da un'antenna. Tramite l'antenna vengono infatti irradiati nel sottosuolo impulsi di energia elettromagnetica di brevissima durata (qualche nanosecondo, ns) che vengono riflessi, ricevuti, registrati ed elaborati. Il tempo impiegato dall'impulso per viaggiare dal trasmettitore al riflettore e ritornare al ricevitore viene misurato; nel caso in cui la velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche sia nota, si può determinare la profondità di riflessione. La risoluzione che è possibile ottenere e la profondità di penetrazione dipendono rispettivamente dalla lunghezza d'onda del segnale emesso, nonché dall'attenuazione e dall'assorbimento subito dall'onda nel terreno. In generale, la scelta della frequenza da impiegare in una prospezione GPR rappresenta il migliore compromesso tra risoluzione richiesta,

profondità di indagine, dimensione del *target*, necessità logistiche e contesto geologico in cui si opera (Annan & Cosway, 1992).

Questo particolare tipo di indagine è impiegato con successo in svariati campi di applicazione come quello ingegneristico, dei beni culturali, geologico-stratigrafico, idrogeologico oltre che ambientale. Grazie all'elevata risoluzione resa possibile dall'impiego di alte frequenze, negli ultimi venti anni questa tecnica è stata ampiamente utilizzata nelle indagini preventive dei siti archeologici (Basile et al., 2000; Conyers, 2004, Francese et al., 2009) e anche nel caso dei *Praedia* si è rivelata di particolare importanza.

Nello specifico, il rilievo GPR nell'*hortus* del complesso di *Iulia Felix* è stato effettuato impiegando un GPR GSSI Sir 3000 equipaggiato con un'antenna a frequenza centrale pari a 400 MHz ed eseguito secondo maglie di misura organizzate su linee parallele separate di 1 m una dall'altra. Ogni singolo profilo è stato campionato impostando un'acquisizione con circa 100 scansioni al metro e un tempo di registrazione pari a 75 ns. Dopo la correzione per il tempo-zero e il calcolo della velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche nel mezzo (0.075 m/ns), la profondità di indagine è risultata pari a circa 2 m (considerando il mezzo tutto omogeneo). Su ciascun radargramma, il rapporto segnale/disturbo è stato migliorato tramite l'applicazione di tecniche di elaborazione digitale del segnale, tra le quali: filtri verticali in frequenza passa-banda, filtri orizzontali di tipo passa-alto (*background-removal*), deconvoluzione, ottimizzazione della curva di amplificazione e migrazione.

Come nel caso del metodo magnetico, anche in questo caso le maglie di misura eseguite sono state georeferenziate secondo coordinate UTM Zona 33N, WGS84. Ciò è stato possibile tramite l'accoppiamento dello strumento con un GPS geodetico Topcon GB1000 in assetto differenziale, che ha consentito un notevole livello di precisione nel posizionamento topografico delle anomalie risultanti dalla misurazione.

### **Metodo FDEM**

Il terzo metodo impiegato nell'indagine all'interno dei *Praedia*, il Frequency Domain Electromagnetic Method (FDEM), prevede l'uso di una bobina trasmittente che genera un campo magnetico primario ( $H_p$ ) che si propaga nello spazio circostante e nel sottosuolo. Questo campo magnetico variabile, attraversando un conduttore (il terreno), induce in esso delle correnti elettriche. Le correnti indotte si propagano nel mezzo e a loro volta genereranno un campo magnetico secondario ( $H_s$ ) che viene rilevato in superficie da una bobina ricevente posta a una distanza fissa ( $s$ ) da quella trasmittente. La misurazione del rapporto tra questi due campi magnetici ( $H_s/H_p$ ) fornisce un'indicazione sulle proprietà elettriche del mezzo attraversato, ossia sul terreno. Quanto alle misure, esse devono necessariamente essere effettuate ad alta risoluzione, ossia campionando il terreno lungo griglie di acquisizione molto fitte, cercando di intercettare le strutture ortogonalmente alla loro direzione preferenziale.

Nel caso dell'*hortus* dei *Praedia*, per effettuare i rilievi è stato utilizzato uno strumento multifrequenza in configurazione dipolo verticale, nello specifico il GSSI Profiler EMP-400, che permette un'acquisizione simultanea fino a tre frequenze (con valori compresi tra 1000 Hz e 16000 Hz) e la distanza tra le due antenne pari a 1.2 metri. In questo lavoro sono state scelte le seguenti tre frequenze di acquisizione: 2000 Hz, 9000 Hz e 16000 Hz, in modo da mappare le variazioni di conducibilità del terreno a profondità diverse, mentre la frequenza di campionamento è stata impostata a 1 Hz. I profili sono stati eseguiti lungo linee parallele, ancora una volta georeferenziate tramite il GPS integrato dello strumento secondo le già menzionate coordinate (UTM zona 33N, WGS84).

### **Inquadramento topografico dell'*hortus* e delle aree indagate**

L'*hortus* dei *Praedia Iuliae Felicis* si sviluppa su un'area di 3300 m<sup>2</sup> circa, occupando una parte consistente del complesso, a sua volta esteso su un'intera *insula* del sito. Oltre che per il già menzionato interesse che l'area dell'*hortus* assume nella ricostruzione delle principali fasi edilizie dei *Praedia*, proprio l'estensione del giardino, il suo andamento pianeggiante e



fig. 1. Aree indagate all'interno dell' *hortus* dei *Praedia Iuliae Felicis* (Pompei, II, 4).

la pressoché totale assenza di strutture murarie emergenti sul terreno rendono l'*hortus* un luogo ideale ove condurre misurazioni geofisiche.

Ciò non significa che non sia stato necessario confrontarsi con alcuni elementi di disturbo. In primo luogo, l'*hortus* è attraversato diagonalmente (in direzione NE/SO) dal Canale del Conte di Sarno, un ampio ed esteso canale in muratura realizzato tra la fine del XVI e gli inizi del XVII secolo. Tale elemento, già ben noto nella storia degli studi, ha ovviamente comportato la necessità di valutare con cautela i risultati derivanti dalle indagini nell'area centrale dell'*hortus*, ossia quella interessata dal passaggio del canale.

