

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DEL MOLISE



DIPARTIMENTO DI SCIENZE UMANISTICHE, SOCIALI E DELLA  
FORMAZIONE

DOTTORATO DI RICERCA IN  
INNOVAZIONE E GESTIONE DELLE RISORSE PUBBLICHE  
CURRICULUM: PATRIMONIO CULTURALE E SVILUPPO DEL TURISMO  
XXIX CICLO

SETTORE SCIENTIFICO DISCIPLINARE: ICAR/10

***Integrazione di indagini geofisiche, dati satellitari e  
tecniche di rilievo 3D presso il sito archeologico di  
Egnazia.***

COORDINATORE

Chiarissimo Professore Massimo Franco

TUTOR

Chiarissimo Professore Agostino Catalano

DOTTORANDO

Dott. Gentile Vincenzo

Matricola: 151591

## **INDICE**

<b>INTRODUZIONE</b> .....	pag. 4
<b>CAPITOLO 1 - IL TELERILEVAMENTO</b> .....	8
1.1 Ripresa del dato: piattaforme da ripresa.....	12
1.2 Sensori attivi e passivi.....	13
1.3 Principali satelliti attivi ad alta risoluzione per l'osservazione della Terra.....	16
1.3.1 Satelliti Landsat TM (Thematic Mapper).....	17
1.3.2 Satelliti Spot (Système Probatoire d'Observation de la Terre).....	18
1.3.3 Satelliti con strumentazioni radar.....	20
1.3.3.1 Ers-1 e Ers-2.....	21
1.3.3.2 Envisat.....	22
1.3.3.3 Jeres-1.....	23
1.3.3.4. Radarsat.....	23
1.3.4 Missioni radar su space shuttle.....	24
1.3.5 Satelliti commerciali.....	25
1.3.5.1 IKONOS.....	25
1.3.5.2 QuickBird.....	26
1.3.5.3 Eros.....	28
1.4 Elaborazione delle immagini digitali.....	29
1.4.1 Pre-elaborazioni.....	30
1.4.1.1 Correzione radiometrica.....	30
1.4.1.2 Correzione atmosferica.....	30
1.4.1.3 Correzione geometrica.....	31
1.4.1.4 Rapporto segnale/rumore e tecniche di trasformazione MNF...	32
1.4.1.5 Tecniche di miglioramento del contrasto.....	33
1.4.2 Trasformazioni su banda singola.....	35
1.4.3 Trasformazioni multispettrali.....	36
1.4.3.1 Colour composite.....	36
1.4.3.2 Indici di vegetazione normalizzato (NDVI).....	36
1.4.3.3 Fusione di dati pancromatici e multispettrali (Pan-sharpening)	37
1.5 Telerilevamento in archeologia.....	37
<b>CAPITOLO 2 – METODI DI PROSPEZIONE GEOFISICA</b> .....	41
2.1 Il metodo elettromagnetico.....	45
2.1.1 Strumentazione utilizzata per il rilievo elettromagnetico, procedure di acquisizione ed elaborazione dei dati.....	49

2.2 Il Ground Penetrating Radar (GPR).....	54
2.2.1 Strumentazione utilizzata per il rilievo GPR e procedure di acquisizione ed elaborazione dei dati.....	60
<b>CAPITOLO 3 – TECNICHE GEOMATICHE PER IL RILIEVO DEI BENI CULTURALI.....</b>	<b>70</b>
3.1 Il laser scanner tridimensionale.....	71
3.1.1 Strumentazione utilizzata per il rilievo laser scanner e procedure di acquisizione ed elaborazione dei dati.....	78
3.2 La fotogrammetria digitale.....	83
3.2.1 Strumentazione utilizzata per il rilievo fotogrammetrico e procedure di acquisizione ed elaborazione dei dati.....	87
<b>CAPITOLO 4 – IL PARCO ARCHEOLOGICO DI EGNAZIA.....</b>	<b>96</b>
4.1 Inquadramento storico archeologico.....	96
4.1.1 Età del Bronzo ed età Arcaica.....	97
4.1.2 Età ellenistica.....	98
4.1.3 Età romana.....	100
4.1.4 La fase tardoantica.....	102
4.2 Il telerilevamento.....	103
4.3 Le indagini geofisiche.....	105
4.3.1 Il metodo ad induzione elettromagnetica.....	106
4.3.2 Il GPR.....	107
4.4 Risultati.....	108
4.5 Il rilievo laser scanner.....	148
<b>CAPITOLO 5 – APPLICAZIONE DELLE METODOLOGIE DI STUDIO AD ALTRI CONTESTI ARCHEOLOGICI.....</b>	<b>163</b>
5.1 La città romana di Doclea (Montenegro).....	163
5.2 La fortezza di Ighram Aousser (Marocco).....	180
5.3 Sito archeologico di Tell El-Maskhuta (Egitto).....	187
5.4 Sito archeologico di Umm ar-Rasas (Giordania).....	193
5.5 Sito archeologico di Gur (Iran).....	203
<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>215</b>
<b>RINGRAZIAMENTI.....</b>	<b>218</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>220</b>

## ***INTRODUZIONE***

La ricerca da me condotta rientra all'interno di un Progetto FIRB coordinato dalla Dott.ssa Marilena Cozzolino (Università degli Studi del Molise, Dipartimento di Scienze Umanistiche, Sociali e della Formazione) in collaborazione con l'Università Aldo Moro di Bari (Dipartimento di Scienze Sociali) e il Politecnico di Bari (Dipartimento di Scienze dell'Architettura). Il progetto dal titolo "*Archeologia dei paesaggi della Puglia adriatica in età romana: tecnologie innovative per una pianificazione sostenibile e una fruizione identitaria*" ha avuto come obiettivo lo studio e la ricostruzione dei paesaggi della Puglia adriatica in età romana attraverso un approccio multi disciplinare.

La metodologia applicata in questa ricerca ha previsto un'indagine del sito campione di Egnazia su macro scala, attraverso lo studio e l'analisi della cartografia storica e moderna, di immagini aeree e satellitari multispettrali, multi temporali, multi scalari (MIVIS, QuickBird, Google Eart™) e una su micro scala, tramite l'impiego di tecniche di indagine geofisica (induzione elettromagnetica e GPR) e di rilievo tridimensionale (laser scanner).

L'insediamento di Egnazia rappresenta uno dei siti più importanti della Puglia adriatica.

Le frequentazioni più antiche del territorio sono date all'età del Bronzo (XVI secolo a.C.) e all'VIII secolo a.C. Tra il IV e il III secolo a.C. il centro si dota della prima sistemazione di tipo urbano e riceve nel secolo successivo una più articolata organizzazione, anche per quanto riguarda la viabilità. Tra l'età di Augusto e il I secolo d.C. si realizzano gli spazi e le strutture tipiche di una città romana che vengono rimodellate agli inizi del II secolo, soprattutto nella zona attraversata dalla via Traiana. Dopo la metà del IV secolo si riscontra un netto mutamento del paesaggio urbano e rurale con una spiccata vitalità fino alla fine del VI secolo. In seguito l'abitato torna a restringersi entro l'antica acropoli e perdura fino al XIII secolo.

Nel comparto già indagato<sup>1</sup> un ruolo urbanistico prioritario è svolto dalla *via Traiana*, che attraversa Egnazia in direzione Nord Ovest-Sud Est, separa le aree pubbliche, concentrate tra la strada e l'acropoli, dagli spazi residenziali e produttivi e prosegue alla volta di Brindisi, divenendo un asse di rilievo anche nell'organizzazione del territorio. Ad Est della strada, gli edifici monumentali si affiancano, senza il ricorso ad arterie secondarie, in un settore pubblico unitario.

A Ovest della strada principale, invece, le abitazioni e le aree artigianali si dispongono

---

<sup>1</sup> CASSANO *et al.* 2004; CASSANO *et al.* 2007; MASTROCINQUE 2014.

all'interno di isolati definiti da diverticoli che partono proprio dal percorso della *via Traiana*. Queste strade, orientate in senso Nord Est-Sud Ovest, si dispongono a distanza regolare che varia tra m 30,39 e m 30,94. L'andamento è regolare, anche se non ortogonale: particolarmente evidente è la deviazione di tutti i diverticoli verso Sud-Ovest nella parte meridionale del settore scavato. La spiegazione di tale assetto risiede verosimilmente nel fatto che questa maglia, riferibile alla messa in opera della *via Traiana* tra il 109 e il 114 d.C., si inserisce in un tessuto urbano già strutturato con inevitabili adattamenti, realizzati nel più generale rimodellamento urbanistico che gli scavi recenti<sup>2</sup> hanno documentato per questo periodo<sup>3</sup>. Per gli assi secondari, l'approfondimento stratigrafico in corrispondenza di due diverticoli della Traiana, uno nel settore a Sud della piazza porticata e uno oblitterato dalla basilica episcopale, ha appurato, infatti, che queste strade ricalcano percorsi più antichi, entrambi databili alla fine del II secolo a.C.. La prima sistemazione della rete stradale alla fine del II secolo a.C. trova una significativa corrispondenza con la datazione al 110 a.C. riproposta di recente<sup>4</sup> per la *via Minucia*, che potrebbe essere il decumano più antico ricalcato almeno in parte dalla Traiana e dunque si configurerebbe come l'arteria su cui è strutturato il primo sistema stradale di Egnazia.

Nonostante i numerosi interventi che si sono susseguiti negli anni, la gran parte del patrimonio archeologico di Egnazia è ancora sepolto e dunque da scoprire, documentare e valorizzare. La ricerca del mio dottorato ha avuto l'obiettivo di aumentare lo stato delle conoscenze del sito e di chiarire, attraverso una lettura più ampia, la complessa viabilità della città. La caratteristica principale della metodologia proposta è la sua non invasività. Infatti attraverso l'analisi di immagini satellitari e aeree e le indagini geofisiche, è stato possibile descrivere oggetti e strutture sepolte immersi nel sottosuolo esclusivamente attraverso misure effettuate dalla superficie. Ciò ha minimizzato l'uso di metodi intrusivi e ha ridotto al minimo l'impatto con le zone archeologiche. Inoltre l'integrazione di più metodologie ha aumentato la probabilità di successo della ricerca poiché ha fornito informazioni oggettive tramite la valutazione della convergenza di più parametri che descrivono la stessa situazione.

Questo tipo di approccio, scientifico, tecnologico ed innovativo, grazie alla collaborazione con diversi istituti di ricerca nazionali ed internazionali, è stato trasferito ed applicato in numerosi contesti archeologici localizzati in territorio internazionale e caratterizzati da peculiari condizioni geologiche e geografiche.

---

<sup>2</sup> Le indagini sono sotto la direzione scientifica di Raffaella Cassano, Dipartimento di Studi Umanistici dell'Università di Bari.

<sup>3</sup> CASSANO et al. 2007, pp. 24-25, 54-58, 69-74.

<sup>4</sup> CERAUDO 2008.

Sulla base di queste premesse il lavoro è stato strutturato nel modo seguente:

Il primo capitolo di questa tesi di dottorato è dedicato al telerilevamento. Viene fornito un inquadramento generale di tale disciplina descrivendo, in modo dettagliato, le fasi e le piattaforme di ripresa del dato (da terra, da aereo e da satellite), i tipi di sensori (attivi e passivi) e le caratteristiche principali, in termini di risoluzione, (risoluzione spaziale o geometrica, risoluzione radiometrica, risoluzione spettrale e risoluzione temporale) di questi ultimi. Vengono, inoltre, riportati i più importanti satelliti mondiali, ad alta risoluzione, utilizzati per l'osservazione della Terra, ossia, i Landsat TM (Landsat-5, Landsat-7), lo Spot (Spot-4, Spot-5), i satelliti con strumentazioni radar (Ers-1, Ers-2, ENVISAT, Jeres-1, Radarsat), le prime missioni radar su *Space Shuttle* e i principali satelliti commerciali (IKONOS, QuickBird ed Eros), descrivendo, per ognuno di questi, i principali strumenti di ripresa a bordo. Dopo aver analizzato l'acquisizione del dato si passa alla fase più delicata che riguarda l'elaborazione delle immagini digitali (su banda singola e multispettrali) e l'individuazione delle tracce archeologiche.

Il secondo capitolo illustra i principali metodi geofisici attivi e passivi utilizzabili per lo studio di siti archeologici descrivendone i vantaggi e gli svantaggi. Sulla base di tali premesse e considerati gli obiettivi di questa ricerca, sono stati scelti ed integrati due metodi con caratteristiche differenti, che possono fornire ottimi risultati in ogni tipo di ambiente, quali il metodo elettromagnetico ed il georadar. Per entrambi viene fornita una spiegazione dei principi fisici alla base dei metodi, le caratteristiche tecniche degli strumenti adoperati, le modalità di acquisizione ed elaborazione dei dati.

Il terzo capitolo è basato sulle tecniche di rilievo tridimensionale terrestre, quali il laser scanner e la fotogrammetria digitale. Di entrambe le metodologie vengono esposti in modo dettagliato e preciso sia le modalità di funzionamento, sia le caratteristiche tecniche, in termini di accuratezza e precisione, delle strumentazioni utilizzate in questo lavoro. Il capitolo, inoltre, affronta il problema della pianificazione e progettazione dei rilevamenti laser scanner e fotogrammetrici e l'articolata fase di elaborazione dei dati *step by step*.

Il quarto capitolo è dedicato al sito campione di Egnazia in cui sono applicate le metodologie descritte nei capitoli precedenti. Dopo un inquadramento storico/archeologico del sito vengono descritte le modalità di acquisizione dei dati e vengono presentati i risultati ottenuti dall'integrazione dell'analisi delle immagini aeree, satellitari e indagini geofisiche. Viene inoltre esposto l'esito del rilievo tridimensionale e le derivanti osservazioni.

Nel capitolo cinque vengono illustrati i risultati delle ricerche realizzate all'interno di cinque siti archeologici con caratteristiche geologiche/storiche differenti e con varie

problematiche da risolvere. Si tratta della città romana di Doclea (Montenegro), la Fortezza di Ighram Aousser (Marocco) e i siti archeologici di Tell El Maskhuta (Egitto), Umm ar-Rasas (Giordania) e Gur (Iran).

## ***CAPITOLO 1 - IL TELERILEVAMENTO.***

Il termine telerilevamento<sup>5</sup> (*Remote Sensing*), indica l'acquisizione a distanza di informazioni qualitative e quantitative riguardanti il territorio e l'ambiente nonché l'insieme dei metodi e delle tecniche per la successiva elaborazione ed interpretazione dei dati.

La tecnica si basa sulla raccolta di dati provenienti da superfici poste "lontano" dall'osservatore. Con il termine "lontano" si indica una distanza che può variare di qualche metro (*proximal sensing*) fino a migliaia di chilometri (*remote sensing*), come nel caso delle osservazioni effettuate dai satelliti geostazionari posti in orbita ad una distanza di 36.000 km.

Le tecniche di telerilevamento<sup>6</sup> permettono di conoscere le caratteristiche delle superfici investigate, sfruttando l'energia elettromagnetica come veicolo di trasporto delle informazioni in tutte le sue forme di interazione con la superficie della terra (emissione, riflessione, diffusione, ecc.)<sup>7</sup>.

I sensori<sup>8</sup> captano la radiazione elettromagnetica e la convertono in segnali elettrici interpretabili: l'energia elettromagnetica emessa o riflessa da ciascun elemento della superficie ripresa forma un'immagine digitale. Essa consiste nella distribuzione regolare bidimensionale di informazioni numeriche in una griglia, detta matrice, organizzata per linee e per colonne.

Ad ogni cella, il *pixel*, è associato un numero intero positivo detto numero digitale o *Digital Number* (DN) che rappresenta il valore di radianza media misurata dai sensori su una piccola area o cella ed espressa in *Watt* per metro quadro per steradiante ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ )<sup>9</sup>. I *pixel* sono in genere quadrati ed ognuno ha una propria posizione definita nel sistema di coordinate dell'immagine da una coppia di valori x e y (figura 1.1).

La radianza elettromagnetica è tra le grandezze radiometriche la più importante in quanto è

---

<sup>5</sup> Per le tecniche, i principi in generale del telerilevamento si rimanda essenzialmente a: COLWELL 1983, BRIVIO *et al* 1992, CAMPBELL 1996, JENSEN 1996, LILLESAND & KIEFER 2000, BRIVIO *et al* 2006, DESSENA & MELIS 2006, GOMARASCA 2007.

<sup>6</sup> Per i principi fisici del telerilevamento cfr. DESSENA & MELIS 2006; GOMARASCA 2007.

<sup>7</sup> CAVALLI & PIGNATTI, 2001, p. 221

<sup>8</sup> Per sensore viene inteso qualunque dispositivo capace di rilevare e registrare l'energia elettromagnetica proveniente da una scena e convertirla in informazioni disponibili a successive analisi, ad esempio sotto forma di segnale elettrico. I sensori vengono distinti in due categorie: quelli di tipo attivo in grado di produrre autonomamente l'energia elettromagnetica necessaria per riprendere la scena e quelli di tipo passivo ovvero progettati per rilevare l'energia elettromagnetica presente nell'ambiente originata da sorgenti naturali come le camere fotografiche e aerofotogrammetriche, fotocamere multispettrali.

<sup>9</sup> GOMARASCA 2007, p. 130

il mezzo che trasporta le informazioni che vengono misurate dai sensori.

		x			
		0	1	2	3
y	0	23	85	69	33
	1	230	55	87	44
	2	16	65	90	66
	3	10	130	34	97

*Figura 1.1. Matrice digitali con valori di DN.*

Quest'ultima può essere descritta come un'onda armonica che si propaga nello spazio e consiste di due campi di forza, elettrico (E) e magnetico (M), ortogonali tra loro e rispetto alla direzione di propagazione  $x^{10}$  ed è definita da:

- Lunghezza d'onda ( $\lambda$ ): corrispondente alla distanza che separa due picchi adiacenti e consecutivi dell'onda, generalmente espressa in micron ( $1 \mu\text{m} = 1$  millesimo di  $\text{mm} = 1$  milionesimo di metro) oppure nel suo sottomultiplo in nanometri ( $1 \text{ nm} = 1$  milionesimo di  $\text{mm} = 1$  miliardesimo di metro).
- Frequenza ( $\nu$ ): corrisponde al numero di picchi d'onda che passano in un dato punto in un certo intervallo di tempo, normalmente espressa in hertz (Hz) o cicli al secondo.

Il prodotto di queste due grandezze è costante e rappresenta la velocità di propagazione dell'onda (figura 1.2):

$$c = \lambda\nu \quad (1.1)$$

dove  $c$  rappresenta la velocità della luce e vale circa  $300.000 \text{ km al secondo}$  (più precisamente  $299.793 \text{ km s}^{-1}$  nel vuoto).

L'insieme continuo di tutte le onde elettromagnetiche ordinate secondo la loro frequenza e

---

<sup>10</sup> BOLZAN *et al* 2000, p.7.

lunghezza d'onda è detto spettro elettromagnetico.