In secondo luogo, l'aspetto attuale dell'*hortus* è fortemente caratterizzato da alberi, soprattutto melograni (*Punica granatum*) e cotogni (*Cydonia oblonga*), e basse siepi che individuano larghe aiuole di forma rettangolare. In questa sede non è possibile ripercorrere le differenti tappe che hanno condotto all'aspetto attuale del giardino, frutto di una riflessione sulle specie arboree e le essenze coltivate nel mondo romano, nonché sull'aspetto attribuito ai giardini d'*otium* dell'area vesuviana. È tuttavia necessario sottolineare come la conformazione odierna dell'*hortus* abbia imposto la necessità di suddividere l'area in quattro settori di forma rettangolare ma di estensione variabile, numerati rispettivamente come Aree 1, 2, 3, 4 (fig. 1).

## Risultati e discussione

### Risultati del metodo magnetico

Le misure magnetiche (vedi *Dataset*), sono state eseguite all'interno delle varie aiuole dell'*hortus* dei *Praedia* e acquisite in modo da coprire uniformemente tutta l'area (fig. 1). La carta del gradiente magnetico verticale è stata ottenuta unendo tutte le 4 aree investigate (fig. 2a). Per una migliore comprensione della geometria e del significato delle anomalie, la mappa magnetica principale è stata quindi sovrapposta alla planimetria dell'edificio (fig. 2b).

Osservando i dati nell'area 4, nella parte sinistra della mappa del gradiente sono presenti ancora gli effetti magnetici prodotti da una struttura in cemento con grata di ferro posta nel terreno. Alcuni metri più in basso si nota un'anomalia piuttosto intensa che sembra collegarsi, lungo un allineamento in direzione NNE-SSO, con altre di minori dimensioni e intensità.

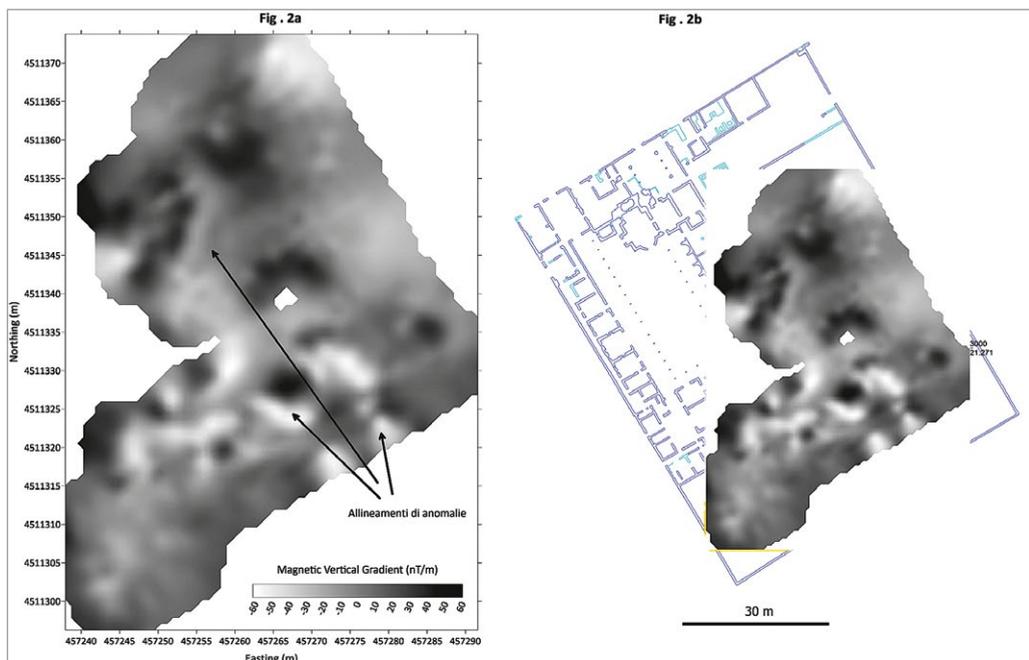


fig. 2. **a.** Mappa del gradiente magnetico verticale dell'intera area; **b.** Sovrapposizione della mappa magnetica complessiva alla planimetria dell'edificio.

I rilievi nelle aree 1-2-3, separati dal precedente dalla rampa metallica di accesso all'edificio, mostrano chiaramente una serie di anomalie molto intense (freccie in fig. 2a) allineate secondo una geometria ben definita, pseudo-rettangolare, con il lato minore destro che sembra proseguire in direzione SSE.

L'intensità del gradiente magnetico rilevato (alcune migliaia di nanoTesla/m) risulta particolarmente elevata in un contesto archeologico e fa ipotizzare la presenza, a ridotta profondità, di elementi fortemente magnetizzati di natura ferrosa, probabilmente riconducibili a una tubazione metallica di età moderna. Sfortunatamente, tali elementi hanno reso pressoché impossibile individuare eventuali altri segnali magnetici di minore intensità, che avrebbero potuto indiziare la presenza di strutture antiche interrato.

Anche i dati dell'area 4 sono stati oggetto di elaborazione separata per estrarre l'informazione appartenente alle strutture debolmente magnetiche. Nella nuova mappa (fig. 2c) (vedi *Dataset*) risulta ben visibile un contrasto del gradiente magnetico allungato in direzione NNE-SSO, che suddivide due zone con valori di fondo diversi. Il primo sembra da riferire alla presenza, nota, di un canale per la regimentazione delle acque (cd. Canale del Conte di Sarno), mentre la differenza dei valori di gradiente magnetico di fondo potrebbe essere imputabile a un rimaneggiamento del terreno di età moderna.

### Risultati del metodo GPR

Passando ad illustrare i risultati del Ground Penetrating Radar, per ciascuna area i singoli radargrammi corretti sono stati riuniti sotto forma di modello 3D nel quale, per ogni intervallo di profondità campionato, il valore delle ampiezze ricevute è stato mediato in funzione della spaziatura planare (X-Y) (Goodman et al., 1995). L'efficacia di questo tipo di ricostruzione è però spesso limitata dalle disomogeneità del terreno in cui le strutture sono inglobate. Tali disomogeneità generano 'rumore' diffuso nel modello, con la conseguente difficoltà nell'individuazione e tracciatura degli obiettivi di indagine. L'interpretazione delle differenti misurazioni è stata condotta preliminarmente tramite l'analisi delle sezioni 2D (profili), dove il contenuto



fig. 3. Mappa *Praedia Iuliae Felicis*: GPR-Slices Z=40 cm.

informativo è più completo, cercando di identificare in esse le infrastrutture sepolte presenti e quindi seguire la loro estensione areale sulle sezioni 3D.

I risultati delle indagini sono stati trattati separatamente per ciascuna area e successivamente combinati in funzione della loro adiacenza, come ad esempio per le aree 1, 2 e 4. Nelle pagine che seguono si proporrà, per ognuna delle tre aree in questione, una discussione più approfondita delle principali anomalie rilevate rispettivamente a tre profondità (40 cm, 80 cm, 120 cm ca) (figg. 3, 4, 5), rimandando invece al *database Open Data MOD* per la consultazione dell'intero apparato grafico in cui le GPR-Slices sono corredate da profili esplicativi che mostrano quali, tra le anomalie individuate, siano caratterizzate da una correlazione areale maggiore.

### Area 1

In quest'area le correlazioni di anomalie più evidenti si ottengono a quattro diverse profondità (da intendersi indicative, vista la scarsa conoscenza del valore della costante dielettrica del mezzo) che risultano essere rispettivamente 40-50-70-120 cm dal piano campagna (p.c.).

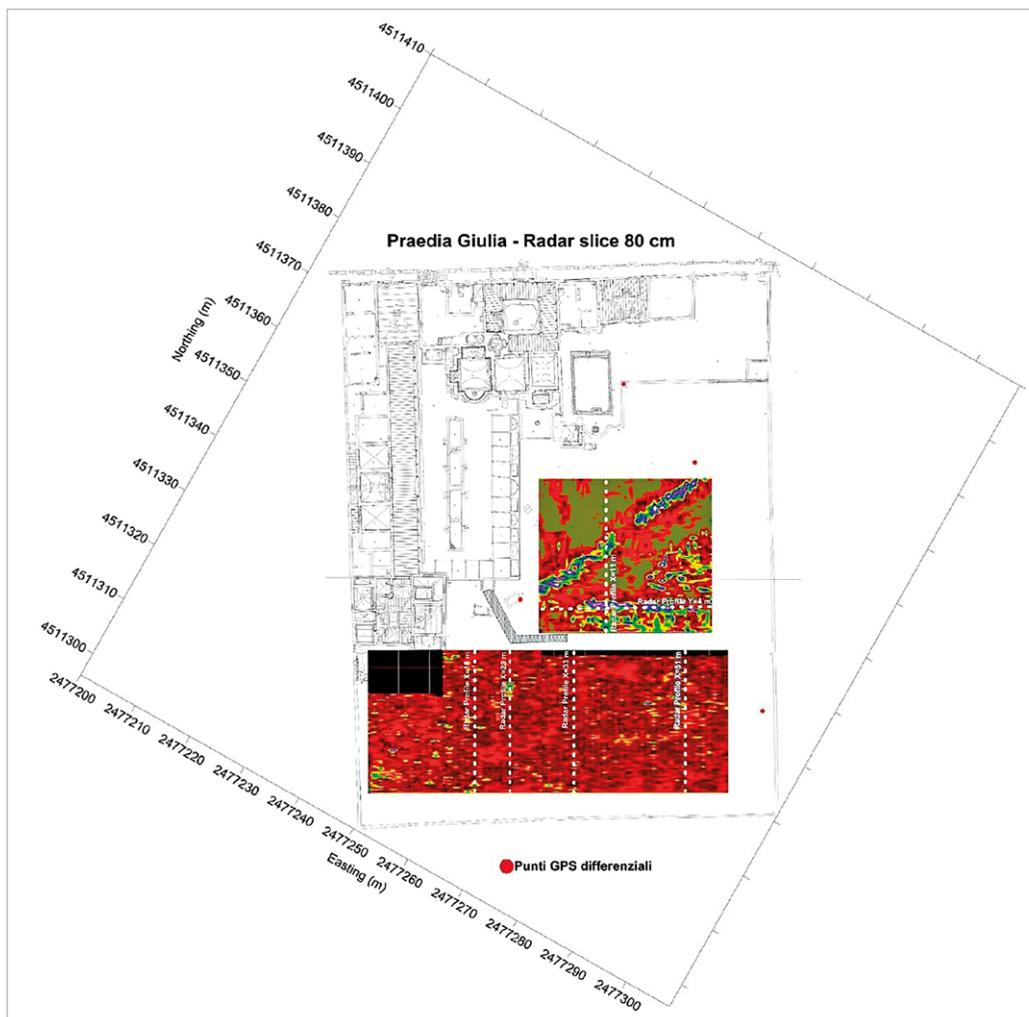


fig. 4. Mappa Praedia Iuliae Felicis: GPR-Slices Z=80 cm.

Per poter associare le singole anomalie alle forme individuabili nelle slices sono stati scelti i profili posti a X=33 m e X=51 m.

I due profili GPR mostrano entrambi una coltre superficiale molto disomogenea a contatto con un substrato più omogeneo, probabilmente compatto, e caratterizzato da un buon coefficiente di riflessione delle onde elettromagnetiche (rettangolo puntinato nero nel Profilo X=51 m). La riflessione dovuta a questa interfaccia raggiunge una profondità massima di circa 120 cm dal p. c. e l'energia riflessa indica un buon contrasto di costante dielettrica tra i due mezzi e, di conseguenza, una certa differenza nelle caratteristiche fisiche dei materiali.

La parte superficiale mostra invece anomalie di diverso tipo (vedi *Dataset*):

- riflessioni associabili a un sottoservizio di natura probabilmente metallica (indicati con il cerchio puntinato azzurro nel profilo X=33 m);
- riflessioni associabili a strutture compatte di origine antropica (rettangoli puntinati bianchi nei profili X=33 m e X=51 m).