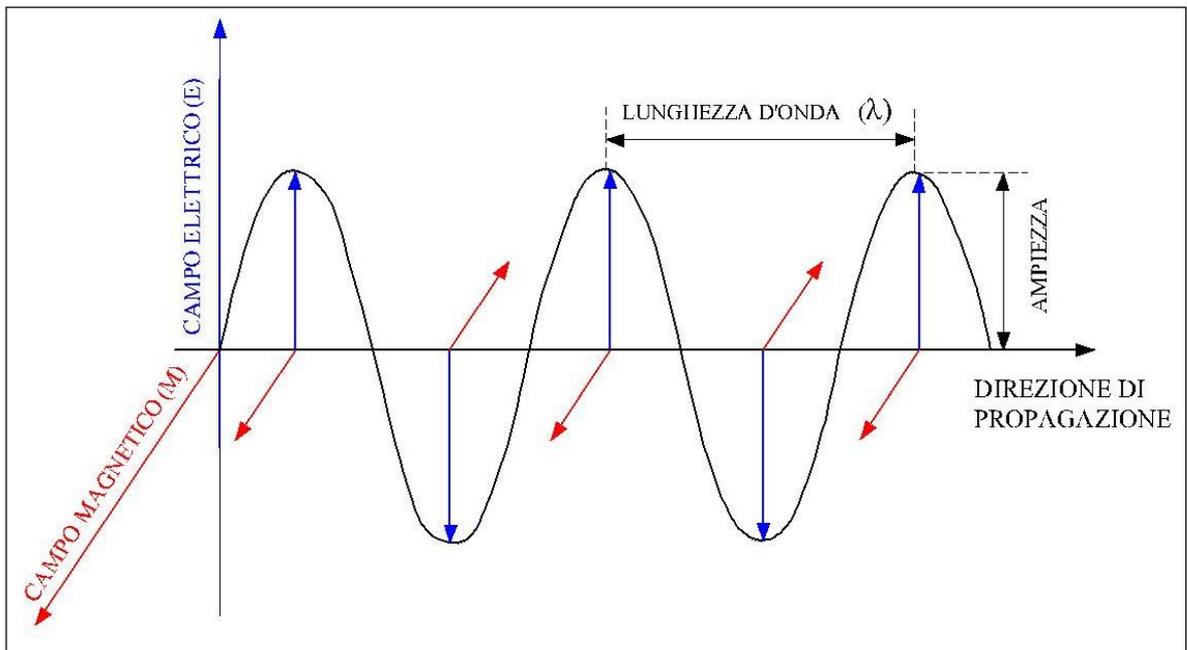


Figura 1.2. Propagazione dell'onda elettromagnetica

Esso viene rappresentato in uno schema convenzionale, suddiviso in regioni o bande spettrali a seconda della lunghezza d'onda<sup>11</sup> (figura 1.3):

- L'ultravioletto o UV:  $0.01 \div 0.38 \mu\text{m}$ , include le onde più corte poste prima del violetto, oltre il limite inferiore del visibile. Esso viene impiegato soprattutto in fotografia;
- Il visibile o VIS:  $0.38 \div 0.75 \mu\text{m}$ , è rilevato oltre che dall'occhio umano anche dai sensori fotografici e da altri strumenti. Il visibile è la sola parte dello spettro elettromagnetico che possiamo associare al concetto di colore;
- L'infrarosso o IR:  $0.7 \mu\text{m} \div 1 \text{mm}$ , invisibile all'occhio umano, viene ulteriormente suddiviso in:
  - Infrarosso Vicino:  $0.75 \div 1 \mu\text{m}$ ;
  - Infrarosso Medio:  $3 \div 7 \mu\text{m}$ ;
  - Infrarosso Lontano o Termico:  $7 \div 20 \mu\text{m}$ ;
  - Infrarosso estremo:  $20 \div 1000 \mu\text{m}$ .
- Le microonde o MW:  $1\text{mm} \div 300 \text{cm}$ . Esse hanno il vantaggio di potere essere impiegate in qualunque situazione operativa, in quanto non sono influenzate né dalle condizioni meteorologiche né dalle perturbazioni atmosferiche. Sono

<sup>11</sup> GOMARASCA 2007, p. 115.

rilevabili con strumenti sia in modalità passiva, fra 1 e 10 mm, che attiva nell'ordine dei centimetri di lunghezze d'onda. In questo ultimo caso si parla di banda *radar* (*Radio Detection And Ranging*), in quanto lo strumento impiegato in questi rilievi è un sistema radar ad immagini, nato nei primi anni del dopoguerra. Le bande radar più utilizzate sono<sup>12</sup>:

- Banda P: con frequenza compresa tra 0.22 e 0.39 GHz;
- Banda L: con frequenza compresa tra 0.39 e 1.55 GHz;
- Banda S: con frequenza compresa tra 1.55 e 4.2 GHz;
- Banda C: con frequenza compresa tra 4.2 e 5.75 GHz;
- Banda X: con frequenza compresa tra 5.75 e 10.9 GHz;
- Banda K: con frequenza compresa tra 10.9 e 36 GHz.

La qualità dei dati telerilevati è il risultato di un processo di trasferimento basato sulle specifiche tecniche degli apparati strumentali utilizzati durante le fasi di ripresa e di rappresentazione. Le specifiche di risoluzione sono tra le caratteristiche più importanti dei sistemi di osservazione, in quanto legate alla capacità di descrivere la scena rilevata in termini di risoluzione geometrica o spaziale, spettrale, radiometrica e di frequenza temporale o ripetitività del rilievo<sup>13</sup>.

Scegliere un'alta risoluzione geometrica o spettrale costringe ad una bassa risoluzione temporale, invece richiedere un'alta risoluzione radiometrica implica una scarsa risoluzione geometrica e spettrale; in genere è buona norma cercare un compromesso tra risoluzione spettrale e geometrica per garantire un buon rendimento radiometrico.

Per la produzione di carte tematiche del territorio e per la sua importanza come fonte di informazioni georiferibili, le caratteristiche fondamentali del telerilevamento sono:

- sinotticità: la visione di vaste porzioni di superficie del territorio non ottenibile con altre tecniche tradizionali;
- ripetibilità: osservazioni cicliche o periodiche di una data situazione territoriale che consentono confronti territoriali;
- aggiornabilità: continuo rinnovamento dei dati raccolti.

Il rilevamento delle informazioni si sviluppa, invece, in tre fasi:

- ripresa del dato: può avvenire da satellite, da aereo, da aeromobili a pilotaggio remoto (APR), ecc.;
- elaborazione: prevede le correzioni geometriche e radiometriche e tutte le tecniche di classificazione e filtraggio da apportare alle immagini;

---

<sup>12</sup> BOLZAN *et al* 2000, p. 10.

<sup>13</sup> Si veda paragrafo 1.2.

- interpretazione: rappresenta la fase più delicata in quanto, prevalendo l'attività umana, dipende dall'esperienza dell'operatore.

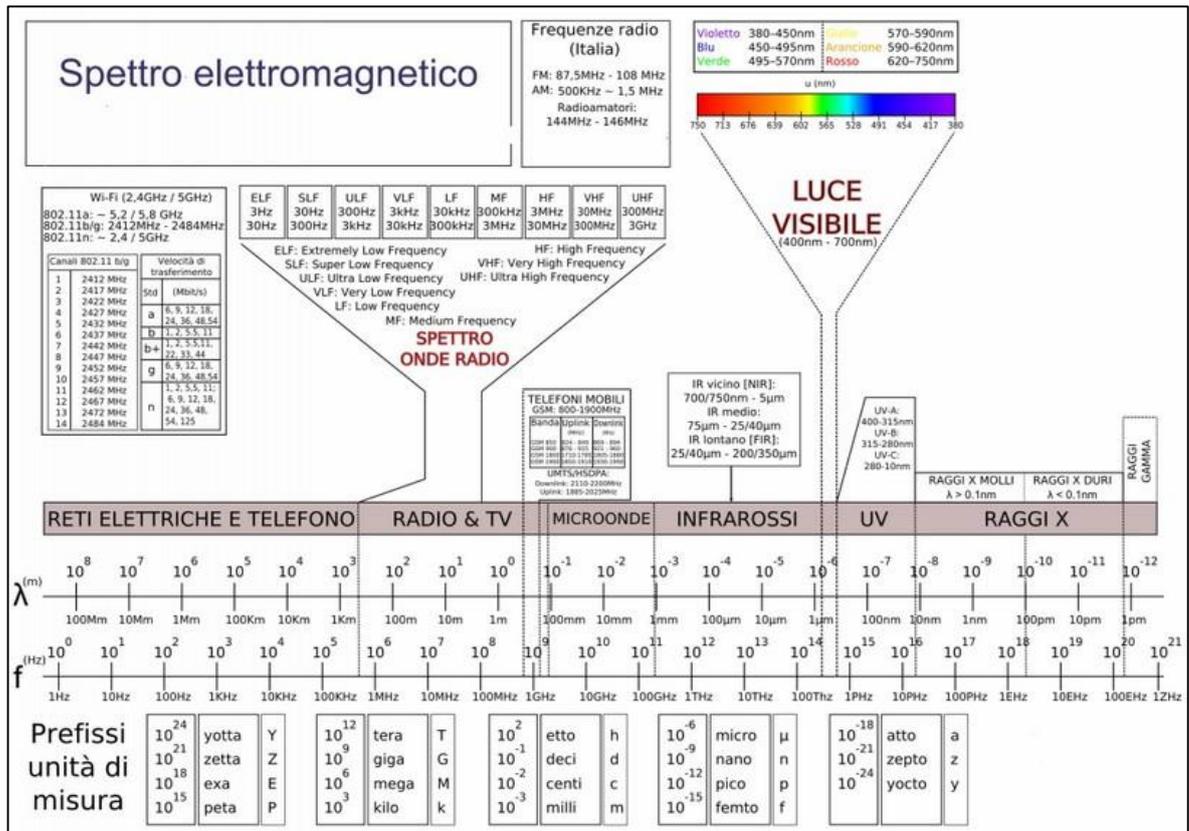


Figura 1.3. Spettro elettromagnetico (da www.didascienza.it).

### 1.1 Ripresa del dato: piattaforme da ripresa.

Le tecniche di ripresa della superficie terrestre vengono classificate a seconda della distanza da terra del sensore e dalla risoluzione geometrica che gli stessi possiedono. In base a queste caratteristiche le piattaforme o le postazioni di ripresa si dividono in tre categorie:

- Piattaforme da terra: rappresentano l'insieme dei metodi per l'osservazione a distanza mediante una strumentazione vincolata alla superficie terrestre (*proximal sensing*). L'esempio tipico è rappresentato da un veicolo con braccio mobile ed elevabile su cui è montato lo strumento per il rilevamento, capace di operare in modo nadirale fino a 15 m di altezza con un dettaglio molto alto<sup>14</sup>. Il suo limite però consiste nel fatto che il veicolo può muoversi soltanto su strade e sentieri.
- Piattaforme da aereo: consistono in aeroplani, elicotteri o palloni. L'aeroplano è il sistema maggiormente utilizzato, sia alle basse che alle medie altezze (300-5000

<sup>14</sup> GOMARASCA 2007, pp. 208-209.

m), per l'osservazione di aree limitate, sia in alta quota (fino a 20.000 m), per disporre di informazioni su aree più estese.

- Piattaforme da satellite: possono avere equipaggio a bordo o possono essere automatiche. A secondo della loro altezza e della loro inclinazione rispetto all'equatore i satelliti artificiali sono costruiti con caratteristiche diverse. I satelliti artificiali utilizzati nel telerilevamento si dividono in due categorie:
  - Satelliti geostazionari (ad alta quota): sono posizionati sul piano dell'equatore terrestre e percorrono un'orbita quasi circolare. La loro caratteristica principale è quella di viaggiare alla stessa velocità angolare della Terra, compiendo un'orbita completa in 24 ore. Essi, ad una quota di circa 36.000 km, riprendono circa 1/3 della superficie terrestre, e quindi, teoricamente, ne basterebbero solo tre per coprire tutto il globo. Lo svantaggio dei satelliti ad alta quota è rappresentato dal costo del lancio in orbita, dalla bassa definizione geometrica e dai notevoli effetti di distorsione delle immagini rilevate.
  - Satelliti polari: diversamente dai precedenti, essi seguono un'orbita ellittica e possiedono un'inclinazione di circa 90° rispetto all'equatore. Questi satelliti orbitano ad una quota di 900-1000 km e impiegano circa 100 minuti per compiere un giro completo intorno alla Terra (vengono effettuate 14 orbite al giorno). Di solito sono programmati in modo da passare sopra una data area a tempi regolari, ad intervalli di 6 o 12 ore. Tra i più importanti ricordiamo il NOAA, il Landsat e lo Spot.

### ***1.2 Sensori attivi e passivi.***

Come si è accennato, il telerilevamento fa uso di tutte le tecniche che risultano indispensabili per conoscere le caratteristiche di superfici poste a distanza dall'osservatore, senza diretto contatto con esso, sfruttando l'energia elettromagnetica (emessa o riflessa) come veicolo di trasporto delle informazioni.

Queste informazioni, che riguardano parametri come la riflettività, l'emissività, la trasmissività, il coefficiente di assorbimento, la temperatura (apparente e reale) e l'umidità, vengono acquisite e registrate da appositi strumenti di misura che prendono il nome di *sensore*.

I sensori, installati sulle diverse piattaforme, possono essere di tipo passivo (immagazzinano l'energia solare riflessa dalla superficie terrestre) o attivo (forniscono l'energia illuminando la scena da studiare).

Essi si distinguono inoltre in base alla tipologia, alla qualità di informazioni registrabili ed

al tipo di sistema di acquisizione del dato.

Tutti gli strumenti di tipo passivo sono composti strutturalmente da l'ottica (che serve a convogliare la radianza sul sensore), il *detector* (la parte sensoriale dotata di rilevatore) e il supporto di registrazione del dato.

L'ottico è compreso tra 0.3 e 15  $\mu\text{m}$  e si distingue in:

- Pancromatico: fornisce un segnale corrispondente all'intervallo del visibile e dell'infrarosso vicino e possiede una sola banda in scala di grigi.
- Multispettrale: distingue diverse bande all'interno dello spettro elettromagnetico di ampiezza variabile, in funzione del grado di discriminazione richiesto, con risoluzione spaziale o geometrica pari ad un quarto di quella pancromatica (di solito hanno tre bande nei canali del visibile e uno nel canale dell'infrarosso vicino).
- Iperspettrale: il numero di bande aumenta in maniera considerevole adattando i singoli intervalli dello spettro in modo da identificare accuratamente le firme delle differenti tipologie di copertura del suolo, con conseguente miglioramento nella discriminazione delle classi tematiche. Esso di solito possiede almeno dieci bande per arrivare, nei più evoluti sistemi, ad oltre 100 bande.

I sistemi di tipo attivo utilizzano un generatore per la produzione dell'energia e un'antenna per l'invio e per la ricezione al ritorno dell'energia elettromagnetica. Tipico strumento di telerilevamento attivo è il *radar* che acquisisce le informazioni nell'intervallo delle microonde tra 1 mm e 1 m e può operare sia su singola frequenza che su multi-frequenza.

Le caratteristiche principali che differenziano i diversi sensori sono:

- Risoluzione spaziale o geometrica: indica l'area della superficie terrestre corrispondente alla dimensione di ciascun *pixel* dell'immagine finale, vale a dire la dimensione del più piccolo particolare individuabile (figura 1.4, sinistra). La dimensione dei *pixel* influisce sulla riproduzione dei dettagli della scena ed è determinata dall'altezza del sistema di ripresa e dalle sue caratteristiche di funzionamento (in particolare dall'angolo di vista del sensore che determina l'area-impronta (*Instantaneous Field Of View, IFOV*) sulla superficie terrestre inquadrata). Un oggetto quindi per poter essere distinto nell'immagine, deve avere una dimensione uguale o maggiore rispetto alla risoluzione del sistema. Legata alla risoluzione geometrica del sistema di acquisizione è la scala di ripresa, intesa come il rapporto tra la dimensione rappresentata e quella reale.

La scala può essere determinata in vari modi in base alle dimensioni del sensore, alla sua proiezione sul suolo (*IFOV*), alla lunghezza focale del sistema ottico impiegato e all'altezza di ripresa. Una classificazione della risoluzione spaziale o

geometrica dei satelliti in orbita è esplicitata in tabella 1.1:

<b>RISOLUZIONE SPAZIALE (m)</b>	<b>CLASSE</b>
<1	ALTISSIMA
1÷5	ALTA
5÷20	MEDIA
20÷50	BASSA
>50	BASSISSIMA

*Tabella 1.1. Classi di risoluzione spaziale o geometrica*

- Risoluzione radiometrica: è la minima differenza di segnale che il sensore riesce a distinguere; in altre parole è il numero di livelli digitali utilizzati per rappresentare i dati raccolti (figura 1.4, destra). Maggiore è la risoluzione radiometrica, cioè maggiore è il numero di livelli distinguibili, più facile sarà rilevare piccole differenze nell'energia riflessa o emessa da un oggetto. Il numero di livelli discreti rilevabili da un sensore è espresso in *bit*. Quindi, con un *bit* a disposizione, ogni *pixel* dell'immagine telerilevata potrà rappresentare soltanto due livelli (bianco e nero); con 8 *bit*, risoluzione radiometrica più utilizzata, ogni *pixel* avrà a disposizione 256 livelli di rappresentazione.
- Risoluzione spettrale: è influenzata dal numero delle bande rilevate e la loro larghezza (maggiore è il numero di bande, e di conseguenza minore la loro larghezza, maggiore sarà la capacità di identificare gli oggetti ripresi in base alle loro caratteristiche di riflettanza). Il numero di bande rilevate dal sensore utilizzato differenzia il telerilevamento iperspettrale dal più comunemente utilizzato multispettrale. Con quest'ultimo vengono acquisite immagini in un numero limitato di bande distinte, ampie e solitamente non contigue. I sensori iperspettrali, al contrario, riescono a rilevare numerosi intervalli di lunghezze d'onda molto stretti e ravvicinati tra loro, quasi a realizzare l'analisi di tutto lo spettro elettromagnetico. Le immagini telerilevate multispettrali ed iperspettrali rendono disponibili tante riprese dello stesso territorio acquisite simultaneamente nelle diverse bande dello spettro elettromagnetico, tutte esattamente sovrapponibili.
- Risoluzione temporale o tempo di rivisitazione: è legata alla possibilità di ripetere le osservazioni a cadenze temporali costanti o programmabili. Questa caratteristica è un aspetto basilare che permette di avere di una stessa area diverse immagini

riprese in tempi differenti. La risoluzione dipende dal tempo che intercorre tra due passaggi successivi sulla medesima area, ed è dipendente dal tempo impiegato dal satellite per compiere un'orbita. L'intervallo temporale può variare dai pochi minuti, come nel caso dei satelliti geostazionari, alle poche ore del NOAA, fino ai 26 giorni dello SPOT<sup>15</sup>. Un altro vantaggio è la visione sinottica del territorio che risulta scarsa per i fotogrammi aerei (necessariamente a grande scala e ricoprono piccole zone) e assai elevata per le immagini da satellite (per esempio il satellite Landsat registra una porzione del territorio molto vasta (185x185 km), rendendo in tal modo possibile una rappresentazione di insieme dell'area di studio).

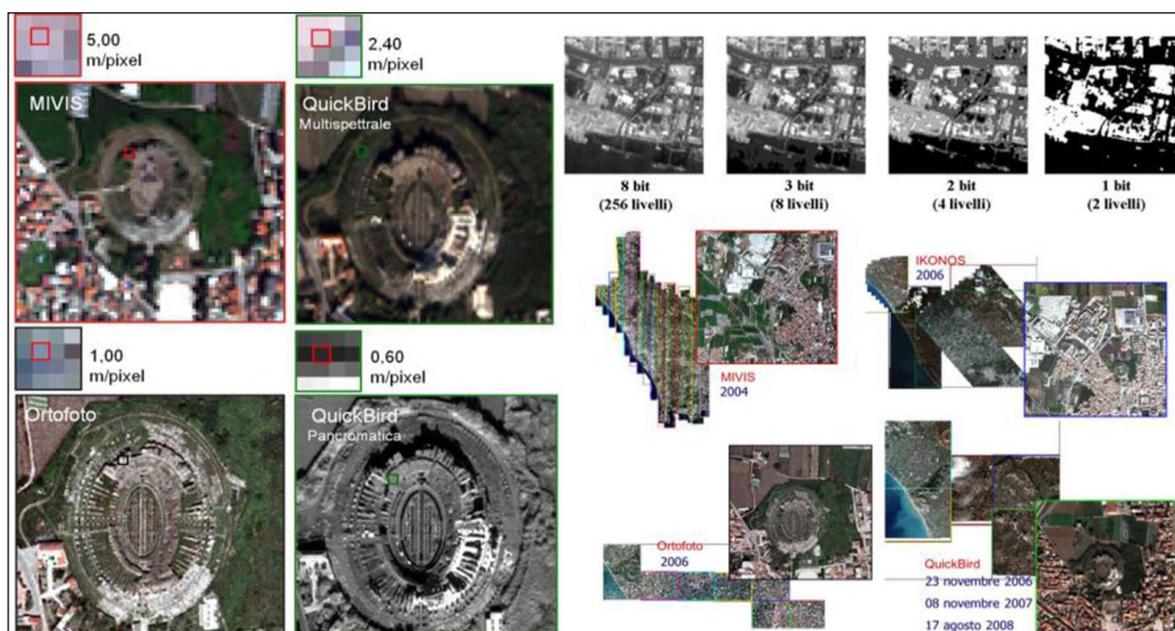


Figura 1.4. A sinistra risoluzione geometrica, a destra risoluzione radiometrica espressa in bit (da Merola 2012).

### 1.3 Principali satelliti attivi ad alta risoluzione per l'osservazione della Terra.

In astronautica con il termine satellite viene indicato ogni massa materiale messa, per opera dell'uomo, in un'orbita attorno a un corpo celeste. Con il lancio del primo satellite russo Sputnik-1 nel 4 Ottobre 1957 iniziava una nuova era per l'esplorazione e lo studio della Terra. Dopo la messa in orbita del primo satellite russo numerose furono le esplorazioni messe a punto negli anni successivi. Si ricordano: il primo volo di un satellite abitato, il Vostok-1 il 12 aprile 1961 con a bordo l'astronauta Youri Gagarin; l'arrivo di Neil Armstrong sulla luna il 21 luglio 1969 e il lancio delle sonde spaziali verso altri pianeti del sistema solare come Marte (Mars-1, Mariner-4, e Viking-1), Mercurio (Mariner-10),

<sup>15</sup> BOLZAN *et al* 2000, p. 53.

Venere (Pioneer, Venus-1), Giove e Saturno (Voyager 1 e 2).

Di seguito verranno elencati e descritti i più importanti satelliti mondiali utilizzati per l'osservazione della Terra.

### **1.3.1 Satelliti Landsat TM (Thematic Mapper)**

I Satelliti di tipo *Landsat* fanno parte di un programma spaziale della *NASA* (USA) chiamato *Earth Resources Technology Satellite (ERTS)* dedicato al monitoraggio di terre ed oceani allo scopo di mappare risorse culturali e naturali. Tra la fine degli anni '70 e la fine degli anni '90 vennero messi in orbita sette diversi satelliti.

Questi tipi di satellite operano su orbite circolari, quasi polari, posti ad altezze di circa 920 km (per quelli di prima generazione) e 705 km (per quelli di seconda generazione).

*Landsat* 1, 2 e 3 (di prima generazione) coprivano un'orbita ogni 103 minuti, completando 14 orbite al giorno e ripetendo l'intera Terra ogni 18 giorni (dotati anche di sistemi multispettrali *Return Beam Vidicon (RBV)*, dotato di 3 bande spettrali, precisamente nel verde, rosso e vicino infrarosso, con una risoluzione geometrica al suolo di 40 x 40 m.), mentre i *Landsat* di seconda generazione (4, 5 e 7) coprono un'orbita ogni 16 giorni.

Il satellite *Landsat-5* (figura 1.4) è stato lanciato nel marzo del 1984 ed è tuttora operativo. Percorre un'orbita polare circolare, eliosincrona, ad un'altezza di 705 km. L'orbita, con un'inclinazione di 98°22', viene completata in un periodo di 98,89 minuti.

A bordo del *Landsat-5* sono montati due strumenti di ripresa:

- *Multi Spectra Scanner (MSS)*: sensore opto-meccanico avente una risoluzione geometrica di 80 m per *pixel* e un'ampiezza di ripresa di 185 km. E' provvisto di 4 bande ed ha un *range* spettrale di 0,5 – 1,1  $\mu\text{m}$ .
- *Thematic Mapper (TM)*: sensore opto-meccanico avente una risoluzione geometrica di 30 m per *pixel* in luce riflessa e 120 m nell'infrarosso termico, con un'ampiezza di ripresa di 185 km. E' provvisto di 7 bande ed ha un *range* spettrale di 0,45 – 12,5  $\mu\text{m}$ <sup>16</sup>.

Dopo il fallimento del lancio *Landsat-6*, il 15 aprile 1999 è stato lanciato con successo il *Landsat-7* (figura 1.5), posizionato in un'orbita circolare, vicino-polare a 705 km di altezza. A bordo della piattaforma è stato montato un nuovo strumento di ripresa, chiamato *Enhance Thematic Mapper Plus (ETM+)*. Questo è un sensore opto-meccanico avente un'ampiezza di ripresa di 183 km, 8 bande ed un *range* spettrale di 0,45 – 12,5  $\mu\text{m}$ . Inoltre, presenta rispetto al *Thematic Mapper (TM)* due significative innovazioni: una nuova banda

---

<sup>16</sup> LECHI 2004, pp. 189–196.

in Pancromatico con una risoluzione geometrica di 15 m e una banda nell'Infrarosso Termico con una risoluzione geometrica di 60 m rispetto ai 120 m dei precedenti satelliti. In archeologia le immagini *Landsat* sono state utilizzate per l'individuazione di sistemi viari, canalizzazioni, partizioni dell'agro e la scoperta di grandi centri urbani in ambiente desertico<sup>17</sup>.



Figura 1.5. A sinistra il satellite *Landsat-5*, a destra il satellite *Landsat-7* (da [www.landsat.usgs.gov](http://www.landsat.usgs.gov)).

### ***1.3.2 Satelliti Spot (Système Probatoire d'Observation de la Terre).***

Nel 1978 il governo francese decise di dare corso allo sviluppo di un progetto chiamato *Système Probatoire d'Observation de la Terre (SPOT)*. Questi satelliti costituiscono un passo in avanti rispetto ai satelliti *Landsat TM* sia per quanto riguarda la risoluzione geometrica (10 m in pancromatico e 20 m in multispettrale), sia per le modalità operative (consentono anche l'acquisizione di immagini stereoscopiche con la restituzione 3D della superficie del Pianeta; ma operano soltanto in 3 bande (2 nel visibile e 1 nell'infrarosso Vicino). Essi sono posti in orbita eliosincrona (passando cioè su ogni zona sempre alla stessa ora), ad una quota di 832 km, con un tempo di rivisitazione di 26 giorni. La scena ripresa ha dimensione al suolo di 60x60 m in visione nadirale e 80 x 80 m in visione obliqua.

Nonostante l'incremento della risoluzione, l'applicazione di queste immagini in ambito archeologico rimane strettamente legata a studi geomorfologici e paleoambientali come nel

---

<sup>17</sup> CAMPANA & PRANZINI 2001, pp. 45-46.

caso delle immagini *Landsat TM*. L'applicazione dei prodotti stereoscopici *SPOT* vede la possibilità di creare modelli digitali del terreno che costituiscono le basi fondamentali nello studio dei paesaggi antichi e per progetti di analisi spaziale delle reti insediative.

Il primo lancio dei satelliti *SPOT* avvenne nel 1986 con il lancio del satellite *SPOT-1* che restò operativo per circa quattro anni fino alla fine del 1990. Lo *SPOT-1* fu rapidamente sostituito dallo *SPOT-2* e successivamente, nel 1993, fu messo in orbita anche lo *SPOT-3*, che smise di funzionare nel 1997 e venne sostituito dallo *SPOT-4*. I satelliti *SPOT-1*, *SPOT-2* e *SPOT-3* erano dotati di strumenti di ripresa chiamati *High Resolution Visible (HRV) Multispectral* e *High Resolution Visible (HRV) Panchromatic*. Il primo, un sensore opto-meccanico, avente un numero di 3 bande con *range* spettrale di 0.50 – 0.89  $\mu\text{m}$ , risoluzione geometrica di 20 m e un ampiezza di ripresa di 60 km. Il secondo, un sensore opto-meccanico, avente 1 sola banda (in quanto pancromatica) con *range* spettrale di 0.51 – 0.73  $\mu\text{m}$ , risoluzione geometrica di 10 m e un ampiezza di ripresa di 60 km<sup>18</sup>.

Lo *SPOT-4* (figura 1.6, destra) è stato equipaggiato con un nuovo carico strumentale rispetto ai suoi predecessori, ossia il sensore *HRVIR* acronimo di *High Resolution Visible InfraRed*. Questo tipo di sensore, rispetto al precedente *HRV* è caratterizzato dall'aggiunta di una nuova banda spettrale nell'infrarosso medio, ha una risoluzione geometrica di 20 m in multispettrale e 10 m in pancromatico con il sensore *HRV Panchromatic*.

Oltre questi due sensori, sullo *SPOT-4* è stato montato il sensore sperimentale *Vegetation*, sviluppato da Francia, Belgio, Italia, Svezia e Unione Europea all'interno del programma *Vegetation Programme*, per il monitoraggio globale della vegetazione. Questo tipo di sensore opera in 4 bande spettrali: blu (da 0,43 a 0,47  $\mu\text{m}$ ), rosso (da 0,61 a 0,68  $\mu\text{m}$ ), infrarosso (da 0,78 a 0,89  $\mu\text{m}$ ) e infrarosso (da 1,58 a 1,75  $\mu\text{m}$ )<sup>19</sup>.

Lo *spot-5* (figura 1.6, sinistra) è stato messo in orbita nel 2002 ed è attualmente attivo. Esso ha le stesse caratteristiche orbitali dei precedenti, ad eccezione dell'installazione di un nuovo sensore denominato *High Resolution Geometry (HRG)* destinato alle applicazioni di cartografia e telerilevamento. L'innovazione risiede nella sua risoluzione geometrica al suolo, di 2,5 m nel pancromatico in modalità *SUPERMODE*<sup>20</sup> e di 10 m nei tre canali del

---

<sup>18</sup> CAMPANA & PRANZINI 2001, pp. 47-48.

<sup>19</sup> LECHI 2004, pp. 213-127.

<sup>20</sup> Il processamento denominato *SUPERMODE* offre un miglioramento della risoluzione geometrica, in modalità pancromatica, da 5 m a 2.5 m, e permette anche di produrre, attraverso la combinazione con le bande multispettrali a 10 m di risoluzione, immagini a colori a 2.5 m di risoluzione. Questo processo, ideato dal CNES, Agenzia Spaziale Francese, viene effettuato in parte a bordo del satellite ed in parte a terra. Il processamento vede l'acquisizione dell'immagine, con risoluzione di 5 m, da parte di due sensori con uno sfalsamento tra di loro nel piano focale di mezzo pixel sia orizzontalmente che verticalmente. Le due immagini a 5 metri, attraverso procedimenti successivi di interpolazione producono un'immagine con 2.5 m di risoluzione effettiva. ([web.poliba.it/dvt/dispense/caprioli](http://web.poliba.it/dvt/dispense/caprioli)).

visibile e infrarosso vicino. Le bande spettrali dello *SPOT-5* sono le stesse utilizzate per lo *SPOT-4*, ad eccezione del canale pancromatico che tornerà ad utilizzare l'intervallo utilizzato nei precedenti *SPOT-1*, *SPOT-2*, *SPOT-3*, ossia di  $0,51-0,73 \mu\text{m}^{21}$ . Per quanto riguarda le modalità di acquisizione, anche qui c'è la possibilità di riprendere la superficie terrestre con visione obliqua al fine di creare modelli digitali della superficie terrestre (sensore *High Resolution Stereoscopic HRS*).



Figura 1.6. A destra il satellite *SPOT-4*, a sinistra il satellite *SPOT-5* (da [www.intelligence-airbusds.com](http://www.intelligence-airbusds.com)).

### **1.3.3 Satelliti con strumentazioni radar.**

I primi studi per il monitoraggio dell'ambiente mediante tecniche di telerilevamento spaziale con sistema radar sono stati intrapresi all'inizio degli anni '70 con il satellite *Seasat-A* che aveva l'obiettivo di monitorare le superfici degli oceani e di fornire immagini radar della superficie terrestre.

Questi tipi di satellite, al contrario dei satelliti ottici, che riprendono la radiazione solare (visibile e infrarossa) riflessa dalla superficie della Terra, sono dotati di sensori radar che investono la superficie con un fascio di microonde e ne misurano l'eco di ritorno; grazie a queste caratteristiche possono operare anche nelle ore notturne e in presenza di copertura nuvolosa.

I sistemi *radar* hanno un'antenna che illumina lateralmente alla traccia di volo in modo da poter separare, in base al tempo di ritorno del segnale, gli oggetti posti a distanze diverse.

---

<sup>21</sup> LECHI 2004, p. 216.

Inoltre tutte le immagini radar sono affette da un disturbo (*speckle*) dovuto all'interferenza del segnale riflesso che rende difficile l'identificazione dei particolari più piccoli. Per ridurre questi rumori si applicano specifici filtri passa-basso. Il sistema rivoluzionario impiegato dai radar è il *Synthetic Aperture Radar (SAR<sup>22</sup>)*.

Le vere e proprie applicazioni radar vennero effettuate con i satelliti *ERS-1*, *ERS-2* e *ENVISAT* sviluppati dall'*European Space Agency ESA*, con il satellite giapponese *JERES-1* e il satellite canadese *RADARSAT*, tutti provvisti di sistema SAR. Il limite principale del SAR, oltre la risoluzione spaziale e radiometrica, è rappresentato dalla indisponibilità di un numero adeguato di canali spettrali; il vantaggio riguarda invece le tecniche interferometriche, che permettono di misurare le quote del terreno con una precisione di 1 cm mediante acquisizioni multiple. Questo sistema è molto importante in quanto oltre a fornire accuratissimi modelli digitali del terreno, permette di tenere sotto controllo i minimi movimenti tettonici della crosta terrestre<sup>23</sup>. Altro vantaggio sta nel fatto che l'utilizzo di lunghezze d'onda centimetriche e decimetriche riescono a superare ostacoli quale la vegetazione erbacea ed arbustiva e le foglie degli alberi, riuscendo così a penetrare nel primo sottosuolo.

#### **1.3.3.1 ERS-1 e ERS-2.**

Il satellite *ERS-1* venne lanciato nel 1991 in un'orbita circolare, eliosincrona e polare, a circa 780 Km dalla terra; l'*ERS-2* (figura 1.7, sinistra), invece venne lanciato nel 1995.

Il carico strumentale di questi due satelliti è lo stesso ed è costituito da:

- *Active Microwave Instrument (AMI)* che funziona in tre modi:
  - *SAR Image Mode* per l'acquisizione di immagini sull'oceano, sui ghiacciai polari e sul suolo.
  - *SAR Wave Mode* per l'acquisizione di immagini di 5 x 5 Km sugli oceani allo scopo di valutare il moto ondoso.
  - *Wind Scatterometer Mode* per la misura della velocità e della direzione del vento al livello del mare.
- *Radar Altimetrico* per la misura accurata dell'altezza della superficie del mare.
- *ATSR (Along-track Scanning Radiometer)* per la misura della temperatura del mare, e della parte superiore delle nuvole con l'uso combinato di sensori infrarossi e microonde.
- *PRARE (Precise Range and Range-Rate Equipment)* per la determinazione esatta

---

<sup>22</sup> LECHI 2004, pp. 225-227.

<sup>23</sup> LECHI 2004, p. 225.

della posizione del satellite anche per scopi geodetici.

- *LRR (Laser Retro-Reflector)* per la misura della posizione del satellite e dell'orbita<sup>24</sup>.

Il satellite *ERS-1* ha smesso di operare nel 2000, due anni prima del lancio di *ERS-2*, dopo quasi nove anni di operatività. In termini fisici, i due satelliti dell'*ESA* pesano ciascuno 2516 kg, sono alti 11,8 m e l'antenna *SAR* misura 10 m x 1 m.

### **1.3.3.2 Envisat.**

Il satellite *ENVISAT (earth observation ENVironmental SATellite)* (figura 1.7, destra) è stato lanciato nel 2002 dalla base di Kourou nella Guyana francese. Lo scopo principale di questa missione spaziale vede lo studio e l'osservazione dell'ambiente terrestre fornendo misure di parametri atmosferici e consentendo il controllo e l'evoluzione di modifiche climatiche e ambientali.

Il satellite compie un'orbita quasi polare, eliosincrona, con altezza media di circa 800 Km e ripetizione di osservazione ogni 35 giorni. I sistemi radar che monta a bordo sono:

- *(ASAR) Advance Synthetic Aperture Radar*. È lo strumento con dimensioni maggiori presente sul satellite; ed è stato progettato per operare ad alta, media e bassa risoluzione. Si tratta di un radar ad apertura sintetica che opera di giorno e di notte. In sede i dati vengono processati con lo scopo di ottenere immagini a media risoluzione (150 m), mentre le informazioni ad alta risoluzione sono elaborate e rese disponibili per studi regionali solo su richiesta esplicita degli utenti.
- *(RA-2) Radar Altimeter 2* serve per monitorare la topografia degli oceani, ghiacci e terra solida con tre strumenti complementari per le correzioni di precisione dell'orbita (*MWR-Micro Wave Radiometer*, *DORIS- Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite* e *LRR- Laser Retro Reflector*) e due strumenti ottici che forniscono immagini (*MERIS- MEdium Resolution Imaging Spectrometer* e *AATSR- Advanced Along Track Scanning Radiometer*)<sup>25</sup>.

---

<sup>24</sup> GOMARASCA 2007, pp 245-248

<sup>25</sup> LECHI 2004, p. 227-228.

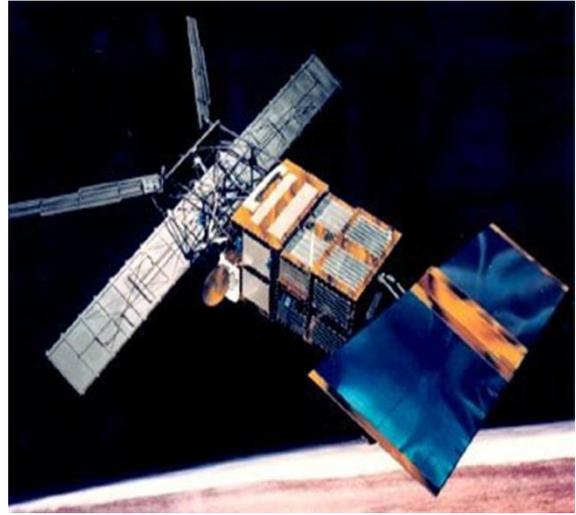


Figura 1.7. A sinistra il satellite ERS-2, a destra il satellite ENVISAT (da [www.dlr.de](http://www.dlr.de)).

#### **1.3.3.3 Jeres-1.**

Il satellite *JERES-1* (*Japanese Earth Resources Satellite*) (figura 1.8, sinistra) è stato progettato dalla *NASDA* e lanciato nel 1992 in orbita ad un'altezza di 570 Km con lo scopo di osservare la superficie terrestre tramite sensori ottici e radar. Esso presenta contemporaneamente nella medesima piattaforma due tipi di sensori: uno ottico nel visibile, infrarosso vicino e medio, l'altro radar con sensore a microonde attivo in banda L. Il *JERES-1* permette quindi l'acquisizione di dati sia ottici che *SAR*, con una risoluzione geometrica di 18 m x 24 m e un ciclo di 44 giorni<sup>26</sup>.

#### **1.3.3.4 Radarsat.**

Il primo satellite per l'osservazione della Terra *RADARSAT-1* (figura 1.8, destra) è stato lanciato nel 1995. Orbita ad una quota di 798 Km con traiettoria eliosincrona polare e ripetizione di 24 giorni. È provvisto di antenna *SAR* avente dimensioni di 15 m x 1,5 m, ed ha una risoluzione geometrica variabile da 10 a 100 m<sup>27</sup>.

<sup>26</sup> CAMPANA & PRANZINI 2003, p. 20.

<sup>27</sup> GOMARASCA 2007, pp. 264-265.



Figura 1.8. A sinistra il satellite Jeres-1, a destra il satellite Radarsat-1 (da [www.satellitetoday.com](http://www.satellitetoday.com)).

#### **1.3.4 Missioni radar su space shuttle.**

Lo *Space Shuttle* (navicella spaziale) (figura 1.9) è stato progettato per eseguire frequenti viaggi tra la Terra e un'orbita intorno ad essa. La prima navetta spaziale era la navetta *Columbia* che ha eseguito la prima missione nel 1981 e tragicamente distrutta al rientro nell'atmosfera nel 2003.

Lo *shuttle* conduce vari esperimenti nel spazio e le sue missioni sono con equipaggio a orbite di 250 – 350 Km di quota.

Il primo strumento utilizzato fin dal 1981 è stata la fotocamera ottica a grande formato a calibrazione molto precisa (denominata *Large Format Camera*), in grado di riprendere aree di 225 Km x 450 Km, ad un'altezza di 300 Km, su pellicola metrica con formato per immagine di 23 cm x 46 cm e con risoluzione fotografica su pellicola in bianco e nero di 10 m.

Dal 1981 al 1997, con *SIR-A*, *SIR-B* e *SIR C/X-SAR*, vennero effettuate numerose missioni per valutare il potenziale del radar orbitale per la costituzione di mappe geologiche. Risultati molto importanti si ebbero con *SIR-A*, grazie all'identificazione di reticoli idrografici al di sotto delle sabbie del deserto del Sahara. Anche con *SIR C/X-SAR* vennero fatte importanti scoperte soprattutto in ambito archeologico. In particolare nel sito di Angkor in Cambogia le immagini radar hanno permesso agli archeologi di individuare nuove strutture templari, parte della viabilità del sito e canali di irrigazione<sup>28</sup>.

I risultati migliori avvennero nel 2000 con una missione di tipo topografica denominata *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*, con acquisizioni di immagini

<sup>28</sup> CAMPANA & PRANZINI 2003, p. 19.

interferometriche. I dati raccolti sono serviti a produrre una mappa dell'intera superficie terrestre nell'intervallo di  $+ 60^\circ$  e  $- 56^\circ$  di latitudine. Il principio utilizzato è stato quello dell'interferometria radar con l'utilizzo di due antenne; la prima fissata sullo *Shuttle* e la seconda posizionata alla fine di un braccio meccanico una volta raggiunto l'assetto orbitale programmato. L'uso contemporaneo di due antenne consente di avere per la stessa scena due angolazioni diverse con possibilità di evidenziare la terza dimensione, ossia le altezze. I dati raccolti hanno consentito di creare un Modello Digitale della Superficie (DSM) della Terra con passo inferiore a 40 m. Il risultato di questa missione ha fornito un interessante nuovo approccio alla conoscenza delle risorse e della morfologia terrestre.