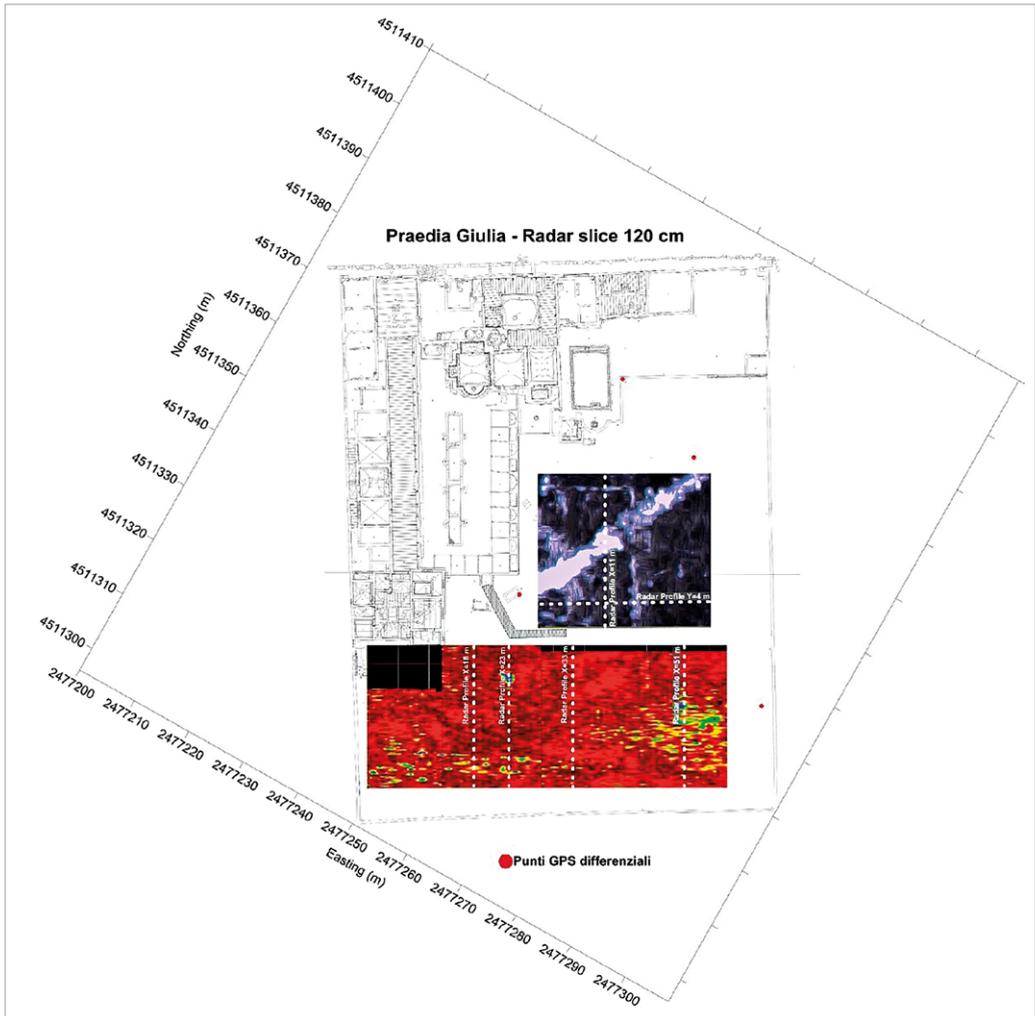


fig. 5. Mappa Praedia Iuliae Felicis: GPR-Slices Z=120 cm.

Le GPR-Slices relative all'area 1 mostrano quindi la correlazione tridimensionale delle anomalie identificate nei singoli profili a profondità costante (e di spessore di circa 15 cm) e in particolare:

- la GPR-Slice Z=40 cm (fig. 3) evidenzia in maniera inequivocabile l'andamento di un sottoservizio (vedi punto "a") che sembra confluire in una struttura allungata lungo l'asse Y;
- la GPR-Slice Z=50 cm mostra in pianta l'estensione della struttura evidenziata con il rettangolo puntinato bianco nel profilo X=33 m;
- la GPR-Slice Z=80 cm (fig. 4) è stata ricavata a questa profondità per cercare di ottenere informazioni areali sull'anomalia particolare evidenziata lungo il profilo X=51 m (rettangolo puntinato bianco). Dalla visione zenitale dell'area si desume una coerenza debole delle energie riflesse sebbene ci sia un allineamento che induce a pensare a una struttura residua;
- la GPR-Slice Z=120 cm (fig. 5) evidenzia infine la zona in cui lo spessore della coltre è maggiore.

## Area 2

In quest'area le correlazioni di anomalia più evidenti si ottengono a due sole profondità poste rispettivamente a 40 e 100 cm dal piano campagna. I radargrammi scelti come rappresentativi sono invece quelli posti a  $X=18$  m e  $X=23$  m.

I due profili radar mostrano ancora una coltre superficiale molto disomogenea ma il contatto con il substrato appare meno netto rispetto l'area precedente anche se posto all'incirca alle stesse profondità. Nelle parti superficiali si osservano invece le seguenti anomalie (vedi *Dataset*):

- c. riflessioni associabili a un sottoservizio di natura probabilmente metallica (indicate con il cerchio puntinato azzurro nel profilo  $X=23$  m);
- d. riflessioni associabili a strutture compatte di origine antropica evidenziate dal rettangolo puntinato bianco nel profilo  $X=23$  m e l'ovale puntinato grigio nel profilo  $X=18$  m.

Le GPR-Slices corrispondenti permettono le seguenti supposizioni (vedi *Dataset*):

- la GPR-Slice  $Z=40$  cm (fig. 3) evidenzia la continuazione del sottoservizio presente nell'area precedente fino alla progressiva  $X=20$  m. Variando un poco la profondità delle slices appare una debole struttura allungata lungo l'asse Y che sembra connettere la condotta verso la parte alta dell'area indagata;
- la GPR-Slice  $Z=100$  cm (vedi *Dataset*) mostra in pianta l'estensione della struttura evidenziata con l'ovale puntinato grigio di cui al punto "b". Tale struttura appare limitata linearmente a circa 16 metri lungo l'asse Y e attraversa trasversalmente tutta l'area indagata. Piuttosto singolare invece è l'anomalia evidenziata nel profilo  $X=18$  m che potrebbe essere di dimensioni contenute (max.  $1 \times 1$  m) e di materiale molto diverso dal mezzo inglobante.

## Area 3

Non si riportano anomalie di particolare interesse nell'area 3. Per tale ragione, non si è proceduto all'elaborazione di GPR-slices. Si rimanda dunque al *Dataset* MOD per la consultazione dei dati grezzi ricavati dalle misurazioni GPR in questo settore dell'*hortus*.

## Area 4

L'area 4 è un rettangolo di circa  $28 \times 25$  m<sup>2</sup> ed è stato investigato con profili paralleli distanziati di 1 m sia lungo l'asse X e sia lungo l'asse Y. La possibilità di mantenere un doppio orientamento (ortogonale) dei profili ha incrementato la qualità delle ricostruzioni 3D anche se, per contro, ha innalzato il livello del 'rumore di fondo'. In quest'area le correlazioni di anomalia più evidenti si ottengono a tre profondità poste rispettivamente a 40, 80 e 100 cm dal piano campagna. I radargrammi scelti come rappresentativi per l'interpretazione delle strutture sono invece quelli posti a  $X=11$  m e  $Y=4$  m.

Come nei casi precedenti, le anomalie principali si sviluppano nella coltre superficiale e in particolare nei due radargrammi sono state evidenziate le seguenti anomalie di propagazione:

- e. riflessioni associabili a un grande sottoservizio probabilmente in muratura e vuoto al suo interno (indicato con il rettangolo puntinato azzurro nel profilo  $X=11$  m);
- f. riflessioni associabili a strutture compatte di origine antropica (rettangoli a linea intera bianca con diversa puntinatura nei profili  $X=11$  m e  $Y=4$  m).