### ***1.3.5 Satelliti commerciali.***

I sistemi di telerilevamento satellitare sono stati da sempre utilizzati per programmi scientifici e militari. Durante la fine della guerra fredda i governi avevano il controllo dei satelliti per il telerilevamento e imponevano limitazioni ad una risoluzione non inferiore ai 10 m per satelliti civili di osservazione della Terra. I sistemi quasi commerciali come il *Landsat*, *SPOT*, *ERS* e *RADARSAT* sono fortemente finanziati dai governi perché i loro obiettivi sono di pubblica utilità, al contrario i satelliti commerciali sono finanziati esclusivamente dall'industria. Verso la fine del secolo scorso sono stati progettati e realizzati i primi satelliti ad altissima risoluzione geometrica per uso civile. Questi, di derivazione militare, sono stati declassificati, nel senso che le immagini da essi riprese sono state rese disponibili agli utenti. Dal 1997, infatti, sono iniziati i lanci con sensori ad alta risoluzione e la lista dei satelliti commerciali da questa data è andata sempre aumentando. Tra i satelliti commerciali più importanti ricordiamo: *IKONOS*, *QuickBird* ed *EROS*.

#### ***1.3.5.1 IKONOS.***

*IKONOS* (figura 1.10) è il primo vero satellite commerciale da telerilevamento messo in orbita nel 1999. Questo satellite rappresenta il capostipite di una nuova generazione di apparati sensoriali ad altissima risoluzione spaziale in grado di fornire una descrizione molto dettagliata della superficie terrestre.

Il satellite, molto più piccolo dei precedenti ha una massa di 720 Kg, orbita ad una quota di 680 Km secondo una traiettoria circolare, polare ed eliosincrona. Il tempo di rivisitazione è di 140 giorni, ma, grazie alla possibilità di acquisire immagini con differenti angoli di presa, è possibile riprendere la stessa zona con una frequenza compresa tra uno e tre

giorni<sup>29</sup>. *IKONOS* è equipaggiato con uno scanner multispettrale operante in 4 distinte bande (blu, verde, rosso e infrarosso vicino) con risoluzione geometrica di 4 m e in più il canale del pancromatico con risoluzione di 1 m. Fattore importante è che le bande del sensore multispettrale sono state scelte in modo da essere sovrapponibili a quelle *Landsat* 4, 5 e 7.

La risoluzione radiometrica è di 11 *bit* (2048 livelli) e rende questo satellite il più dettagliato. Infatti le immagini possiedono un livello di dettaglio senza precedenti e a questa risoluzione è possibile riconoscere automobili, strade, oleodotti, alberi singoli, case, ecc.

Le applicazioni di questi dati ad alta risoluzione sono adeguati per diversi tipi di utenti e per diverse necessità; i dati vengono utilizzati da agricoltori per monitorare la salute delle messi e stimare la produzione dei raccolti, dal Governo per le politiche di uso del territorio, dagli urbanisti per avere una base aggiornata del territorio, dalle compagnie di assicurazione per valutare i danni in caso di eventi catastrofici e dai ricercatori per valutare cambiamenti ambientali; sebbene *IKONOS* non operi nell'infrarosso più spinto è il satellite che più si avvicina a chi volesse compiere studi archeologici.

I dati possono essere restituiti con una tecnica denominata *Pan-sharpening* che combina i contenuti spaziali dei dati pancromatici a 1 m di risoluzione con il contenuto dei dati multispettrali a 4 m di risoluzione geometrica.

#### ***1.3.5.2 QuickBird.***

Nel 2000 venne lanciato il primo satellite *QuickBird-1* (figura 1.11) con una risoluzione di 0.82 m in pancromatico e 3.28 m in multispettrale, ma fu perso a causa di un guasto. L'anno successivo nel 2001, venne lanciato il *QuickBird-2* che è attualmente operativo. Questo satellite posto ad una quota di 460 Km segue un'orbita polare, eliosincrona circolare avente un'ampiezza di ripresa di 16.5 Km al nadir e periodo di passaggio sulla stessa scena di 3.5 giorni. Il carico strumentale è costituito da una camera di ripresa fornita dalla *Kodak* e due ricevitori GPS. Inoltre è dotato di un sensore pancromatico con risoluzione di 0.61 m e un sensore multispettrale composto da 4 bande (blu, verde, rosso e infrarosso vicino) con una risoluzione di 2.44 m. Anch'esso come l'*IKONOS* ha un'ottima risoluzione radiometrica, di 11 *bit*<sup>30</sup>.

---

<sup>29</sup> web.poliba.it>dv>dispense>caprioli>iltelerilevamento.

<sup>30</sup> web.poliba.it>dv>dispense>caprioli>iltelerilevamento.



*Figura 1.9. Space Shuttle (da [www.wallpaperswide.com](http://www.wallpaperswide.com)).*



*Figura 1.10. Satellite IKONOS (da [www.sateneews.com](http://www.sateneews.com)).*



Figura 1.11. Satellite QuickBird (da [www.satimagingcorp.com](http://www.satimagingcorp.com)).

### **1.3.5.3 Eros.**

Il progetto chiamato *Earth Remote Observation System (EROS)* (figura 1.12) creato dall'agenzia spaziale Israeliana, prevede la creazione di una costellazione di otto satelliti orbitanti a bassa quota ed in grado di fornire immagini ad alta risoluzione di qualsiasi punto sulla superficie terrestre con frequenza giornaliera.

I satelliti *EROS A* (A1 e A2) sono i primi ad essere stati lanciati nello spazio e orbitanti ad una quota di 480 Km. I satelliti *EROS B1/B6* sono leggermente più pesanti rispetto ai precedenti ed orbitano ad una quota di 600 km. Tutti i satelliti della costellazione hanno orbita circolare, polare ed eliosincrona, con tempo di rivisitazione ad nadir di una settimana.

Caratteristica peculiare dei satelliti *EROS* è l'innovativo sistema che consente riprese fuori nadir con differenti geometrie di presa. Diversamente dai satelliti *SPOT*, che offrono la possibilità di eseguire riprese fuori nadir grazie ad uno specchio orientabile obliquamente rispetto alla superficie terrestre, gli *EROS* adottano una soluzione completamente differente. Infatti, la presa fuori nadir è realizzata variando l'assetto del satellite in tempo reale, potendoli inclinare in qualsiasi direzione con un angolo massimo di 45°.

Il carico strumentale dei satelliti *EROS A* ed *EROS B* è differente: i satelliti *EROS A* sono

muniti di uno scanner elettronico (*Pushbroom*) a *CCD* (*Charge Coupled Device*) funzionante in modalità pancromatica nell'intervallo spettrale di 0,5 – 0,9  $\mu\text{m}$  e con una risoluzione geometrica al suolo di 1.8 m; i satelliti *EROS B*, a differenza della serie A, montano uno scanner elettronico (*Pushbroom*) di tipo *CCD/TDI* (*Charge Coupled Device/Time Delay Integration*) capace di raggiungere una risoluzione geometrica al suolo di 0.82 m e di produrre immagini chiare anche in condizioni di scarsa luminosità<sup>31</sup>.



Figura 1.12. Satellite EROS, (da [www.spacenews.com](http://www.spacenews.com)).

#### **1.4 Elaborazione delle immagini digitali.**

Con il termine elaborazione digitale delle immagine (*digital image processing*) si indica l'insieme di operazioni eseguite su un'immagine per trasformarla in modo da rendere più agevole l'estrazione di informazioni.

I dati acquisiti tramite i diversi sensori necessitano, prima di procedere con la fase interpretativa, di una fase detta pre-elaborazione. Questa fase serve per ovviare gli errori, i rumori e le distorsioni introdotti durante l'acquisizione. Gli errori più importanti a cui è sottoposta un'immagine sono di tre tipi, ossia radiometrici, atmosferici e geometrici.

Le trasformazioni applicabili alle immagini possono essere ricondotte a due gruppi:

- Trasformazioni su banda singola: riguardano algoritmi che vengono applicati in modo indipendente per ciascuna banda acquisita da un sensore e includono tutte le procedure di correzione degli errori radiometrici, quelle di modifica degli

<sup>31</sup> [web.poliba.it/dvt/dispense/caprioli/iltelerilevamento](http://web.poliba.it/dvt/dispense/caprioli/iltelerilevamento).

istogrammi, e l'applicazione di filtri.

- Trasformazioni multispettrali: vengono effettuate, a differenza delle precedenti, su più bande e hanno lo scopo di generare nuove immagini aventi un contenuto informativo maggiore e quindi, più utile in fase interpretativa.

#### **1.4.1 Pre-elaborazione.**

##### **1.4.1.1 Correzione radiometrica.**

Le correzioni radiometriche servono per eliminare due cause di errore: il cattivo funzionamento dei sensori e l'influenza dello strato di atmosfera interposto tra il sensore e la scena investigata.

Gli effetti connessi a problemi di funzionamento del sensore sono diversi:

- *Stripping*: consiste nella presenza di un effetto regolare di rigatura dovuto a cause ottico-meccaniche del sensore. Questo disturbo può essere ridotto mediante l'uso dei dati di calibrazione di bordo o con tecniche statistiche<sup>32</sup>;
- *Drop line*: talvolta alcune immagini si presentano con una o più righe completamente nere dovute a cadute di tensione o perdita di segnale del sistema. Per ovviare a questo problema si può sostituire la riga mancante con la precedente, la successiva, oppure fare una media numerica dei *pixel* vicini.
- *Diffusione atmosferica*: questo fenomeno avviene quando la radiazione interagisce con particelle che hanno dimensioni simili alle lunghezze d'onda interessate dal rilevamento. In particolare la diffusione di *Rayleigh* è una delle principali cause dell'effetto di foschia rilevabile nelle immagini da satellite influenzando in modo particolare l'intervallo spettrale del blu, mentre nel rosso e vicino infrarosso è quasi irrilevante. Tra i metodi che non prevedono misurazioni al suolo vi è la possibilità di far riferimento all'istogramma del vicino infrarosso e correggere su questo gli istogrammi delle altre bande<sup>33</sup>;
- *Effetto dell'angolo del sole*: se si vogliono analizzare immagini multitemporali o mosaicare aree acquisite in momenti diversi è necessario normalizzare tramite un algoritmo disponibile in ogni *software image processing* i dati rispetto all'angolo di illuminazione del sole<sup>34</sup>.

##### **1.4.1.2 Correzione atmosferica.**

---

<sup>32</sup> LILLESAND & KIEFER 2000, p. 537.

<sup>33</sup> GOMARASCA 1997, p. 52.

<sup>34</sup> LILLESAND & KIEFER 2000, p. 531-536.

I sensori aerei e satellitari acquisiscono immagini della superficie terrestre rilevando le onde elettromagnetiche che, partendo dal sole, raggiungono la terra attraversando l'atmosfera per poi essere riflesse verso lo spazio e finalmente colpire il sensore. Quindi il percorso del segnale prevede per ben due volte l'attraversamento dello strato di gas che circonda il nostro pianeta. In pratica lo strato di atmosfera funge da filtro alle diverse lunghezze d'onda e modifica il segnale per assorbimento e *scattering* perciò, prima di poter interpretare le immagini ottenute dai sensori, è necessario seguire le procedure di elaborazione che consentono di eliminare queste cosiddette distorsioni atmosferiche<sup>35</sup>.

Per correggere tutte queste distorsioni atmosferiche sono stati realizzati alcuni modelli matematici che trasformano il dato di radianza misurata al sensore in riflettenza alla superficie, per poi poterla comparare con le librerie spettrali disponibili in bibliografia.

#### **1.4.1.3 Correzione geometrica.**

Le immagini telerilevate presentano alcune distorsioni derivate dalla geometria dello scanner e dall'effetto delle perturbazioni che disturbano la rotta dell'aereo durante il volo. Per effettuare la georeferenziazione è necessario elaborare l'immagine grezza in modo da fare assumere ad alcuni *pixel* facilmente identificabili le corrispondenti coordinate geografiche dei rispettivi punti a terra (*Ground Control Points*, GCPs)<sup>36</sup> (figura 1.13).

Tutta l'immagine verrà poi deformata in modo da ridistribuire in modo ottimale i *pixel* presenti fra quelli di coordinate note (*warping*) senza cambiare i valori dei *pixel*, evitando di creare dei valori nuovi che potrebbero rappresentare superfici diverse.

Data la notevole quantità di immagini selezionate per questo studio, acquisite da sensori con caratteristiche spaziali differenti, è stato necessario renderle geometricamente appropriate con il sistema di riferimento prescelto. Le coordinate sono state convertite in coordinate cartografiche UTM, mantenendo come *datum* il WGS84. Le operazioni sono state realizzate utilizzando il software ENVI<sup>37</sup> (commercializzato dalla RSI Italia), lo

---

<sup>35</sup> L'assorbimento è la diminuzione dell'energia delle onde elettromagnetiche che colpiscono le particelle atmosferiche, specialmente CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O e O<sub>3</sub>, mentre lo *scattering* è l'effetto di diffusione di un'onda elettromagnetica; entrambi questi fenomeni sono fortemente dipendenti dalla dimensione delle particelle e dalla  $\lambda$  dell'onda incidente. Si possono avere diversi tipi di *scattering*: se la dimensione delle particelle colpite è inferiore alla lunghezza d'onda della radiazione (è il caso dei gas atmosferici come N<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>) si parla di diffusione di Rayleigh; se la dimensione delle particelle è paragonabile alla  $\lambda$  (polvere, fumo), si parla di diffusione di Mie; se infine le particelle sono più grandi della  $\lambda$  (vapore acqueo), allora si tratta di diffusione non selettiva (DESSENA & MELIS 2006, p. 101).

<sup>36</sup> I punti di riferimento sono precisamente identificabili sull'immagine (incroci stradali, ponti, elementi morfologici) e riscontrabili sulla cartografia di riferimento.

<sup>37</sup> ENVI è un software usato per il Telerilevamento che opera su immagini satellitari in pancromatico, multispettrali, iperspettrali e radar consentendo la loro visualizzazione ed elaborazione a livelli di grigio, a colori o in falso colore; inoltre può lavorare sia con files in formato raster che vettoriale. ENVI consente la visualizzazione di svariati files tra i quali \*.evf formato proprietario del programma, \*.shp shapefile da

stesso software che è stato usato per l'analisi dei dati telerilevati. Le immagini satellitari invece vengono corrette dalle stazioni riceventi prima che i dati siano distribuiti agli utenti finali. Le accuratèzze nominali di ogni immagine risultavano, alla fine delle diverse fase di georeferenziazione, adeguate all'utilizzo della ricerca archeologica.

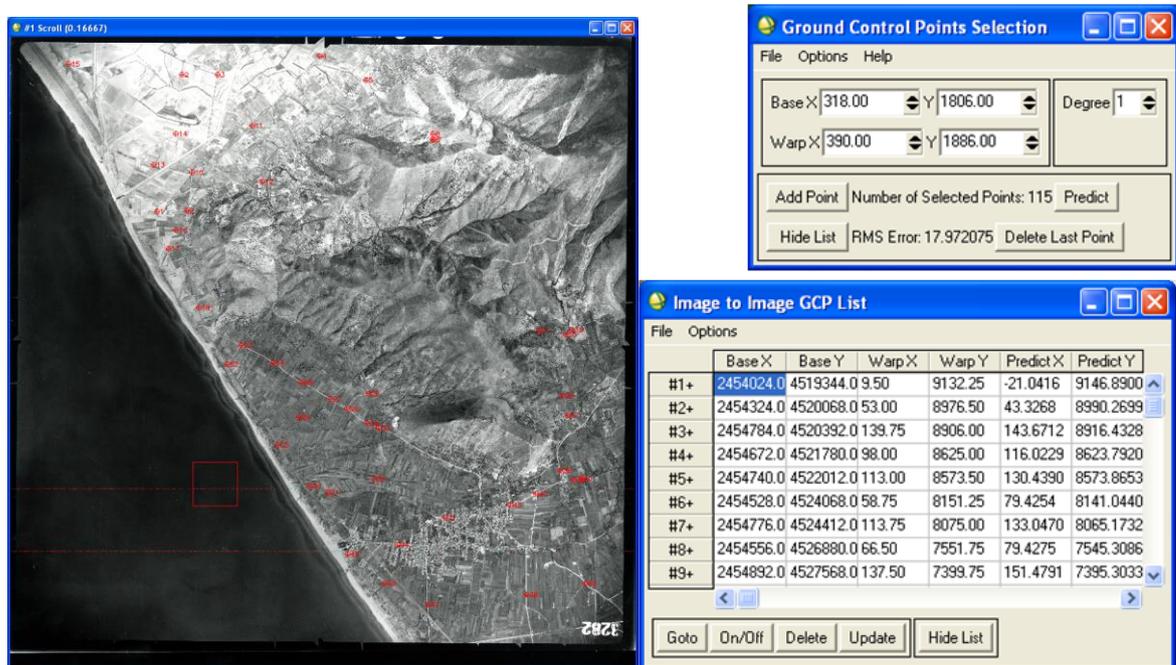


Figura 1.13. Fotografia aerea IGM del 1954 con particolare dei GCPs distribuiti uniformemente sulla scena e lista dei GCPs visibile sulla finestra Image to Image GPC List del software Envi (da software ENVI 4.5).

#### 1.4.1.4 Rapporto segnale/rumore e tecniche di trasformazione MNF.

Il rumore, presente nei dati telerilevati, riduce la possibilità di discriminare i differenti materiali presenti in una scena, in quanto causa una ridondanza dell'informazione acquisita dal sensore. Per migliorare la qualità delle immagini iperspettrali, è quindi necessario rimuovere o quanto meno ridurre il rumore di cui sono affetti i dati<sup>38</sup>. A tale scopo, ben si

---

Arcview e ArcGis, \*.dxf formato di Autocad. Il formato standard delle immagini gestito da ENVI è costituito da files a codifica binaria ai quali è associato un HEADER con codifica ASCII che presenta un'estensione del tipo .hdr con lo stesso nome dell'immagine. L'interfaccia grafica del programma consiste in una barra menù principale, la finestra per la gestione dei files, dove per ogni file aperto compaiono le bande disponibili e la loro lunghezza d'onda caratteristica, e tre finestre che mostrano l'immagine in diversa scala. Consente di visualizzare le singole bande o una rappresentazione multipla e dinamica di tre bande contemporaneamente associandole ai canali del Rosso, del Verde e del Blu creando un illimitato numero di immagine a falsi colori (FCC).

<sup>38</sup> Il rapporto segnale/rumore (*Signal to Noise Ratio, SNR*) è il rapporto tra la potenza del segnale informativo e quella del segnale indesiderato, detto appunto rumore. Ovviamente maggiore è il rapporto segnale/rumore, migliore sarà l'estrazione dei dati dalle immagini, per contro, al di sotto di un certo valore di SNR non sarà più possibile ricavare alcuna informazione (GONG 2003).

presta la tecnica di processamento nota come *Minimum Noise Fraction (MNF)*<sup>39</sup>.

I vantaggi di tale metodo sono essenzialmente quelli di aumentare la separabilità spettrale delle differenti tipologie di materiali presenti nella scena analizzata e ridurre la dimensione dei dati, condensando l'informazione in un minore numero di bande (sintetiche) rispetto al numero originale ottimizzando i tempi di elaborazione dei dati.

La trasformazione *MNF* utilizzata in questo lavoro è quella implementata nel software ENVI<sup>40</sup> ed è stata applicata sia sul *dataset MIVIS* a 102 bande che sulle bande relative ai 4 spettrometri separatamente. Tale procedura prevede che ad ogni gruppo di bande *MIVIS*, suddiviso per spettrometri (20 bande per i canali del visibile, 8 per i canali dell'infrarosso vicino, 64 per l'infrarosso medio e 10 per l'infrarosso termico) sia applicata la trasformazione *MNF*. Si è così generato un nuovo *dataset* costituito da 4 immagini *MNF*, una per ogni spettrometro, contenente un numero di bande pari al 10% circa dei risultati della trasformazione. Queste bande successivamente sono state accorpate in un unico file *MNF* contenente le informazioni originali, prive di rumore, per ogni canale dello spettro elettromagnetico.

La scelta di utilizzare i 4 spettrometri separatamente si basa sull'ipotesi di poter discriminare più efficacemente l'informazione dal rumore<sup>41</sup>.

Per quanto riguarda le immagini derivate dai satelliti commerciali le tecniche di pre-elaborazione vengono effettuate prima di mettere sul mercato il prodotto.

#### ***1.4.1.5 Tecniche di miglioramento del contrasto.***

Le tecniche di miglioramento del contrasto rappresentano spesso il primo intervento che viene effettuato sull'immagine. Questa tecnica viene utilizzata in quanto molto spesso le immagini hanno un contrasto poco marcato fra le zone a diversa luminosità, in quanto i valori effettivi dell'intensità luminosa dell'immagine occupano un intervallo troppo ristretto rispetto all'intera gamma dei valori possibili. Redistribuendo i valori di intensità luminosa, nell'istogramma, è possibile aumentare il contrasto e migliorare la qualità visiva

---

<sup>39</sup> La *Minimum Noise Fraction* consiste nell'applicazione di due analisi della Principal Component Analysis (PCA). La prima PCA, sulla base della stima di una matrice di covarianza del rumore, decorrela e riscalda il rumore nei dati. Restituisce un dataset trasformato in cui il rumore ha varianza unitaria e non vi è correlazione tra le bande. Successivamente, l'applicazione di un'analisi standard della PCA genera delle nuove bande decorrelate e l'informazione è concentrata in un numero di bande pari al 10% di quelle originali, mentre il dataset rimanente rappresenta per lo più rumore. Al termine del processamento la trasformazione restituisce un nuovo set di bande (bande MNF) e l'MNF plot. Il plot rappresenta le bande MNF ed i corrispondenti autovalori: bande con elevati autovalori (maggiori di 1) contengono informazione, quelle invece con autovalori prossimi a 1 rappresentano per lo più rumore. Il dataset finale, da utilizzare nelle successive elaborazioni, è costituito dalle bande MNF a cui corrispondono immagini spazialmente coerenti ed autovalori elevati (GREEN *et al.* 1988, pp. 65-74; AMATO *et al.* 2009, pp. 153-160).

<sup>40</sup> GREEN *et al.*, 1988.

<sup>41</sup> LEE *et al.* 1990, pp. 295-304

delle immagini.

L'istogramma è un grafico che presenta sull'asse delle ascisse la gamma delle sfumature di grigio, e sull'asse delle ordinate la frequenza con cui i valori occorrono nell'immagine stessa (figura 1.14).

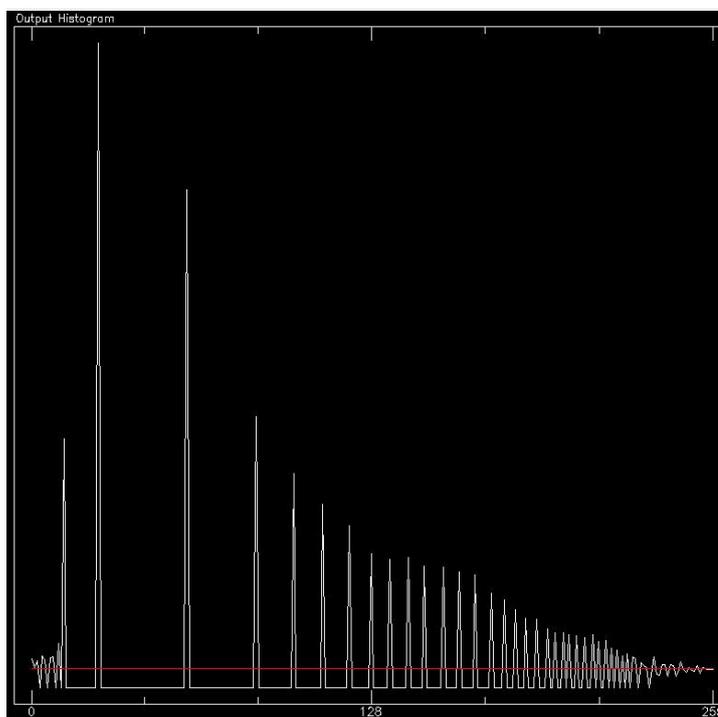


Figura 1.14. Istogramma (da software ENVI 4.5).

La tecnica più semplice e più comunemente usata prende il nome di stiramento lineare o *linear stretching*. Questa tecnica consiste nell'assegnare il valore 0 al minimo valore presente nella matrice e il valore di 255 a quello massimo e, tutti gli altri valori, in questo caso, vengono distribuiti in modo lineare tra questi due estremi.

A volte può essere conveniente stirare l'istogramma in modo non lineare, dedicando più livelli di grigio a quella parte dell'istogramma dove si addensa la maggior parte dei pixel e un numero ridotto di livelli di grigio a quelle parti dove si addensano pochi pixel. Con questa operazione avremmo una rappresentazione in cui ogni livello di grigio viene ugualmente rappresentato (equalizzazione) ed in questo caso si continueranno ad usare tutti i 256 livelli disponibili.

Poiché nel telerilevamento si trattano immagini multispettrali, ossia immagini della stessa scena ma acquisite separando la radianza secondo il contributo fornito nei diversi intervalli spettrali, accanto all'istogramma viene utilizzato lo scatterogramma o istogramma a due o più dimensioni. In questo caso gli assi cartesiani x e y rappresentano i numeri digitali DN

delle immagini, mentre l'asse z rappresenta il numero dei pixel che in una banda hanno dato un numero digitale.

Lo scatterogramma consente di analizzare la diversa firma spettrale dei singoli oggetti presenti nella scena osservata.

Un altro trattamento da applicare alle immagini è quello dell'equidensità (*density slicing*) attraverso cui l'istogramma viene diviso in fette e, a tutti i pixel compresi in uno stesso *range* di luminosità, viene attribuito lo stesso valore di DN. Questa tecnica, spesso utilizzata per la suddivisione in livelli delle immagini termiche, può risultare interessante se applicata ad immagini pancromatiche e multispettrali per raggruppare pixel aventi DN simili.

#### **1.4.2 Trasformazioni su banda singola.**

In un'immagine è possibile riconoscere variazioni di luminosità a bassa e ad alta frequenza. In questo caso è utile separare l'informazione associata a ciascuna frequenza per meglio evidenziare elementi presenti nella scena. Ad esempio, in aree con livelli di grigio più o meno simili risulta difficile distinguere piccole variazioni di luminosità, che potrebbero consentire l'identificazione di forme interessanti.

Per ovviare a questo problema vi sono delle elaborazioni che consentono di estrarre dalle immagini le componenti a bassa e ad alta frequenza, producendo poi delle nuove immagini. Queste elaborazioni sono rappresentate dall'applicazione di filtri passa basso e passa alto.

I filtri digitali sono operatori locali di convoluzione o finestre mobili che trasformano in modo lineare e localizzato le immagini permettendo di estrarre elementi caratteristici di interesse<sup>42</sup>.

Gli operatori locali agiscono sui pixel dell'immagine considerando i rapporti degli stessi (uno ad uno) con i *pixel* vicini.

I filtri passa basso hanno come effetto la riduzione del contrasto, attuando le variazioni di valore tra *pixel* contigui (*smoothing*). In questo caso si procede sostituendo a ciascun pixel dell'immagine un nuovo valore dato dalla media calcolata su una finestra di dimensioni opportune, ad esempio 3x3, 5x5, 7x7 pixel, e centrata sul pixel in questione. Tutti i nuovi valori formeranno l'immagine della componente a bassa frequenza che sarà rappresentata da un'immagine sfocata, nella quale l'occhio percepirà meglio le forme di grandi dimensioni che avranno livelli di grigio più uniformi. Sottraendo all'immagine originale

---

<sup>42</sup> GOMARASCA 2007, p. 327.

quella ottenuta con l'applicazione del filtro passa basso si ottiene la componente ad alta frequenza. Altrimenti si può attribuire a ciascun *pixel* un nuovo valore che deriverà dalla differenza fra il *pixel* centrale moltiplicato per il numero dei pixel della finestra meno 1 e la somma di tutti gli altri *pixel*.

I filtri passa alto, al contrario del precedente, esaltano le zone dove i valori subiscono bruschi cambiamenti consentendo di evidenziare allineamenti associabili ad antiche canalizzazioni, strutture, strade.

### ***1.4.3 Trasformazioni multispettrali.***

#### ***1.4.3.1 Colour composite.***

I vantaggi delle immagini multispettrali emergono quando si rappresentano più bande contemporaneamente mediante l'attribuzione dei colori blu, verde e rosso a tre di esse (R= terza banda, G= seconda banda, B= prima banda per ottenere un'immagine a colori reali; R= quarta banda, G= terza banda, B= seconda banda per ottenere un'immagine a falsi colori). Se le tre bande da rappresentare sono state rilevate nel blu, nel verde e nel rosso l'immagine che ne risulta appare degli stessi colori che apparirebbe in natura ai nostri occhi. Infatti, se l'occhio umano è capace di riconoscere solo pochi livelli di grigio (circa 20) è molto più sensibile ai colori, riconoscendone anche 8 milioni. In questo senso se abbiamo due oggetti con riflettività simile nella scala di grigio, questi non potranno essere distinti dall'occhio umano, viceversa se la stessa riflettività è visibile nelle immagine a colori, l'occhio umano distinguerà gli oggetti con più facilità.

#### ***1.4.3.2 Indici di vegetazione normalizzato (NDVI).***

L'indice di Vegetazione a Differenza Normalizzata, o Indice di Vegetazione Normalizzato espresso con l'acronimo NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*)<sup>43</sup> è un'operazione che rende possibile l'identificazione di strutture sepolte che favoriscono o inibiscono la crescita delle piante. Sapendo che la vegetazione ha una forte riflettività nell'infrarosso ed

---

<sup>43</sup> Il Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) è uno degli indici più studiati ed applicati alle immagini telerilevate. Si basa sulla differenza normalizzata dei valori di riflettività ( $\rho$ ) nelle bande dell'Infrarosso Vicino e del Rosso. Pone in relazione l'assorbimento spettrale della clorofilla nel Rosso con il fenomeno della riflessione nell'Infrarosso Vicino, influenzato dal tipo di struttura fogliare. L'NDVI è definito come il rapporto tra la differenza e la somma di due bande, rispettivamente il Vicino Infrarosso (NIR) e il Rosso (R):  $NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_R) / (\rho_{NIR} + \rho_R)$ . Questo rapporto normalizzato fornisce valori numerici adimensionali compresi tra -1 e +1. Tali valori sono in stretta relazione con lo stato di salute della vegetazione, con la biomassa vegetale, con l'indice di area fogliare (Leaf Area Index), e con i processi biochimici vegetali. I valori negativi dell'indice corrispondono all'acqua, valori prossimi allo zero ma positivi (0-0.2) corrispondono ai suoli e valori da 0.3 a 0.6 indicano la presenza di superfici vegetate con massimi intorno a 0.8 nel caso di vegetazione molto densa (GOWARD *et al.* 1991, pp. 257-277; BANNARI *et al.* 1995; GONG DAO-YI & SHI PEI-JUN 2003, pp. 2559-2566).

un elevato assorbimento nel rosso, è possibile ottenere immagini della quantità di vegetazione presente in una zona. La trasformazione consiste nella differenza fra l'immagine rilevata nell'infrarosso e quella rilevata nel rosso. La differenza viene normalizzata dividendo il risultato per la somma delle stesse due immagini:

$$NDVI = \frac{IR\ vicino - Rosso}{IR\ vicino + Rosso} \quad (1.2)$$

Con questo tipo di elaborazione possono essere create immagini dove la crescita delle piante si configura come strumento utile per l'individuazione di strutture archeologiche; in quanto, per esempio, lungo antichi solchi quali canalizzazioni o fossati, dove l'acqua ristagna nel suolo, l'erba sarà più folta, viceversa, sarà meno sviluppata in presenza di strutture murarie o pavimenti; applicando questo indice l'identificazione di queste anomalie sarà più facile e percettibile ad occhio nudo.

#### ***1.4.3.3 Fusione di dati pancromatici e multispettrali (Pan-sharpening).***

La tecnica che combina i contenuti spaziali dei dati pancromatici con i contenuti radiometrico-spettrali dei dati multispettrali è chiamata *Pan-sharpening*<sup>44</sup>.

Questa procedura consiste nel trasferimento di informazioni geometriche da immagini pancromatiche, aventi una risoluzione geometrica più alta, ad immagini ad alta risoluzione spettrale, con una risoluzione geometrica più bassa. La tecnica genera un'immagine multispettrale (composta da un numero  $n$  di bande) avente la risoluzione geometrica della pancromatica (solitamente entro 1 m). Ciò rende molto più facile l'identificazione delle anomalie in quanto mantiene le caratteristiche delle immagini multispettrali e l'alta risoluzione geometrica delle immagini pancromatiche.

### ***1.5 Telerilevamento in archeologia.***

Lo spettro di luce solare riflessa dalla terra contiene informazioni sulla composizione della superficie: il terreno coltivato, la vegetazione e tutti i tipi di suolo o di strutture hanno una propria firma spettrale distintiva, una sorta di impronta digitale, che viene registrata dal

---

<sup>44</sup>Queste tecniche per il miglioramento della risoluzione spaziale delle immagini telerilevate sono generalmente basate su algoritmi di fusione di immagini. I requisiti fondamentali sono due: 1) l'area ripresa deve essere la stessa, 2) le immagini ad alta e a bassa risoluzione spaziale devono presentare un minimo di ricoprimento spettrale, al fine di garantire un buon grado di correlazione fra esse. Spesso il secondo requisito non è rispettato, basti pensare alla fusione di immagini radar con immagini nel visibile (GARZELLI *et al.* 2004, pp. 81-84; ZHANG, 2004; YUHENDRA *et al.* 2011, pp. 12-23;

senso<sup>45</sup>.

Il principio su cui si basa il telerilevamento in archeologia<sup>46</sup> è che ogni oggetto sepolto, sia esso di natura antropica o naturale, induce nel tempo anomalie nelle caratteristiche del terreno soprastante. Queste anomalie, che prendono il nome di tracce, producono variazioni nella copertura vegetale e nel contenuto di umidità dei suoli e la loro individuazione è uno dei principali obiettivi del telerilevamento ai fini archeologici.

Tali variazioni modificano la copertura vegetale, le caratteristiche chimiche e fisiche del suolo e il contenuto di umidità dei suoli (figura 1.15).

Questi cambiamenti, che agiscono sull'assorbimento e sulla riflessione della radiazione solare e sull'emissione della radiazione termica, forniscono al fotointerprete le informazioni per individuare sulle immagini telerilevate le possibili tracce di strutture archeologiche presenti nel primo sottosuolo.

Si definisce traccia archeologica il risultato per cui un oggetto presente nel sottosuolo impressiona l'immagine, non per se stesso, ma per gli effetti che produce su taluni elementi che lo circondano e lo occultano; questi elementi, che possiamo definire di mediazione per la comparsa nel campo del visibile dell'oggetto nascosto, sono umidità, *humus*, vegetazione e rilievo, a cui vanno aggiunti alcuni fattori concettuali, come ad esempio le anomalie logiche riscontrabili talvolta nell'immagine di un paesaggio. In sintesi le tracce archeologiche si possono classificare nel modo seguente: tracce da umidità (*damp-marks*), tracce da vegetazione (*cropmarks*), tracce da alterazione nella composizione del terreno (*soilmarks*), tracce da sopravvivenza e tracce da micro rilievi (*shadow marks*)<sup>47</sup>.

Secondo la classificazione fatta dalla scuola inglese<sup>48</sup>, le principali e le più ricorrenti tracce osservabili in un'immagine telerilevata si dividono in:

- *Damp-marks*: il terreno umido può essere assimilato ad un serbatoio imperfetto in cui la presenza di elementi archeologici sepolti causa anomalie nella distribuzione idrica provocando zone ad umidità differenziata che nell'immagine avranno una colorazione diversa dal terreno "libero" circostante, risultando in genere più chiare nel caso di elementi archeologici positivi (strutture murarie) e più scure nel caso di elementi negativi (fossati, canali, ecc.). La percezione del fenomeno dipenderà dalla profondità dell'interro, che non deve essere eccessiva, dalla consistenza delle

---

45 CAVALLI *et al.* 2000, p.49.

46 Per il ruolo del telerilevamento applicato alla ricerca archeologica cfr. SHENNAN *et al.* 1992, pp. 223-232; FOWLER 1995; PICCARRETA & CERAUDO 2000; WHEATLEY & GILLINGS 2000; CAMPANA 2009; TRIPATHI 2005; CAVALLI *et al.* 2007; WISEMAN & EL BAZ 2007; KELONG, *et al.* 2008 pp. 221-224; PARCAK 2009; ORLANDO & VILLA 2011, pp. 147-168; DABAS & TABBAGH 2000.

47 PICCARRETA & CERAUDO 2000, p. 19

48 CERAUDO & BOSCHI 2009, p. 183.

strutture e dalle condizioni climatiche ed ambientali.

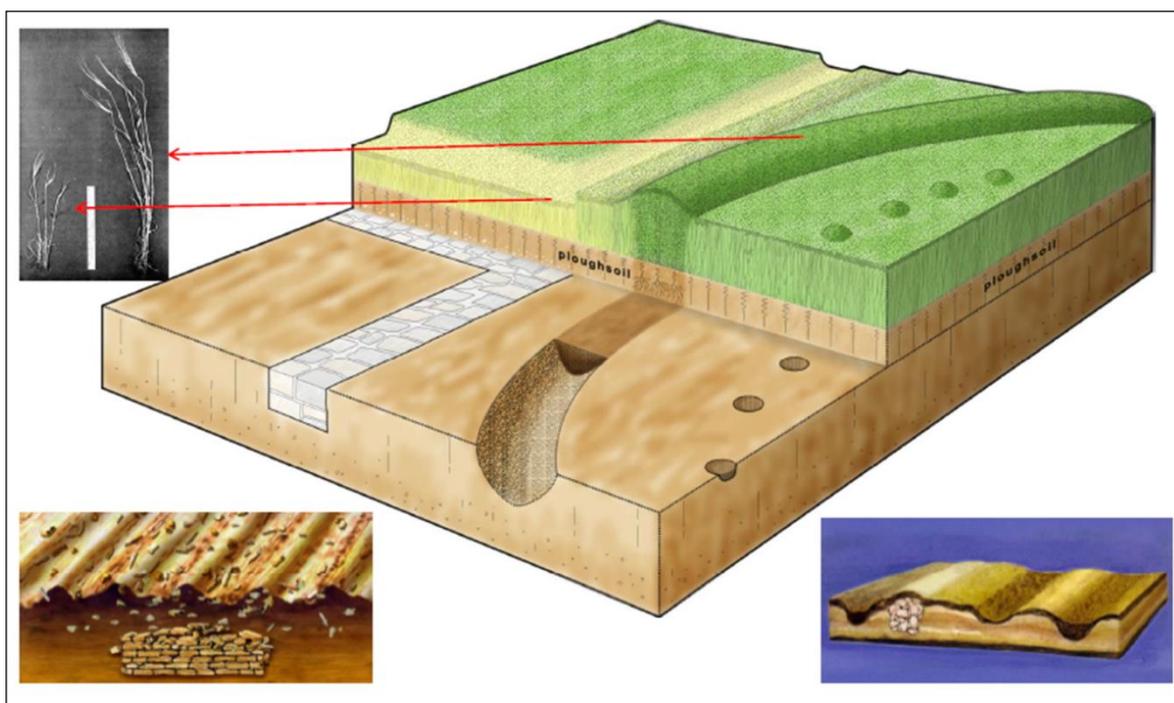


Figura 1.15. Tracce archeologiche: strutture presenti nel terreno e loro rappresentazione in superficie (da Campana *Archeologia Aerea metodi-tecnico-applicazioni*. [www.academia.edu](http://www.academia.edu)).

- *Cropmarks*: rappresentano variazioni del colore e/o della crescita delle colture agricole che possono suggerire la presenza di strutture archeologiche sepolte. Questo è un fenomeno osservabile nelle settimane precedenti la mietitura delle colture e da origine a *cropmarks* positivi e *cropmarks* negativi. La formazione di queste tracce, legato ad un meccanismo naturale, deriva dal fatto che le colture crescono più alte e rigogliose al di sopra del suolo profondo, dove hanno a disposizione più umidità e più humus, come nel caso di fossati e canalizzazioni antiche. Esse creano anomalie verdi nelle colture in fase di maturazione tendenti al giallo, perché denotano un più alto contenuto nutrizionale da attribuire ad una maggior disponibilità di umidità (*cropmarks* positivi). Al contrario, su strutture murarie, pavimenti o strade, la crescita delle colture risulta impedita, provocando la maturazione prematura della pianta e formando così anomalie di colore giallastro, rispetto al colore verde delle altre colture, in quanto hanno una minore disponibilità d'acqua (*cropmarks* negativi).
- *Soil-marks*: sono tracce da microrilievo, dove le strutture archeologiche rilevano la

propria presenza attraverso variazioni altimetriche.

- *Tracce da sopravvivenza*: rappresentano elementi archeologici che sono stati ripresi, in maniera parziale o totale, da elementi moderni, come ad esempio gli anfiteatri romani di Lucca e Venafro.

## ***CAPITOLO 2 - METODI DI PROSPEZIONE GEOFISICA.***

La geofisica è la scienza che si occupa, sotto l'aspetto fisico, della Terra e dello spazio che la circonda. La geofisica “applicata”, detta anche di esplorazione, si rivolge solamente alla parte più superficiale della crosta terrestre. Con il termine di Geofisica applicata all'archeologia si intende l'insieme di metodologie rivolte alla risoluzione di determinate problematiche inerenti al patrimonio culturale. Lo scopo principale di questa scienza è quello di individuare strutture archeologiche sepolte nel terreno e quindi non visibili ad occhio nudo sulla superficie. La prospezione geofisica, quindi, può essere considerata come una fase di investigazione da eseguire prima dello scavo archeologico in quanto aiuta a definire meglio l'area da indagare, garantendo un risparmio di tempo, denaro e forza lavoro.