Le GPR-Slices corrispondenti sono quindi poste a tre diverse profondità 40, 80 e 120 cm e sembravano rivelare la presenza di strutture ben definite e complesse:

- la GPR-Slice  $Z=40$  cm (fig. 3) rivela una coerenza energetica areale della riflessione identificata dal rettangolo con puntinatura tonda piena del profilo  $X=11$  m che occupa buona parte del quadrante in alto a sinistra della slice. Inoltre, sussistono alcune correlazioni più deboli di tipo lineare;
- la GPR-Slice  $Z=80$  cm (fig. 4) mostra con evidenza l'andamento di una condotta in muratura, identificabile con il Canale del Conte di Sarno, che attraversa diagonalmente l'area indagata (rettangolo puntinato azzurro del profilo  $X=11$  m) e che mostra una evidente interruzione fra

le ascisse 12-15 m (verosimilmente riconducibile ad un crollo). Inoltre, risulta piuttosto interessante l'area di anomalia generata dai riflettori pseudo planari evidenziati dai rettangoli bianchi con quadratini vuoti nei due profili presentati. La ricostruzione 3D di tali anomalie restituisce un'area di riflessione omogenea fra le ascisse 5-25 m e limitata nettamente fra le ordinate 0-5 m. Questo tipo di anomalia può essere causata dalla presenza di uno strato di materiale più compatto disposto in maniera planare. Sebbene caratterizzata da minore intensità e coerenza, allo stesso tipo di anomalia potrebbe appartenere l'area limitata diagonalmente dalla linea gialla. A ulteriore conferma di tale ipotesi è interessante notare che i limiti energetici inferiori di tali aree (contatto fra colore rosso-marrone evidenziato dalle linee azzurra e gialla) formano un angolo di circa  $90^\circ$ ;

- la GPR-Slice Z=120 cm (fig. 5), la cui isosuperficie è stata trattata graficamente in maniera diversa dalle altre con l'obiettivo di rendere più evidenti le anomalie emerse dell'indagine in questo punto dell'hortus, consente di formulare alcune ulteriori considerazioni. La prima riguarda il canale idrico che, nello stesso intervallo di ascisse, riappare con energia notevolmente indebolita e che quindi potrebbe rafforzare l'ipotesi del crollo o cedimento. La seconda, invece, è relativa ad alcuni punti di discontinuità (cerchi tratteggiati bianchi nei due profili presentati) che non risultano altrettanto evidenti nelle restituzioni in 2D. Osservate tridimensionalmente queste anomalie delimitano in modo lineare un'area rettangolare piuttosto netta, di dimensioni  $15 \times 23$  m. L'interpretazione di tali anomalie è piuttosto incerta perché potrebbero essere associate sia a un sistema di canalizzazione di piccole dimensioni che a una delimitazione areale precedente al giardino ed eseguita con materiale lapideo. Similmente, anche l'anomalia osservabile nel rettangolo con trattini bianchi nel profilo Y=4 m possiede un'estensione areale geometricamente precisa, forse in relazione con le strutture antropiche poste ad Ovest dell'area indagata. L'interpretazione di tali anomalie potrebbe essere analoga a quella delle anomalie nel profilo Y= 4 m, sebbene in questo secondo caso le dimensioni siano leggermente superiori.

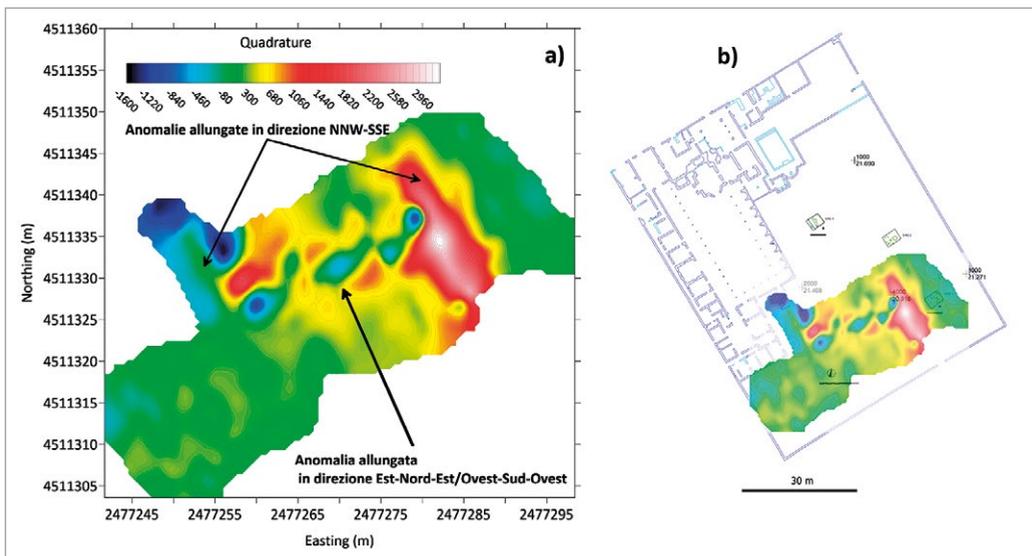


fig. 6. **a.** Mappa della quadratura di fase ( $f=9000$  Hz) delle aree 1-2-3; **b.** Sovrapposizione della mappa sulla planimetria dei Praedia.

## Planimetrie dei risultati GPR

Per completezza, le singole aree analizzate sono state assemblate e poste su un rilievo georiferito dei *Praedia* in modo da poter relazionare le mappe con le strutture fuori terra. La planimetria dei risultati delle "GPR-Slice" poste a profondità 60 cm sono state invece riportate nel *Dataset* (contrassegnato come MOD: GPR slice 60 cm PRAEDIA).

## Risultati del metodo FDEM

L'analisi dei dati FDEM ha fornito risultati attendibili solo nelle aree 1-2-3 mentre nell'area 4 la presenza di fonti di disturbo ha impedito di ottenere dati significativi ai fini dell'interpretazione.

In particolare, si notano due anomalie (fig. 6) di forma lineare, allungate, che si estendono in direzione NNO-SSE, e un'anomalia composta di forma allungata, che si sviluppa invece lungo la direttrice ENE/OSO. Sebbene caratterizzate da intensità e coerenza diverse, queste anomalie sembrano appartenere a un unico sistema che potrebbe essere relativo a uno scarico di acque.