Le prime applicazioni delle tecniche di indagine geofisica nel campo della ricerca archeologica risalgono agli anni '30 e '40 del Novecento. Le prime strumentazioni e le attrezzature impiegate erano complesse, ingombranti e richiedevano lunghi tempi per l'acquisizione dei dati. Le apparecchiature moderne, invece, risultano di dimensioni minori, portatili e maneggevoli; inoltre permettono la gestione e il controllo automatico delle operazioni di acquisizione dei dati e sono dotate di memorie elettroniche per l'immagazzinamento dei valori registrati. Con semplici operazioni i dati vengono trasferiti direttamente al PC per l'elaborazione e la restituzione grafica sotto forma di carte o di grafici delle informazioni raccolte in cui, dall'andamento più o meno regolare delle misure, è possibile ipotizzare la presenza di strutture archeologiche sepolte e nei casi più favorevoli è possibile valutare le direzioni e gli andamenti delle strutture stesse, fino a disegnarne la planimetria.

Numerosi sono i metodi geofisici non invasivi che possono fornire informazioni utili per il riconoscimento e la discriminazione di strutture nel sottosuolo nelle fasi precedenti a scavi archeologici diretti. Generalmente essi sono suddivisi in due gruppi: metodi attivi e passivi, distinguendo con tale terminologia due diversi modi di applicazione. Nei primi, energizzando in modo opportuno il terreno, si misurano le variazioni di alcune grandezze fisiche. Tra i metodi “attivi” ricordiamo: i sismici, che misurano le proprietà elastiche del mezzo; l'elettrico, che misura la resistività elettrica dei terreni; l'elettromagnetico, che misura la conducibilità elettrica con effetti di induzione; tra gli altri, inoltre, si segnala il georadar che misura la riflessione e rifrazione di impulsi elettromagnetici.

Tra i metodi “passivi” ricordiamo: il magnetico, che misura l'intensità del campo

magnetico terrestre, la suscettività magnetica e il magnetismo residuo delle rocce nonché il metodo gravimetrico che misura le micro variazioni della gravità legate alla distribuzione dei materiali nel sottosuolo.

Al di là del metodo di prospezione utilizzato, il procedimento di analisi geofisica si basa sul concetto di anomalia<sup>49</sup>. Generalmente, in un terreno omogeneo ed isotropo, la misura di un determinato campo fisico, sia esso geoelettrico, magnetico o elettromagnetico, genererebbe sempre lo stesso valore. Al contrario, in presenza di un corpo sepolto con caratteristiche fisiche diverse dal materiale che lo ingloba, il valore misurato tende a discostarsi dal valore imperturbato ed il campo fisico osservato assume, pertanto, quella che si definisce anomalia, ossia una variazione rispetto a quel valore di riferimento relativo ad una situazione omogenea. Dunque, sulla base dell'osservazione di queste variazioni, è possibile ipotizzare la natura e la geometria dei corpi sommersi.

Tecnicamente l'acquisizione dei dati avviene generalmente su delle linee in cui le letture strumentali possono essere eseguite in modalità continua o ad intervalli regolari. Se il bersaglio che il rilevamento deve scoprire sotto la superficie è allungato, come ad esempio una fondazione o una strada, il profilo migliore si ottiene perpendicolarmente, per quanto si possa stimare. Se il bersaglio è invece irregolare si effettuano parecchi profili paralleli formando uno schema a griglia per verificare quanto il corpo si estende nel sottosuolo oppure se cambia dimensioni. Si ottiene in tal modo una matrice 3D di dati del volume sottostante la superficie indagata dal quale vengono estratte, dopo opportuni processi matematici, delle sezioni orizzontali a varie profondità in cui vengono visualizzati i vari lineamenti strutturali sepolti che consentono di arrivare all'interpretazione archeologica. Ovviamente non sono tanto le variabili del parametro fisico a darci informazioni sugli oggetti sepolti ma le forme che si ottengono<sup>50</sup>.

Spesso le letture grezze fornite dallo strumento non sono utilizzabili direttamente a causa del cosiddetto rumore ambientale dovuto semplicemente a variazioni o fluttuazioni indesiderate delle grandezze che si stanno misurando causate da disomogeneità intrinseche del terreno, topografiche, antropiche (linee elettriche, tubazioni, o altri oggetti sepolti posteriori a quello cercato). Una procedura ottimale per migliorare la qualità dei dati e quello di acquisire un elevato numero di dati e verificare quanto ogni singola misura si discosti dal valore medio<sup>51</sup>. Una volta ottenute le misure riducendo al minimo i disturbi ambientali, queste devono essere trattate mediante un "procedimento inverso" a quello

---

<sup>49</sup> COZZOLINO 2009, p.10.

<sup>50</sup> COZZOLINO 2009, p.7.

<sup>51</sup> MUSSET & KHAN 2003.

fatto preliminarmente, cioè un procedimento che dalla misura permette di risalire al modello fisico e di qui al modello geologico o archeologico<sup>52</sup>. In tal modo la restituzione tridimensionale dei dati garantisce una maggiore fruibilità dei risultati attraverso una più chiara e facile lettura di tomografie capaci di individuare la distribuzione più probabile delle anomalie geofisiche.

La valutazione della metodologia di indagine da utilizzare è un fattore molto importante che può compromettere il risultato finale della ricerca ai fini archeologici. Tale scelta dipende da numerosi fattori: geologici, economici, logistici e fattori puramente geofisici. Le problematiche sulle quali viene interpellato il geofisico possono riguardare la ricerca di oggetti come tombe, fondazioni di edifici, fornaci, canalizzazioni, trincee, ecc. o la risoluzione di problemi legati al restauro di edifici di interesse storico come ad esempio casi in cui è necessario valutare l'entità di fratture o infiltrazioni d'acqua nelle pareti. A seconda del tipo di problema, dell'ambiente in cui si deve lavorare e del tipo di strumentazione che si utilizza viene scelta la metodologia che può portare a dei risultati migliori.

Le condizioni ottimali per la realizzazione di una prospezione magnetica si verificano quando si è in presenza di un terreno abbastanza uniforme, meglio se costituito da materiali fini e con una moderata suscettività magnetica. Condizioni meno favorevoli si hanno nei terreni sabbiosi, in superfici topograficamente irregolari, in presenza di blocchi di materiale vulcanico nelle vicinanze o un fondo roccioso irregolare poco profondo. Inoltre l'estrema sensibilità del metodo magnetometrico al ferro e ai suoi derivati comporta una serie di problemi. Se da un lato rende facile l'identificazione di oggetti di provenienza archeologica e seppelliti a piccola profondità, da un altro rende più difficile l'interpretazione quando questi sono vicini a strutture antropiche, influenzando in modo determinante il campo da esse prodotto. Questo tipo di prospezioni richiede tempi di realizzazione molto rapidi, vantaggio che però non è compensato da una eccellente risoluzione delle mappe. Per questo motivo il metodo magnetico risulta utile soprattutto nello studio di grandi aree, allo scopo di un semplice inquadramento generale del sito archeologico.

Il metodo gravimetrico può essere utile per localizzare bersagli profondi come cavità, grotte, gallerie oppure zone di forte mineralizzazione ma risulta meno efficace

---

<sup>52</sup> DE GROOT-HEDLIN & COSTABLE 1990, MAURIELLO & PATELLA 1999C, MAURIELLO & PATELLA 1999D, LOKE 2004, PIDLISECKY *et al.* 2007, MARESCOT 2008, COMPARE *et al.* 2009, MAURIELLO & PATELLA 2009.

nell'individuazione di oggetti archeologici piccoli e poco profondi<sup>53</sup>. Esso è applicato frequentemente solo per ottenere una mappatura a grande scala dei siti.

Il metodo SP è stato ampiamente utilizzato in archeologia<sup>54</sup> considerando non solo la semplicità e il basso costo dell'equipaggiamento ma anche i risultati discreti che si possono ottenere da una analisi del genere. Le anomalie osservate in corrispondenza di siti archeologici sono dovute soprattutto a fenomeni di diffusione in quanto le strutture rappresentano elementi di notevole discontinuità nel sottosuolo che influenzano la circolazione dell'acqua nel terreno agendo o da strutture di drenaggio (tombe, terreni disturbati in tempi storici da attività antropica), o da ostacolo alla normale circolazione idrica (fondazioni sepolte, resti di mura) creando delle ostruzioni. Ciò viene rilevato con la presenza di una anomalia nel campo elettrico superficiale<sup>55</sup>.

L'uso del metodo della IP nel settore dell'archeologia ha ottenuto moderati successi. Esso può essere utile per ottenere indicazioni per il riconoscimento e la definizione geometrica di corpi metallici di origine antropica così come può contribuire a valutare meglio le eventuali modifiche delle proprietà fisiche dei corpi sepolti in seguito all'interazione con l'acqua.

Il metodo del georadar fornisce sezioni ad alta risoluzione ma ha penetrazione limitata che, nel caso di rocce ad alta conducibilità come le argille, si riduce drasticamente a pochi decimetri. Esso appare particolarmente inadatto se applicato su terreni disconnessi ma risulta molto utile nello studio degli edifici storici (individuazione di fratture) o nel caso in cui si deve lavorare su superfici pavimentate: in questi casi risulta la metodologia meno invasiva<sup>56</sup>.

Il metodo elettromagnetico risente dell'umidità presente nel terreno che può ostacolare l'individuazione di oggetti posti ad elevate profondità e inoltre fornisce sezioni di resistività a bassa risoluzione. Vista la rapidità con cui viene condotta l'indagine, il metodo viene utilizzato soprattutto per avere informazioni su ampia scala del territorio che si sta analizzando.

Il metodo geoelettrico, pur avendo tempi di acquisizione meno rapidi rispetto agli altri metodi, risulta il più efficace perché fornisce risultati facilmente interpretabili, è molto versatile alle variazioni delle condizioni del terreno ed è ideale anche per l'individuazione di strutture molto profonde.

Durante la programmazione di una ricerca bisogna tener presente tutti gli aspetti appena

---

<sup>53</sup> LININGTON 1966.

<sup>54</sup> WYNN & SHERWOOD 1984, CAMMARANO *et al.* 1997.

<sup>55</sup> CAMMARANO *et al.* 1997.

<sup>56</sup> GOODMAN 1994.

discussi e l'ideale sarebbe integrare diverse metodologie, qualora le condizioni ambientali lo permettessero, in modo da poter effettuare confronti e da poter meglio individuare le anomalie geofisiche. Nel corso di questa tesi vengono discussi casi studio con problematiche diverse affrontate con il metodo elettromagnetico e il georadar: queste metodologie sono state applicate sia su singoli casi studio che in maniera integrata laddove è stato possibile.

### ***2.1 Il metodo elettromagnetico.***

I metodi elettromagnetici (EM) vengono utilizzati in molti tipi di applicazioni ambientali e geologiche ma anche in investigazioni archeologiche che riguardano gli strati superficiali del terreno per l'individuazione di strutture sepolte caratterizzate da una buona conduttività elettrica o suscettività magnetica (metalli, strutture in laterizio, strutture impregnate d'acqua ad alto contenuto salino, ecc.)<sup>57</sup>

La tecnica prevede l'induzione di flussi di corrente nel sottosuolo senza utilizzare elettrodi e risultano particolarmente utili in rilevamenti quando lo strato superficiale del terreno ha resistività molto alta (sabbia asciutta o terreno gelato), al contrario uno strato superficiale molto conduttore limita l'applicazione del metodo in quanto riduce la penetrazione di quest'ultimo.

Vi sono numerosi metodi elettromagnetici, con diverse varianti, che impiegano strumenti differenti. Un tipo è quello a sorgente mobile e ricevitore mobile (Slingram), con due bobine che vengono spostate assieme su una traversa a distanza costante. Le traverse possono essere ripetute con distanze (e frequenze) diverse per ottenere profondità diverse di penetrazione e quindi permettere di tracciare delle pseudosezioni. Un altro tipo è il metodo a sorgente fissa e ricevitore mobile (Turam), che permette di usare sorgenti più grandi e potenti, necessarie per bersagli più profondi e meno conduttivi. Il TEM (e-m transitorio) supera la difficoltà di scoprire il segnale del bersaglio in presenza, al ricevitore, del campo molto più grande del trasmettitore, misurando il segnale dopo che il trasmettitore è stato spento. Il metodo VLF utilizza trasmettitori radio lontani, quindi lo strumento è compatto e leggero. Per i bersagli allungati si sceglie un trasmettitore che sia approssimativamente allineato con lo strike del corpo. L'inclinazione dello strumento è una misura del segnale in fase ed è verso l'alto in avvicinamento al bersaglio, verso il basso in allontanamento. Il rilevamento magnetotellurico, MT, utilizza correnti diffuse indotte nel terreno, che hanno un'ampia gamma di frequenze e ad alcune delle quali danno grande

---

<sup>57</sup> BOSCHI 2009, p. 309.

penetrazione. Le resistività apparenti vengono stabilite misurando, attraverso una bobina, il rapporto delle differenze di potenziale tra gli elettrodi con il campo magnetico<sup>58</sup>.

In questa tesi ci si è limitati ad utilizzare un sistema moderno e compatto del tipo *Slingram* (descritto nel paragrafo successivo), scelta condizionata principalmente dalla velocità di acquisizione dei dati.

Alla base dei metodi elettromagnetici c'è la teoria dell'elettromagnetismo descritta da una serie di leggi formulate principalmente attraverso gli esperimenti condotti sin dal XIX secolo da diversi scienziati come Faraday, Amperè, Gauss, Lenz, Coulomb, Volta ed altri. Nei primi anni del XIX secolo il fisico scozzese James Clerk. Maxwell (1831-1879), nel suo più celebre lavoro<sup>59</sup>, ebbe l'intuizione di combinare tutti i precedenti studi sulla materia in un insieme di equazioni vettoriali che costituiscono le equazioni di Maxwell e che descrivono l'interazione tra l'intensità del campo elettrico misurato  $E$  (*Volt/m*), l'intensità del campo magnetico  $H$  (*Amperè/m*), lo spostamento dielettrico  $D$  (*Coulomb/m<sup>2</sup>*) e l'induzione elettromagnetica o densità di flusso  $B$  (*Tesla*):

$$\nabla E = -\frac{\partial B}{\partial t}, \quad (2.1)$$

$$\nabla H = J + \frac{\partial D}{\partial t}, \quad (2.2)$$

$$\nabla B = 0, \quad (2.3)$$

$$\nabla D = \rho_c \quad (2.4)$$

dove  $J$  è la densità di corrente (*Ampère/m<sup>2</sup>*) e  $\rho_c$  è la densità di carica volumetrica (*Coulomb/m<sup>3</sup>*). L'equazione 2.1 rappresenta la legge di Faraday e stabilisce la velocità di cambiamento del flusso magnetico nel tempo. L'equazione 2.2 contiene la legge di Ampere e stabilisce che ogni flusso di corrente produce un campo magnetico attorno ad esso che è proporzionale alla corrente totale. L'equazione 2.3 afferma che il flusso dell'induzione magnetica attraverso una superficie chiusa è nullo e corrisponde alla constatazione che le linee del campo magnetico sono chiuse e che non esistono per esse sorgenti da cui si diramano (monopoli magnetici) come accade per le linee di forza del campo elettrico che hanno origine da cariche elettriche positive e finiscono in cariche elettriche negative. L'equazione 2.4 rappresenta la legge di Coulomb e stabilisce che il flusso del campo elettrico attraverso una superficie chiusa è proporzionale alla carica in essa contenuta.

La teoria di Maxwell afferma che un dipolo eccitato da un segnale ad alta frequenza genera un campo elettrico parallelo al dipolo. Le cariche elettriche in moto all'interno del campo

---

<sup>58</sup> MUSSET & KHAN 2003, p. 195.

<sup>59</sup> MAXWELL 1873.

elettrico generano un campo magnetico perpendicolare al dipolo stesso.

Tutti i metodi EM vengono utilizzati per studiare le variazioni di conducibilità del sottosuolo e il principio fisico su cui si basano è l'induzione. A tali principi bisogna comunque aggiungere alcune considerazioni proprie dei sistemi elettromagnetici a bassa frequenza<sup>60</sup>. In figura 4.1 viene rappresentato un esempio tipico di sistema di induzione. Una corrente alternata di frequenza  $\omega/2\pi$  e di intensità  $I_p$  circolante in una bobina trasmittente, produce un campo primario  $P$  nelle regioni circostanti. Questo campo è proporzionale e in fase con  $I_p$ , come espresso nella relazione che segue:

$$P = KI_p \sin \omega t \quad (2.5)$$

dove  $K$  è un fattore che dipende dalla geometria del sistema, dal numero di spire dell'avvolgimento e dall'area della bobina.

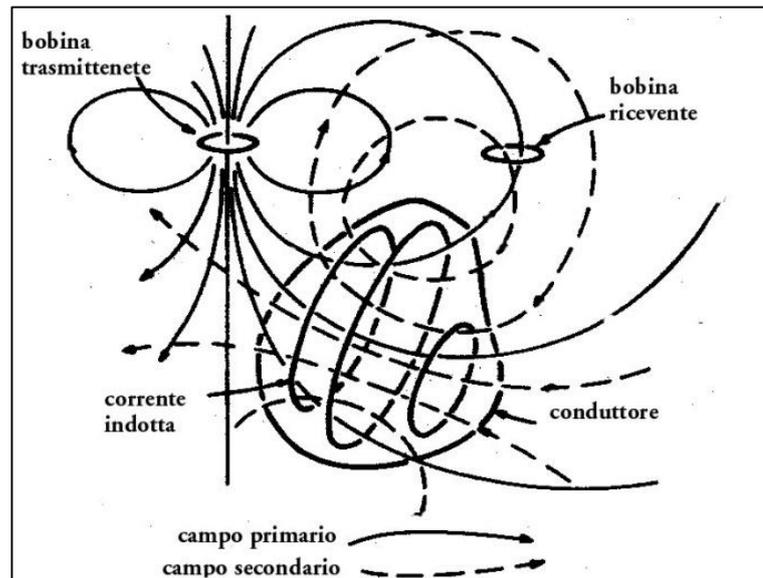


Figura 2.1 – Sistema di induzione (da Grant & West, 1965)

Quando un campo primario  $P$  agisce su un circuito elettrico la forza elettromotrice indotta ( $E_s$ ) è proporzionale a  $-P$  e presenta un ritardo rispetto a  $P$  di un quarto di periodo. Ciò è ricavato dalla legge fondamentale dell'induzione (legge di Faraday, equazione 2.1) e la differenza di fase in termini di angoli può essere scritta come:

$$\text{differenza di fase (tra } E_s \text{ e } P) = \pi/2. \quad (2.6)$$

Introducendo l'impedenza effettiva del conduttore  $Z_s = R_s + i\omega L_s$  di resistenza  $R_s$  e induttanza  $L_s$ , la corrente indotta  $I_s$  che fluirà nel conduttore sarà:

<sup>60</sup> TELDFORD et al. 1976.

$$I_s = E_s / Z_s. \quad (2.7)$$

La corrente  $I_s$  e il campo secondario prodotto da essa sono entrambi ritardati, rispetto alla forza elettromotrice indotta  $E_s$ , di una quantità  $\Phi$  che dipende dal circuito elettrico conduttore.  $\Phi$  è determinato dalla relazione  $\tan\Phi = \omega L_s / R_s$  e può essere scritto come:

$$\text{differenza di fase (tra } S \text{ e } E_s) = \Phi = \tan^{-1}(\omega L_s / R_s). \quad (2.8)$$

La differenza di fase totale tra il campo primario e secondario è ottenuta unendo le equazioni 2.7 e 2.8 e dunque sarà:

$$\text{differenza di fase (tra } S \text{ e } P) = \pi/2 + \Phi = \pi/2 + \tan^{-1}(\omega L_s / R_s). \quad (2.9)$$

Da tale equazione si evince che quando si ha un buon conduttore ( $\omega L_s / R_s \rightarrow \infty$  e  $\Phi = \pi/2$ ) la fase del campo secondario  $S$  è ritardata di circa  $180^\circ$  rispetto a  $P$ , mentre per un cattivo conduttore ( $\omega L_s / R_s \rightarrow 0$  e  $\Phi \rightarrow 0$ ) è ritardata di  $90^\circ$ . Per tale motivo la differenza di fase del campo secondario  $S$  rappresenta una misura indiretta della conducibilità.

Dalla combinazione del campo primario ( $P$ ) e del campo secondario ( $S$ ) si ottiene una risultante ( $R$ ), e le loro correlazioni sono mostrate in figura 2.2. La componente in fase di  $R$  con  $P$  è  $R \cos \alpha$ ; questa è chiamata componente in fase o reale. La componente fuori fase di  $90^\circ$ ,  $R \sin \alpha$ , è chiamata componente immaginaria, fuori fase o in quadratura.

Il campo secondario,  $S$ , può essere risolto in una componente reale  $R \sin \Phi$  e una componente immaginaria  $R \cos \Phi$ . Il rapporto tra la componente reale ( $Re$ ) e quella immaginaria ( $Im$ ) del campo secondario è in relazione con l'angolo di fase  $\Phi$ . Dunque:

$$Re/Im = \tan \Phi = \omega L_s / R_s \quad (2.10)$$

Maggiore è il rapporto  $Re/Im$ , maggiore è la qualità di conduzione del materiale.

Dalla componente in quadratura di fase è possibile calcolare la conducibilità apparente dei materiali interessati dal passaggio delle correnti indotte.

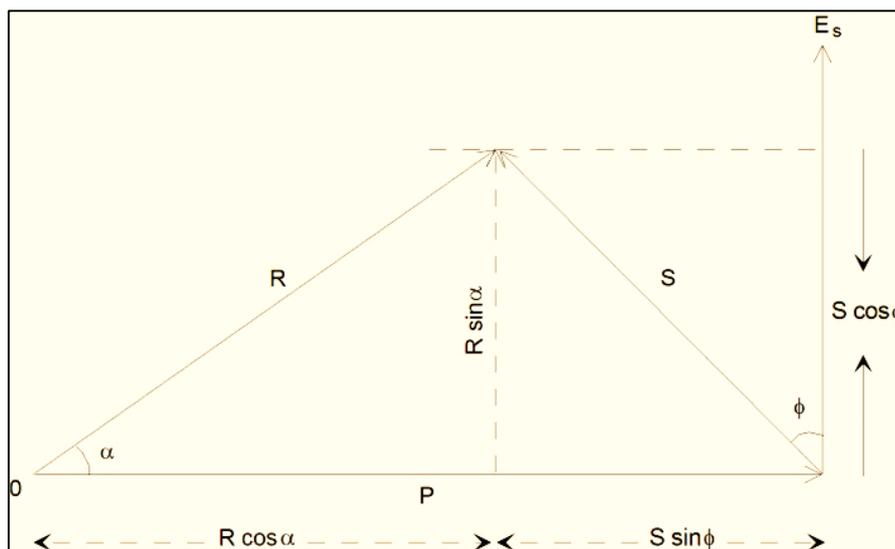


Figura 2.2 – Relazioni di fase tra i campi primario ( $P$ ), secondario ( $S$ ) e risultante ( $R$ ).

La formula per il calcolo della conducibilità apparente è la seguente:

$$\sigma_a = \frac{4}{\omega \mu_0 s^2} \left( \frac{S}{P} \right) \quad (2.11)$$

dove  $\sigma_a$  è la conducibilità apparente,  $\omega$  è la frequenza angolare dell'onda sinusoidale trasmessa,  $\mu_0$  è la permeabilità dello spazio libero,  $s$  è lo spazio tra i punti centrali delle bobine,  $S$  è il campo magnetico secondario alla bobina ricevente e  $P$  è il campo magnetico primario alla bobina ricevente. La conducibilità è espressa in millisiemens (mS) per metro ( $10^{-3}$  Siemens), con la teorica relazione con la resistività data da  $\text{mS/m} = 1000/\text{Ohm m}$ .

### ***2.1.1 Strumentazione utilizzata per il rilievo elettromagnetico, procedure di acquisizione ed elaborazione dei dati.***

Nel rilevamento elettromagnetico, per questa ricerca di dottorato, è stato utilizzato il Profiler EMP-400 prodotto dalla GSSI, (figura 2.3) che rientra nei metodi *Slingram* e presenta le caratteristiche tecniche mostrate in tabella 2.1.



*Figura 2.3 .Profiler EMP-400 (GSSI)*

Distanza tra le bobine	1.219 m
Frequenze operative	1 KHz – 16 Khz
Frequenza utilizzabili	3
Valori misurabili	Fase ( <i>ppm</i> ) Quadratura ( <i>ppm</i> ) Conducibilità ( <i>ms/m</i> )
Memoria	248.5 MB 180.000 dati puntuali continui 360.000 dati puntuali discreti
Alimentazione	Batterie ricaricabili al litio o 8 batterie AA
Trasferimento dei dati	Via Microsoft Active Sync
Display	Touch (5.58 x 7.36 cm)
Lunghezza	1.46 m
Massima larghezza	24 cm
Massima altezza	12.4 cm
Peso	4.535 Kg

*Tabella 2.1. Caratteristiche tecniche Profiler EMP-400 (GSSI).*

Si tratta di un sensore a induzione elettromagnetica a multifrequenza, portatile e leggero, in

cui le misure vengono immagazzinate su un processore interno e sono visualizzabili sul *display* di un piccolo palmare connesso allo strumento via *bluetooth*. Il sistema è in grado di misurare simultaneamente su tre frequenze che variano da 1000Hz a 16000Hz.

L'utilizzo di frequenza multiple rappresenta un grande vantaggio in quanto garantisce sia un maggior dettaglio nella mappatura della superficie del sottosuolo, sia il raggiungimento di diverse profondità contemporaneamente.

Il *display* restituisce in tempo reale la direzione e le stazioni operative sulla griglia di lavoro, la conducibilità del terreno (espressa in *mS/m*) e i valori in fase e in quadratura (espressi in *ppm*). La misura della componente in fase fornisce informazioni utili per la ricerca di oggetti metallici mentre componente in quadratura è più indicata per la ricerca di anomalie resistive quali possono essere ad esempio vuoti o corpi molto asciutti.

L'acquisizione dei dati avviene posizionando una o più griglie regolari (quadrato o rettangolari) sul terreno da investigare e ispezionandolo per profili paralleli equidistanti tra loro secondo una spaziatura di *x* m scelta prima dell'acquisizione, in base agli obiettivi dell'indagine. Successivamente l'acquisizione dei dati all'interno delle griglie può avvenire secondo due modalità: partendo sempre dallo zero o per zig zag, raccogliendo dati discreti o continui (figura 2.4).

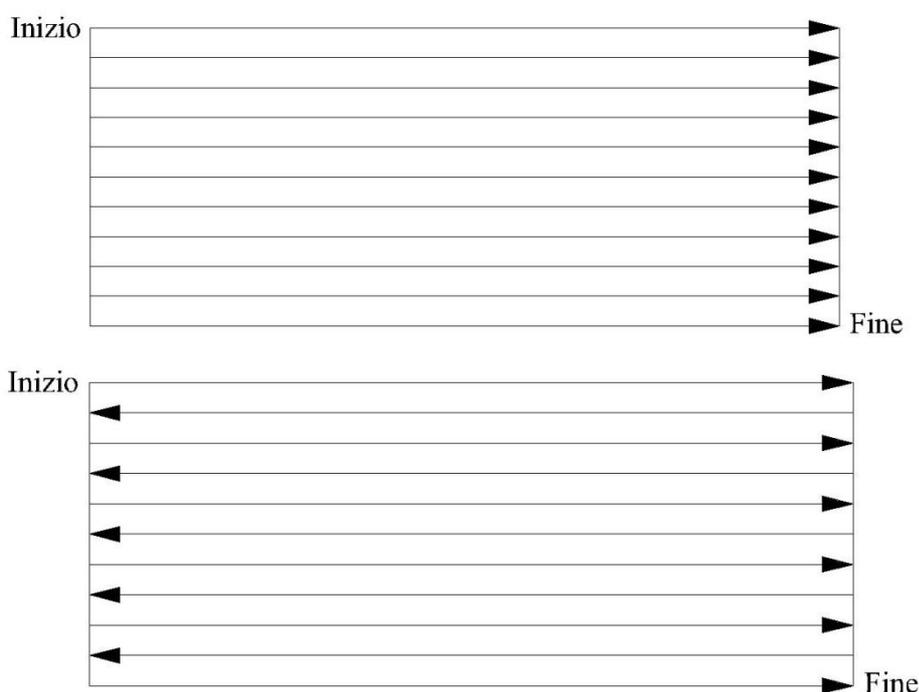
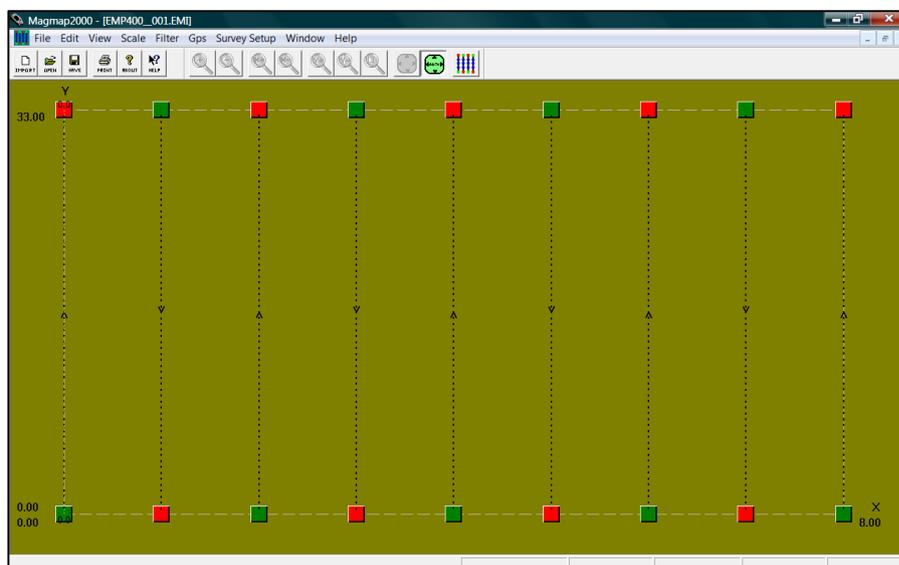


Figura 2.4. Schema di acquisizione dei dati sul campo, in alto per profili paralleli, in basso a zig zag.

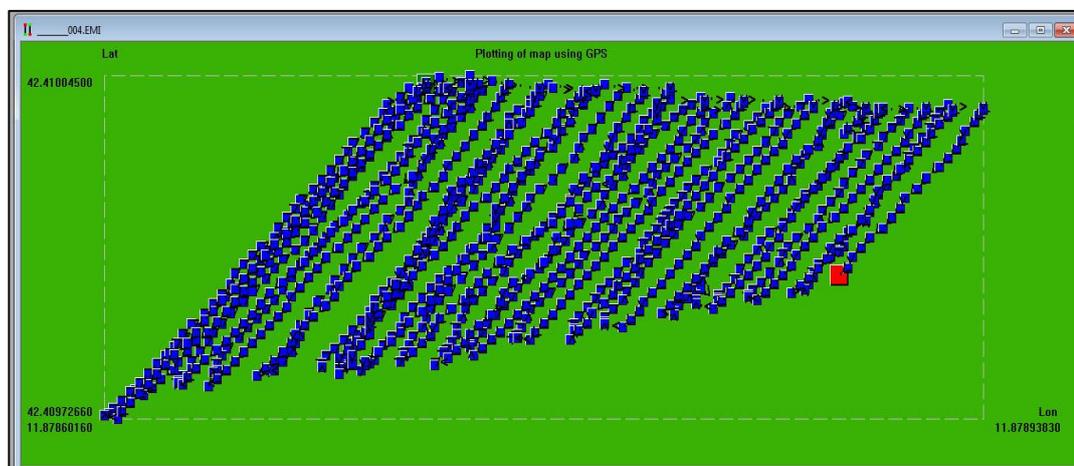
Il servizio per stazioni implica la misura di dati discreti all'interno di una griglia di indagine reimpostata e dimensionata prima che inizi l'acquisizione (figura 2.5).

L'operatore si muove lungo dei profili paralleli tra loro, fermandosi ad ogni stazione, e registrando il dato. Questo metodo permette un'alta precisione durante l'acquisizione dei dati, i quali vengono scaricati ed elaborati al computer in plottaggi bidimensionali o tridimensionali.



*Figura 2.5. Acquisizione dei dati per stazioni.*

L'acquisizione in continuo consente un'indagine rapida e accurata nello stesso tempo, l'operatore può camminare con una velocità regolata da un timer lungo delle linee seguendo una griglia o in maniera del tutto casuale. Ciò è consentito del fatto che lo strumento possiede un sistema GPS integrato che registra punto per punto la posizione delle misure (figure 2.6 e 2.7).



*Figura 2.6. Acquisizione dei dati in continuo.*

Quest'ultimo tipo di acquisizione, più immediata nelle operazioni di campagna, ma più complicata per le successive operazioni di elaborazioni, è quella adoperata in questa ricerca. Il grosso vantaggio di questo tipo di prospezione è che il solo strumento, con GPS integrato, non necessita di alcun tipo di supporto metrico e fornisce in contemporanea anche il rilevamento topografico.

Successivamente alla fase di acquisizione i dati vengono processati con uno specifico *software* che restituisce per ogni profilo, oltre che le coordinate spaziali, i valori in fase ed in quadratura di fase, la conducibilità e la suscettività magnetica relativi ad ogni frequenza acquisita.

In questa tesi sono stati considerati i dati di conducibilità, trasformati in resistività. Il risultato finale è la creazione di una mappa geofisica di resistività in scala di grigi o di colore (con le tonalità tendenti al rosso vengono indicate anomalie alto-resistive, con le tonalità del blu anomalie basso-resistive / conduttive) (figura 2.8).

La parte più importante del lavoro, successivamente alla fase di elaborazione, consiste nell'interpretazione dei dati. La lettura delle mappe di resistività viene fatta analizzando le forme geometriche delle anomalie (resistive e conduttive) prediligendo quelle che possano rimandare a strutture sepolte.



*Figura 2.7. Acquisizione del dato utilizzando la modalità in continuo.*

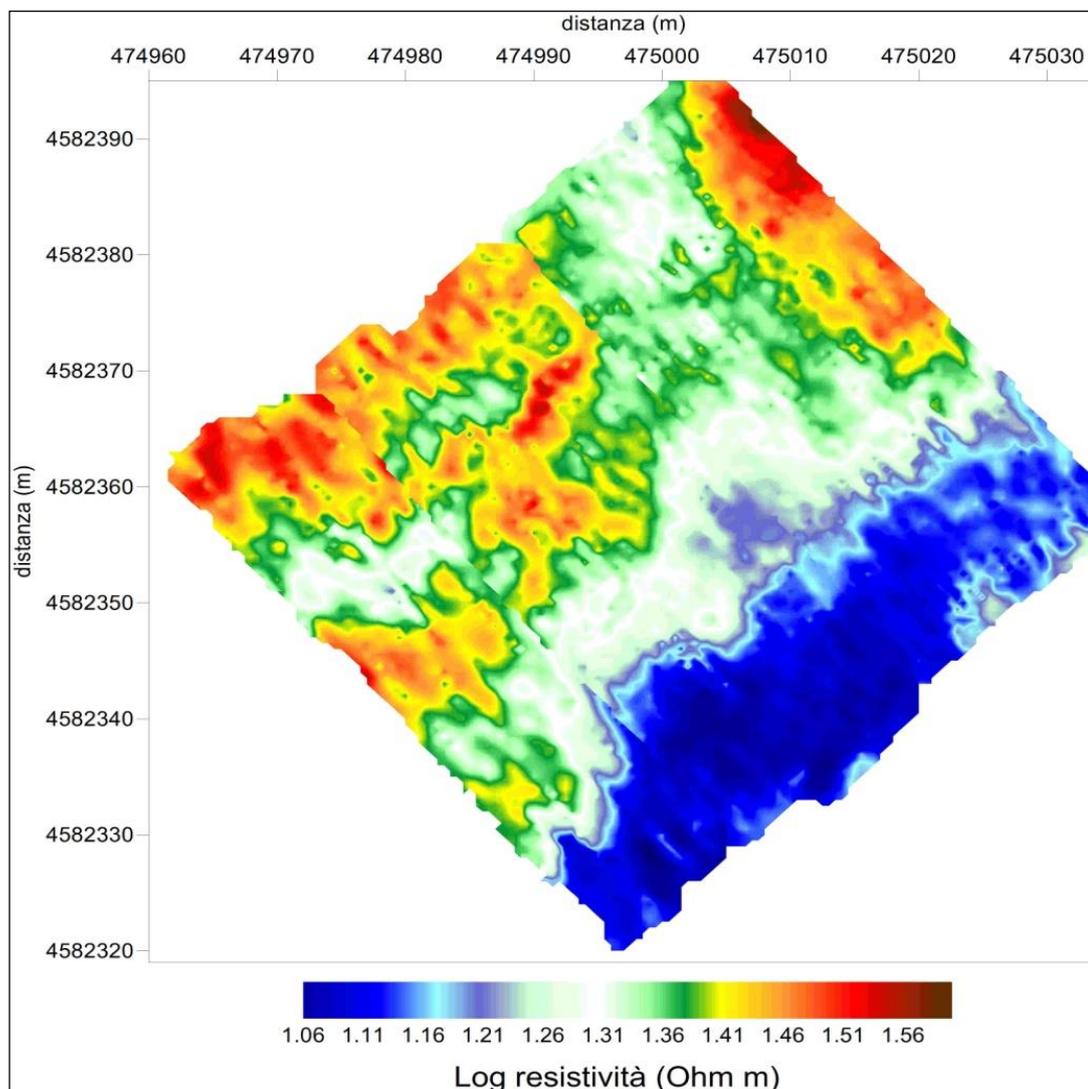


Figura 2.8. Esempio di mappa geofisica di resistività derivata dal rilievo ad induzione elettromagnetico relativa alla frequenza di 1500 Hz.

## 2.2 Il Ground Penetrating Radar (GPR).

Uno dei più recenti metodi di esplorazione geofisica che ha ricevuto un ampio consenso tra gli archeologi è il *Ground Penetrating Radar (GPR)*, il radar che penetra nel sottosuolo. Questo metodo permette di mappare accuratamente l'estensione spaziale di strutture e siti archeologici a profondità che vanno da poche decine di centimetri a qualche metro.

I *GPR* attualmente in commercio sono molto maneggevoli e ciò ne consente il loro trasporto in qualsiasi sito; il successo di questo tipo di rilievo in archeologia dipende da molti fattori quali: la frequenza dell'antenna utilizza (viene scelta in relazione alla risoluzione e alla profondità di investigazione che si vuole raggiungere), la superficie topografica del terreno e la vegetazione (terreni accidentati e la presenza di vegetazione folta limitano l'utilizzo di questa metodologia in quanto non permettono il regolare camminamento dell'antenna sulla superficie), l'umidità del terreno (in presenza di terreno

molto umido questa metodologia risulta inadatta in quanto l'energia elettromagnetica viene dissipata e non si generano riflessioni) e la profondità degli oggetti sepolti (se i *target* sono molto profondi il metodo risulta inadatto, in questo caso si potrebbe optare con l'applicazione di altre metodologie come la geoelettrica).

L'equipaggiamento del *GPR* è costituito da un'antenna (o un complesso di antenne), un sistema radar (che produce impulsi), un computer (per visualizzare, salvare ed elaborare i dati) e una ruota contagiri (*survey wheel* che misura la distanza percorsa dall'antenna).

In molti sistemi moderni per ridurre le dimensioni della strumentazione può essere utilizzata una sola antenna che, alternando le sue funzioni, prima invia il segnale e immediatamente dopo si pone in modalità di ricezione per registrare gli arrivi delle onde riflesse. In questo modo, utilizzando una sola antenna, si effettua un'acquisizione in modo monostatico.

Per indagare il sottosuolo il sistema *GPR* invia, tramite un antenna trasmittente, impulsi elettromagnetici nel terreno con una certa velocità che possono avere frequenze comprese tra 10 e 2000 MHz circa. Ogni volta in cui gli impulsi attraversano un materiale con differente composizione o tasso idrico, la velocità cambia e una porzione dell'energia radar viene riflessa verso la superficie e captata da un antenna ricevente. L'energia rimanente continua a trasmettersi nel terreno per essere nuovamente riflessa, fino a disperdersi completamente in profondità.

Le quantità che vengono misurate quando si effettua un indagine *GPR* sono il tempo doppio di viaggio (*two way travel time*) e l'ampiezza dell'onda riflessa.

Il primo parametro rappresenta il tempo impiegato dai singoli impulsi per viaggiare dall'antenna trasmittente nel sottosuolo, essere riflessi da una discontinuità e tornare in superficie per essere registrati<sup>61</sup>. Il tempo ( $2t$ ) dipende dalla velocità ( $v$ ) con cui si propaga l'onda nei materiali e fornisce informazioni sulla profondità ( $h$ ) a cui si trovano i riflettori secondo la formula:

$$t=2h/v \quad (2.12)$$

Conoscendo la velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche e misurando il tempo di attraversamento (valore restituito dal georadar) è possibile calcolare la profondità dei *target* grazie alla formula:

$$h=vt/2 \quad (2.13)$$

E' importante sottolineare che la velocità con cui si propagano le onde elettromagnetiche nel sottosuolo dipende dal mezzo che stanno attraversando, nel vuoto è pari a circa 300.000

---

<sup>61</sup> CONYETRS 2004a, p. 38.

Km/s, ma diminuisce quando cambia il mezzo interessato dal passaggio<sup>62</sup>.

Il parametro fisico che influenza la velocità di propagazione dell'onda elettromagnetica attraverso un determinato materiale è la permissività relativa o costante dielettrica relativa ( $\epsilon_r$ ), espressa dalla formula<sup>63</sup>:

$$v = c / \sqrt{\epsilon_r} \quad (2.14)$$

Dove  $c$  è la velocità della luce ( $2.97 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$ ).