## Conclusioni e interpretazione dei dati

I dati geofisici acquisiti, in generale, si sono dimostrati di buona qualità. La sovrapposizione delle singole tecniche sembra confermare la presenza di strutture e servizi inerenti alla gestione idrica, sebbene non sia sempre facile definire un orizzonte cronologico per tali apprestamenti.

La sovrapposizione pressoché perfetta delle anomalie GPR, MAG e FDEM nell'area 1-2-3 sembra suggerire la presenza di un sistema di gestione delle acque costituito da tubature (non metalliche) e canalette in muratura ancora in buono stato (fig. 7). Sulla possibile natura e cronologia di simili apprestamenti non è al momento possibile formulare ipotesi attendibili e solo la ricerca archeologica potrà stabilire l'esatta fisionomia di tali anomalie.

Altrettanto significativa è la sovrapposizione della mappa magnetica ottenuta dalla rielaborazione dell'area 4 (fig. 8), rappresentata questa volta in modalità di rilievo di colore, sulla 3D Slice ottenuta con il GPR e corrispondente a una profondità di circa 120 cm. Dal confronto delle differenti mappe (*Dataset*) si può osservare la sovrapposizione delle anomalie riconducibili al Canale del Conte di Sarno, che attraversa diagonalmente l'*hortus* e per il quale sembrano potersi individuare le tracce di un cedimento poco esteso al centro dell'Area 4. Nonostante la presenza del Canale fosse già nota, questo risultato conferma la validità dell'approccio geofisico multidisciplinare, pur in configurazione speditiva (Urbini et al., 2007, Sapia et al., 2017) per l'identificazione di possibili strutture archeologiche sepolte.

In conclusione, e con le dovute cautele derivanti dall'interpretazione di un'indagine indiretta e non invasiva, le prospezioni condotte nell'area dell'*hortus* dei *Praedia Iuliae Felicis* hanno permesso di ricostruire l'assetto più superficiale del sottosuolo e fornito nuove indicazioni sulla presenza di possibili strutture e sottoservizi sepolti. Le anomalie più significative sono soprattutto quelle funzionali a sistemi di irreggimentazione e gestione delle acque. Accanto all'evidente segnale relativo al Canale del Conte di Sarno, numerose altre anomalie potrebbero infatti riferirsi ad apprestamenti idrici riferibili ad età antica. A tal proposito è necessario ricordare come la seconda campagna di scavo nell'*hortus*, condotta nei mesi di settembre-ottobre 2020, e dunque dopo l'invio del presente contributo, abbia individuato consistenti resti di sistemi di raccolta e gestione delle acque localizzati nel settore occidentale del giardino. Pur in attesa di ulteriori indagini volte a chiarire la natura e successione cronologica di tali resti, nonché il loro rapporto con il complesso dei *Praedia* e con la rete idrica cittadina, non si può escludere che essi siano da mettere in connessione con le anomalie evidenziate nelle Aree 1 e 2.

Altrettanto significativa è l'apparente assenza di anomalie chiaramente riferibili a strutture murarie sepolte, in qualche modo collegabili ai resti di tronconi murari individuati da C. Parslow nel corso degli anni '90 dello scorso secolo nel settore ora definito come Area 4.

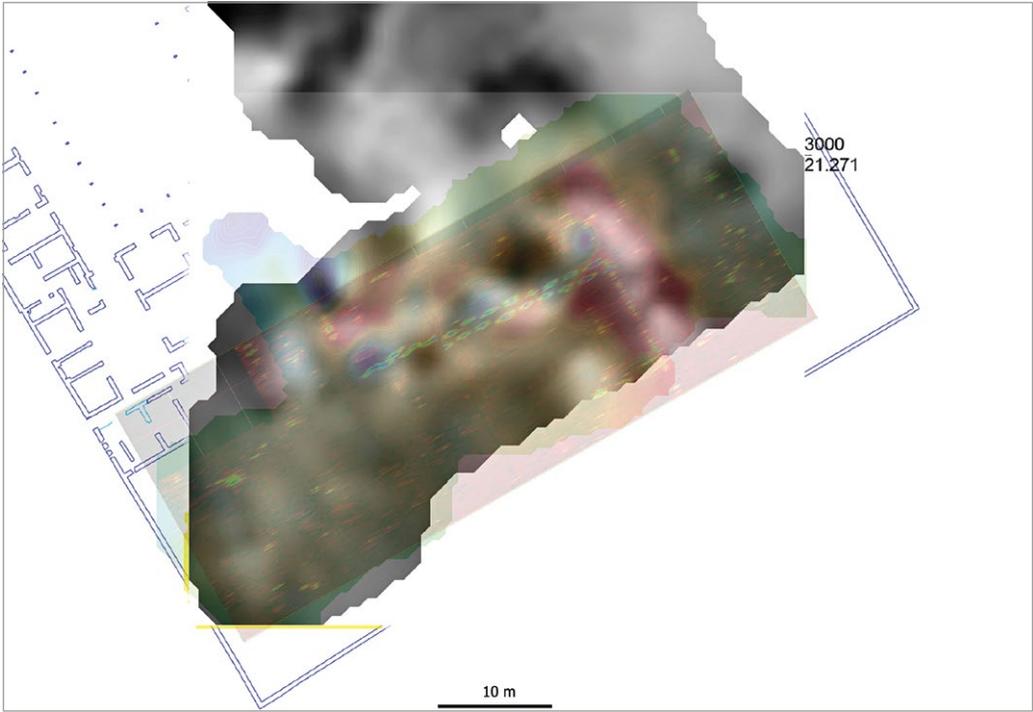


fig. 7. Sovrapposizione dei risultati ottenuti tramite metodi diversi (GPR, MAG, FDEM) nelle aree di indagine 1-2-3.

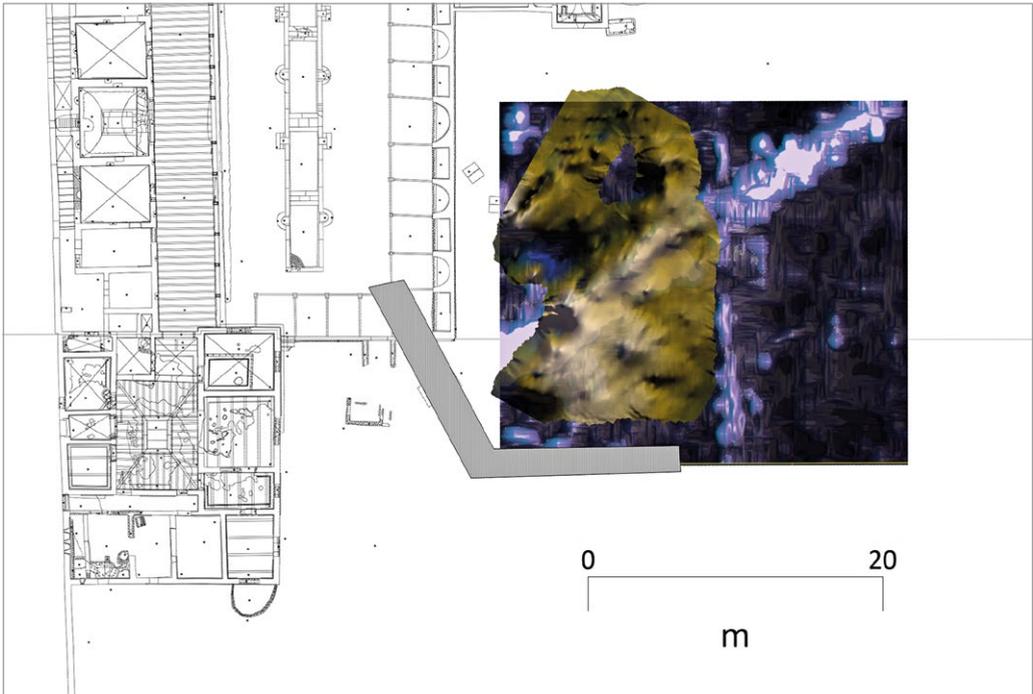


fig. 8. Sovrapposizione dei risultati ottenuti con tecnica magnetica e radar nell'area 4.

In realtà, lo scavo condotto nell'estate del 2019 in prossimità dei saggi Parslow ha in parte intercettato i resti di alcune strutture orientate in direzione Nord-Sud (Anguissola & Olivito, 2020; Olivito & Taccola, in press) – dati, a quanto pare, confermati dalle evidenze restituite dalla campagna di scavo 2020. Esse, tuttavia, versavano in condizioni assai lacunose, essendo state spoliate già in antico. Ciò potrebbe dunque spiegare l'apparente assenza nei risultati forniti dalle indagini geofisiche.

Alla luce di tali considerazioni, l'importanza delle indagini non invasive nell'*hortus* dei *Praedia* risulta significativa sotto una duplice prospettiva. In primo luogo, tali misurazioni hanno dimostrato la propria efficacia nell'individuare anomalie e resti riferibili ad un complesso sistema di gestione e collezione delle acque provenienti dai settori abitativi e dall'area a Nord del giardino (occupata, in effetti, da un esteso settore termale e da vasche decorative e per la balneazione). In secondo luogo, esse hanno consentito di pianificare in maniera più accurata gli interventi di scavo stratigrafico, permettendo di evitare possibili fonti di disturbo (ad es. il Canale del Conte di Sarno) e di concentrare le energie in settori più promettenti e significativi, con un conseguente risparmio di forze ed un più proficuo risultato in termini di acquisizione dati.

## Bibliografia

- Aitken, M.J. (1958). Magnetic Prospecting I.I. The Water Newton Survey. *Archaeometry*, 1(1), 16-20.
- Anguissola, A., & Olivito, R. (2020), Il Progetto Pompeian Residential Architecture. Environmental, Digital and Interdisciplinary Archive (PRAEDIA). Indagini nel giardino dei Praedia di Iulia Felix (Pompei II, 4), In A. Anguissola, M. Iadanza, & R. Olivito (a cura di), *Paesaggi domestici. L'esperienza della natura nelle case e nelle ville romane. Pompei, Ercolano e l'area vesuviana (Atti del convegno internazionale di studi, Pompei, 27-28 Aprile 2017)* (pp. 181-192). *Collana di Studi del Parco Archeologico di Pompei*, L'Erma di Bretschneider.
- Annan, A.P., & Cosway, S.W. (1992). Ground Penetrating Radar Survey Design. *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 1992* (329-351). SAGEEP'92, Oakbrook, IL, April 26-29, 329-351. <https://doi.org/10.4133/1.2921946>
- Basile, V., Carrozzo, M.T., Negri, S., Nuzzo, L., Quarta, T., & Villani, A.V. (2000). A Ground-Penetrating Radar Survey for Archaeological Investigations in an Urban Area (Lecce, Italy). *Journal of Applied Geophysics*, 44(1), 15-32. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(99\)00070-1](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00070-1)
- Belshé, J.C. (1957). Recent Magnetic Investigations at Cambridge University. *Advances in Physics*, 6(22), 192-193. <https://doi.org/10.1080/00018739700101561>
- Boschi, F. (2020), *Archeologia senza scavo. Geofisica e indagini non invasive*, Bononia University Press.
- Bottari, C., Aringoli, D., Carluccio, R., Castellano, C., D'Ajello Caracciolo, F., Gasperini, M., Materazzi, M., Nicolosi, I., Pambianchi, G., Pieruccini, P., Sepe, V., Urbini, S., & Varazi, F. (2017). Geomorphological and Geophysical Investigations for the Characterization of the Roman Carsulae Site (Tiber Basin, Central Italy). *Journal of Applied Geophysics*, 143, 74-85. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.03.021>
- Brizzolari, E., Ermolli F., Orlando, L., Piro, S., & Versino, L. 1992. Integrated Geophysical Methods in Archaeological surveys. *Journal of Applied Geophysics* 29(1), 47-55. [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(92\)90012-A](https://doi.org/10.1016/0926-9851(92)90012-A)
- Cardarelli, E., Fischanger, F., & Piro, S. (2008). Integrated Geophysical Survey to Detect Buried Structures for Archaeological Prospecting. A Case-History at Sabine Necropolis (Rome, Italy). *Near Surface Geophysics*, 6, 15-20. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2007027>
- Conyers, L.B. (2004). *Ground Penetrating Radar for Archaeology*. Alta Mira Press.
- David, A., Linford, N., Linford, P., Martin, L., and Payne, A. (2008). *Geophysical Survey in Archaeological Field Evaluation*, 2nd edn. English Heritage.
- Di Mauro, D., Alfonsi, L., Sapia, V., & Urbini, S. (2014). A Neighborhood Revealed by Geophysical Prospection: An Example of Urbanization at the Phoenician-Punic Settlement of Mozia (Western Sicily, Italy). *Journal of Applied Geophysics*, 104, 114-120. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.02.021>
- Francesse, R.G., Finzi, E., & Morelli, G. (2009). 3-D High Resolution Multi-Channel Radar Investigation of a Roman Village in Northern Italy. *Journal of Applied Geophysics*, 67, 44-51. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2008.09.004>
- Ghezzi, A., Schettino, A., Pierantoni, P.P., Conyers, L., Tassi, L., Vigliotti, L., Vigliotti, L., Schettino, E., Melfi, M., Gorrini, A.E., & Boila, P. (2019). Reconstruction of a Segment of the UNESCO World Heritage Hadrian's Villa Tunnel Network by Integrated GPR, Magnetic-Paleomagnetic, and Electric Resistivity Prospections. *Remote Sensing*, 11, 1739. <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/15/1739>
- Goodman, D., Nishimura, Y., & Rogers, J.D. (1995). GPR Time Slices in Archeological Prospection. *Archaeological Prospection*, 2, 85-89. [https://doi.org/10.1002/1099-0763\(199506\)2:2<85::AID-AR-P6140020204>3.0.CO;2-%23](https://doi.org/10.1002/1099-0763(199506)2:2<85::AID-AR-P6140020204>3.0.CO;2-%23)

- Harris, J.R., Viljoen, D.W., & Rencz, A.N. (1999). Integration and Visualization of Geoscience Data. In A.N. Rencz, *Remote Sensing for the Earth Sciences* (307-354). J. Wiley & Sons, Am. Soc. Photog. & RS, 3
- Keay, S., Earl, G., Hay, S., Kay, S., Ogdan, J., & Strutt, K.D. (2009). The Role of Integrated Geophysical Survey Methods in the Assessment of Archaeological Landscapes: the Case of Portus. *Archaeological Prospection*, 16(3), 154-166. <https://doi.org/10.1002/arp.358>
- McNeill, J.D. (1980). *Electromagnetic Terrain Conductivity Measurement at Low Induction Numbers*. Technical Note TN-6, Geonics Limited, 1745 Meyerside Drive, Unit 8, Mississauga.
- Olivito, R. & Taccola, E. (in press). Il Pompeian Residential Architecture. Environmental, Digital and Interdisciplinary Archive (PRAEDIA) a Pompei. Risultati della campagna di scavo 2019 e prospettive future. *ΑΓΩΓΗ. Atti della Scuola di Specializzazione in Beni Archeologici Università di Pisa*.
- Parslow, C.C. (1998). Preliminary Report of the 1997 Fieldwork Project in the *Praedia Iuliae Felicis* (Regio II. 4). *Rivista di Studi Pompeiani*, 9, 199-207.
- Pettinelli, E., Barone, P.M., Di Matteo, A., Mattei, E. & Lauro, S.E. (2011). Mapping the Undiscovered Ruins of Pompeii (Naples, Italy) Using Ground Penetrating Radar. *Archaeometry* 54(1), 203-212. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2011.00599.x>
- Piro, S. (2007). Indagini georadar nell'insula del centenario (Pompei). In S. Santoro (a cura di), *Pompei. Insula del centenario (IX, 8)*. Vol. 1: *Indagini diagnostiche geofisiche e analisi archeometriche* (pp. 51-62), Studi e Scavi del Dipartimento di Archeologia, n.s., 16, Vesuviana, 1, Ante Quem.
- Piro, S., Mauriello, P., & Cammarano, F. (2000). Quantitative integration of geophysical methods for archaeological prospection. *Archaeological Prospection*, 7(4), 203-213. [https://doi.org/10.1002/1099-0763\(200012\)7:4<203::AID-ARP133>3.0.CO;2-T](https://doi.org/10.1002/1099-0763(200012)7:4<203::AID-ARP133>3.0.CO;2-T)
- Piro, S., Goodman, D., & Nishimura, Y. (2001). High Resolution Ground Penetrating Radar Survey at Forum Novum-Vescovio: Studying Urbanism in the Tiber Valley. *Journal of Roman Archaeology* 14, 59-79.
- Robinson, D.A., & Friedman, S.P. (2003). A Method for Measuring the Solid Particle Permittivity or Electrical Conductivity of Rocks, Sediments, and Granular Materials. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(2076-B2), 1-9. <https://doi.org/10.1029/2001JB000691>
- Sapia, V., Florindo, F., Marchetti, M., & Di Nezza, M. (2017). Fast Geophysical Prospection to Map the Archaeological Site of Cocciano: Preliminary Results. *Annals of Geophysics*, 60, 1-7. <https://doi.org/10.4401/ag-7406>
- Shi, Z, Yu, T, Shi, M. (2020). Investigate the Layout and Age of a Large-Scale Mausoleum in Hangzhou, China Using Combined Geophysical Technologies and Archaeological Documents. *Archaeological Prospection* 27(4), 301-313. <https://doi.org/10.1002/arp.1774>
- Smriglio, F., Papale, E., Verga, F., Piro, S. (2020). Noninvasive Geophysical Integrated Survey at *Madonna del Giglio* (Sabine necropolis, *Magliano Sabina*, Latium, Central Italy). *Archaeological and Anthropological Sciences*, 12(3), 1-12 (2020). <https://doi.org/10.1007/s12520-020-01029-x>
- Urbini, S., Bottari, C., Marchetti, M., & Cafarella, L. (2011). The Tres Tabernae Archeological Site (Cisterna di Latina, Italy): New Evidence Revealed Through an Integrated Geophysical Investigation. *Annals of Geophysics*, 53(5-6), 43-49. <https://doi.org/10.4401/ag-4775>
- Urbini, S., Cafarella, L., Marchetti, M., Chiarucci, P., & Bonini, D. (2007). Fast Geophysical Prospecting Applied to Archaeology: Results at «Villa ai Cavallacci» (Albano Laziale, Rome) Site. *Annals of Geophysics*, 50(3), 291-299. <https://doi.org/10.4401/ag-4430>
- Weymouth, J.W., & Huggins R. 1985. Geophysical Surveying of Archaeological Site. In G. Rapp & J.A. Gifford (Eds.), *Archaeological Geology* (191-236). Yale University Press.
- Wynn, J.C. (1986). A Review of Geophysical Methods Used in Archaeology. *Geoarchaeology*, 1(3), 245-257. <https://doi.org/10.1002/gea.3340010302>
- Yuan, B., Liu, S., & Lu, G. (2006). An Integrated Geophysical and Archaeological Investigation of the Emperor Qin Shi Huang Mausoleum. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 11(2), 73-81. <https://www.researchgate.net/deref/http%3A%2F%2Fdx.doi.org%2F10.2113%2FJEEG11.2.73>