La permissività o costante dielettrica dielettrica relativa definita dall'equazione 2.15 rappresenta una grandezza fisica che descrive il comportamento di un materiale dielettrico in presenza di un campo elettrico. Essa è una proprietà che varia con il tipo di materiale, la sua temperatura e il suo contenuto idrico ed è caratterizzata da una parte reale (che descrive l'energia contenuta nel materiale dielettrico a una determinata frequenza) e da una parte immaginaria (rappresenta la misura di quanto il materiale sia dissipativo in presenza di un campo elettrico esterno)<sup>64</sup>.

$$\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0 \quad (2.15)$$

$\epsilon_0$  è la permittività dielettrica nel vuoto.

La conoscenza della velocità di propagazione e della costante dielettrica relativa, dunque, è essenziale ai fini interpretativi in quanto permette di calcolare la profondità ( $h$ ) di una superficie riflettente.

L'ampiezza dell'onda riflessa descrive la quantità di energia che torna in superficie dopo la riflessione. Quest'ultima dipende dall'energia dell'onda inviata, da quanta ne viene dissipata lungo il tragitto (attenuazione) e dal contrasto nelle proprietà elettromagnetiche dei materiali che determinano la superficie di riflessione.

Il fenomeno della riflessione, come accennato precedentemente, avviene in corrispondenza di una zona che rappresenta il passaggio da un mezzo con alcune proprietà elettriche e magnetiche ad un altro con proprietà differenti<sup>65</sup>:

$$R = \sqrt{\epsilon_2} - \sqrt{\epsilon_1} / \sqrt{\epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_1} \quad (2.16)$$

Le più forti riflessioni del segnale si verificano generalmente all'interfaccia tra due spessi strati con proprietà elettriche molto differenti; viceversa, riflessioni di ampiezza più piccola si verificano quando sono presenti solo piccole differenze nelle proprietà elettriche degli strati.

L'attenuazione (espressa in  $dB/m$ ) è una delle più importanti cause di perdita di energia.

---

<sup>62</sup> CONYERS & GOODMAN 1997, pp. 31-40.

<sup>63</sup> CONYERS 2004a, p. 45.

<sup>64</sup> BITTELLI 2009, p. 338.

<sup>65</sup> CONYERS & GOODMAN 1997, p. 27.

Essa esprime la diminuzione dell'intensità del segnale per unità di lunghezza percorsa all'interno del materiale. In generale è possibile affermare che la profondità di indagine massima ottenibile in un determinato materiale dipende dal suo valore di attenuazione. Valori elevati si hanno per i materiali caratterizzati da elevati valori di conducibilità elettrica, quali limi, argille, metalli e acque saline; viceversa, valori bassi sono caratteristici di rocce cristalline, ghiaie, sabbie e acque demineralizzate. Il coefficiente di attenuazione  $\alpha$  dipende dal contenuto d'acqua, dai sali in soluzione e dalla composizione del materiale<sup>66</sup>. L'equazione di attenuazione dipendente dalle proprietà elettriche, magnetiche e dielettriche ed è:

$$\alpha = \omega \sqrt{\mu \varepsilon} \left\{ \frac{1}{2} \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \right)^2} - 1 \right] \right\}^{1/2} \quad (2.17)$$

dove  $\mu_r$  è la permeabilità magnetica. La tabella 2.2 riporta i valori della costante dielettrica relativa e dell'attenuazione per alcuni dei materiali più comuni.

Un altro parametro fisico importate per quanto riguarda la penetrazione del segnale dipende dalla frequenza dell'antenna.

La scelta della frequenza dell'antenna, come accennato precedentemente, è molto importante per un buon esito delle indagini e viene effettuata considerando due fattori: la risoluzione che vogliamo avere e la profondità che vogliamo raggiungere.

Il primo fattore indica la capacità di individuare oggetti di piccole dimensioni e si può distinguere in verticale e orizzontale. Essa dipende da una caratteristica dell'onda elettromagnetica, chiamata lunghezza d'onda  $\lambda$ , che rappresenta la distanza tra due punti dell'onda che hanno la stessa fase ed è legata alla frequenza  $f$  dalla relazione:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (2.18)$$

Da questa formula risulta che per una data velocità ( $v$ ) tipica del materiale si avranno lunghezze d'onda più piccole al crescere delle frequenze.

La risoluzione verticale è la minima distanza misurata lungo la verticale tra due oggetti riflettenti per la quale è possibile distinguere le singole riflessioni. Benché in generale per valutare tale grandezza debbano intervenire considerazioni circa le caratteristiche strumentali ed alcuni parametri relativi al rapporto segnale-rumore, il problema viene ridotto nella valutazione della durata dell'impulso o del contenuto spettrale dell'onda riflessa.

---

<sup>66</sup> CONYERS 2004a, p.50.

<b>Materiale</b>	<b>K</b>	<b><math>\gamma</math> (mS/m)</b>	<b><math>v</math> (m/ns)</b>	<b>A (dB/m)</b>
Aria	1	0	0.3	0
Acqua distillata	80	0.01	0.033	$2 \times 10^{-3}$
Acqua dolce	80	0.5	0.033	0.1
Acqua salata	80	$3 \times 10^4$	0.01	$10^3$
Sabbie asciutte	3-5	0.01	0.15	0.01
Sabbie sature	20-30	0.1-1.0	0.06	0.03-0.3
Calcare	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
Ghiaccio	3-4	0.01	0.16	0.01

*Tabella 2.2. Costante dielettrica, conducibilità elettrica, velocità e attenuazione di alcuni materiali geologici (da Annan & Devis, 1977).*

Per sistemi radar commerciali si verifica che per una durata dell'impulso, la minima separazione spaziale tra gli oggetti che può essere risolta e rappresentata con due distinti eventi. In mezzi con elevato contenuto d'acqua la risoluzione verticale risulta ottimale a discapito della profondità di indagine che risulta in generale limitata dall'aumento della conducibilità del mezzo.

La risoluzione orizzontale, cioè la capacità di discriminare oggetti riflettenti posti alla stessa profondità è funzione di molteplici fattori tra cui: le caratteristiche di apertura delle antenne (funzione delle proprietà elettromagnetiche del sottosuolo), la separazione tra antenna trasmittente e ricevente e le caratteristiche del mezzo:

Nella tabella 2.3 è sintetizzata la relazione tra la frequenza dell'antenna, nel caso di due antenne spesso utilizzate in ambito archeologico (120 e 500 MHz), velocità di propagazione e risoluzione minima.

Affinché un oggetto possa essere individuato è necessario che la lunghezza d'onda sia proporzionale alle sue dimensioni e si possa così generare una riflessione. Per questo motivo più piccoli saranno gli oggetti che vogliamo individuare più piccola dovrà essere la lunghezza d'onda e dunque più elevata la frequenza dell'antenna.

Il secondo fattore che concorre a determinare la scelta della frequenza dell'antenna è la profondità che si vuole raggiungere nell'indagine. Normalmente più alta è la frequenza dell'antenna maggiore sarà la risoluzione e minore la penetrazione, viceversa, basse

frequenze permettono di raggiungere elevate profondità a discapito della risoluzione.

$f$ (MHz)	$V$ (cm/ns)	Risoluzione (cm)
120	5	42
	7	58
	9	75
	10	83
	15	125
500	5	10
	7	14
	9	18
	10	20
	15	30

Tabella 2.3. Valori di relazione tra frequenza, velocità di propagazione e risoluzione minima (da Finzi & Piro, 1991).

Anche il peso e le dimensioni delle antenne dipendono dalla frequenza. Un'antenna da 1000 MHz può essere tranquillamente trasportata ed utilizzata con una sola mano; per le frequenze più basse, ad esempio 100 MHz le antenne diventano molto ingombranti e anche a causa del peso potrebbero essere necessari due operatori per il trasporto e le operazioni di acquisizione dei dati.

Un altro aspetto importante, in riferimento alle antenne trasmettenti, è quello che riguarda la forma del raggio inviato. L'onda che viene inviata non si propaga in un sottile raggio direttamente al di sotto dell'antenna ma attraverso un cono ellittico il cui apice è il centro dell'antenna trasmittente (figura 2.9).

La relazione matematica che regola questo fenomeno chiamato anche *footprint* è:

$$A = \frac{\lambda}{4} + \frac{D}{\sqrt{\epsilon_r + 1}} \quad (2.19)$$

dove  $A$  è il raggio del cono,  $\lambda$  è la lunghezza d'onda,  $D$  la profondità della superficie riflettente e  $\epsilon_r$  la costante dielettrica relativa.

Dalla formula emerge che maggiore è la costante dielettrica relativa, minore è la velocità dell'energia radar trasmessa e dunque più aperto è il cono di trasmissione che si propaga nel terreno.

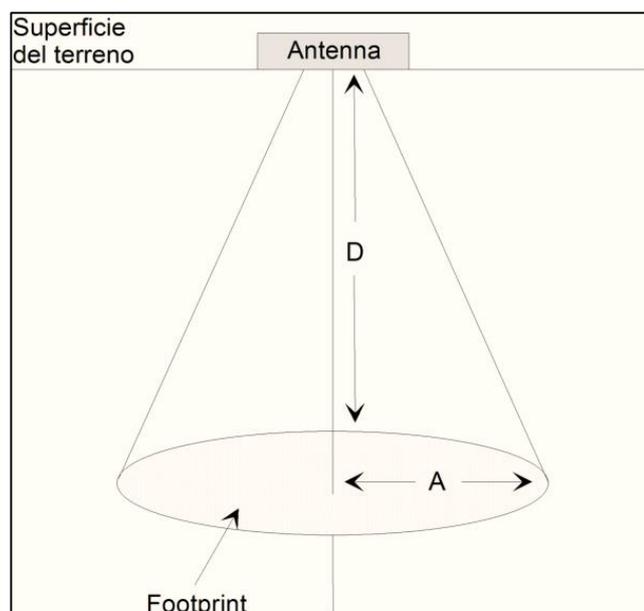


Figura 2.10. Cono ellittico della penetrazione GPR nel terreno (modificata da (da Goodman 1994).

Un'ultima considerazione da fare riguarda la *dead zone* superficiale o zona di interferenza vicina alla superficie in cui è difficile l'individuazione degli oggetti a causa dell'interfaccia aria/ suolo che ostacola l'accoppiamento perfetto tra l'antenna e la superficie del suolo. Questa zona è considerata uguale alla spaziatura fra dipolo trasmittente e ricevente, e si manifesta tramite una prima banda scura sulle sezioni grafiche. I valori teorici della *dead zone* sono riportati in tabella 2.4.

Frequenza centrale dell'antenna (MHz)	Ampiezza della dead zone (cm)
1500	2,5
900	10
400	15
200	30

Tabella 2.4. Valori di ampiezza della dead zone (da Goodman 1994).

### 2.2.1 Strumentazione utilizzata per il rilievo GPR e procedure di acquisizione ed elaborazione dei dati.

La strumentazione GPR con cui sono state condotte le indagini è un modello prodotto dalla IDS (figura 2.11). Esso è costituito da una unità di controllo che genera un impulso *trigger* trasmesso via cavo all'elettronica trasmittente dell'antenna. Qui il segnale viene trasformato

il un impulso bipolare e aumentato in ampiezza, in altri termini il segnale elettrico viene trasformato in onda elettromagnetica. Inviata l'onda nel sottosuolo, dopo l'interazione con i materiali, l'antenna ricevente intercetta il segnale di ritorno e lo invia all'unità di controllo dove viene processato e visualizzato dal *monitor* di uno specifico computer.

La strumentazione è dotata di un'antenna monostatica in cross-frequenza rispettivamente di 200 e 600 MHz e presenta le caratteristiche tecniche mostrate in tabella 2.5.

Il dato base in uscita dal georadar è una singola traccia. La traccia rappresenta un'ampiezza (dB di voltaggio) sull'asse delle x, in funzione del tempo (s) o della frequenza (Hz) sull'asse y. Se la variazione di ampiezza è misurata in funzione del tempo, la misura ottenuta viene definita nel dominio del tempo, se invece, tale variazione è misurata in funzione della frequenza allora si parlerebbe di analisi nel dominio della frequenza.

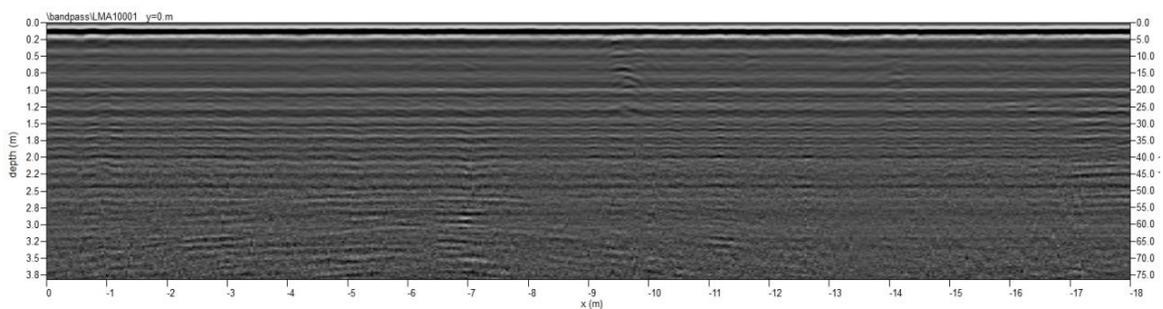


*Figura 2.11. Sistema GPR utilizzato per l'acquisizione dei dati.*

Caratteristiche tecniche GPR IDS	
Data logger	Panasonic CF19 (in alternativa può essere utilizzato qualsiasi PC Windows dotato di collegamento LAN)
Unità di acquisizione dati radar	IDS DAD FAST-WAVE fornita con il software di acquisizione RISK2
Frequenza nominale delle antenne	200 e 600 MHz
Sistema di posizionamento	Ruota metrica e/o interfaccia GPS
Velocità di acquisizione	16 m/sec.
Autonomia delle batterie	> 8 ore
Peso	29 Kg
Dimensione antenna	50 cm x 60 cm
Connessione wireless	Non disponibile
Grado di protezione	IP65
Conformità	CE

*Tabella 2.5. Caratteristiche tecniche georadar IDS.*

L'insieme di più tracce prende il nome di radargramma (figura 2.12). I radargrammi sono immagini bidimensionali rappresentati sezioni verticali del sottosuolo che presentano in ascissa la distanza percorsa dallo spostamento dello strumento sulla superficie e in ordinata il tempo espresso in *ns*.



*Figura 2.12. Esempio di radargramma*

Per ottenere queste sezioni è necessario che l'antenna venga spostata lungo delle linee

parallele, inserite in griglie regolari, sulla superficie del terreno. In questo modo una serie di impulsi vengono inviati dall'antenna trasmittente ad intervalli di tempo regolari espressi in  $ns$  e le relative riflessioni vengono percepite da un antenna ricevente.

A causa del fatto che la geometria del lobo di emissione è assimilabile ad un tronco di cono che si apre verso il basso, le radiazioni possono intercettare bersagli che non sono posti esattamente lungo la verticale; i loro riflessi giungono con maggiore ritardo (a fronte di un tragitto più lungo) e appaiono più profondi. Il tempo di ritardo è dato da:

$$t = \frac{2(d^2 + s^2)^{1/2}}{v} \quad (2.20)$$

dove  $d$  è la profondità dell'oggetto e  $s$  è la distanza orizzontale da quest'ultimo. Poiché il tempo di ritardo dell'eco generato da un oggetto è influenzato sia dalla profondità che dalla velocità, risulta difficile separare i due fattori e ciò può indurre a commettere degli errori di valutazione.

Un esempio tipico del ritardo dei riflessi è la forma di iperbole mostrata in corrispondenza di piccoli riflettori (ad esempio tubi tagliati trasversalmente, apparecchiature metalliche, ciottoli ecc.), i cui rami ascendente e discendente sono i riflessi registrati prima e dopo il passaggio dell'antenna sulla verticale del bersaglio (figura 2.13). La forma dell'iperbole dipende da due parametri: spaziatura della scansione (più risulta piccola, più le iperbole sono ampie) e velocità del segnale (velocità elevate producono iperbole più ampie). Mentre il primo fattore viene impostato dall'operatore prima di procedere all'indagine, il secondo viene sfruttato in fase di elaborazione dei dati per ricavare, proprio dalla forma dell'iperbole, la velocità con la quale l'onda attraversa il mezzo (migrazione).

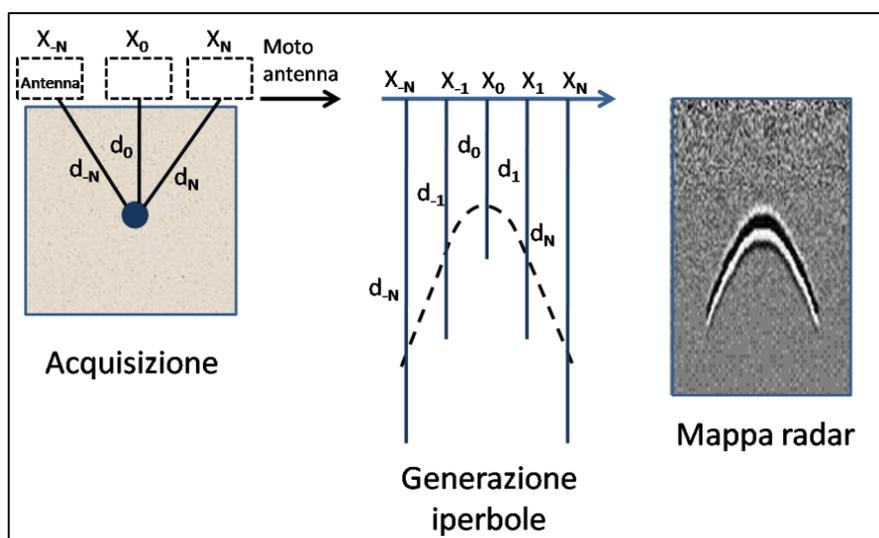


Figura 2.13. Generazione dell'iperbole di riflessione in prossimità di un corpo puntiforme (da Cozzolino 2009).

L'intensità della singola riflessione è legata invece alle caratteristiche del materiale: oggetti metallici producono riflessioni molto evidenti, mentre elementi di materiali meno conduttivi producono riflessioni meno evidenti. Anche la dimensione del bersaglio influisce sulla potenza del segnale di ritorno, che risulta tanto maggiore quanto più cresce il diametro dell'oggetto nascosto.

I corpi estesi lateralmente (oggetti di grandi dimensioni, stratificazioni, fratture, murature, ecc.) risentono in maniera minore dell'effetto del cono di trasmissione e mostrano nei profili una forma più vicina a quella reale. La forma della riflessione prodotta da un bersaglio lineare è naturalmente anche legata alla direttrice lungo la quale avviene la scansione: se essa è parallela allo sviluppo dell'elemento, allora l'immagine prodotta sarà simile a quella di un piano continuo; viceversa per una direzione di scansione perpendicolare la riflessione sarà parabolica.

Gli oggetti molto piccoli invece producono una frammentazione dei rami dell'iperbole in una serie di forme dette "a occhio": questo fenomeno può verificarsi anche nel caso di strutture strette e allungate attraversate secondo una direzione all'incirca perpendicolare a quella dell'allungamento (ad esempio piccole canalizzazioni).

Dopo l'acquisizione delle sezioni si utilizzano dei *software* che permettono il trattamento dei dati e la loro visualizzazione. Esistono molti programmi usati per trattare i dati radar, quello utilizzato in questo lavoro è GPR-SLICE v.7<sup>67</sup>.

L'elaborazione dei dati avviene attraverso una serie di passaggi quali:

- Creazione dell'ambiente di lavoro: l'operatore indica il nome del progetto e la strumentazione utilizzata per l'acquisizione dei dati. Successivamente il software genererà 16 sottocartelle di cui 12 dedicate al processamento dei dati e 4 per il salvataggio dei file immagine.
- Trasferimento dati: i dati vengono importati nella cartella di progetto selezionando il tipo di file utilizzato (\*.dt, \*.rd3, \*.dzt, \*.dztg, etc.).
- Creazione di informazioni: vengono attribuite le coordinate spaziali a ciascun profilo secondo la griglia utilizzata in campo (direzione dei profili e le dimensioni sugli assi x e y della griglia), i parametri di *time window*<sup>68</sup> e *samples/scan*<sup>69</sup> utilizzati nell'acquisizione.
- Conversione dati: Tutti i profili acquisiti necessitano di essere convertiti in un

---

<sup>67</sup> Goodman, 2011-2013.

<sup>68</sup> La *time window* è definita come l'intervallo di tempo, misurato in *ns*, in cui l'antenna ricevente percepirà e registrerà l'energia delle onde radar riflesse.

<sup>69</sup> I *Seample per scan* rappresentano il numero di punti campione (*seample*) per ogni segnale registrato (*scan*). Più elevato è il numero dei campioni, più accurata sarà la ricostruzione della forma dell'onda.

formato di 16 bit rimuovendo, tramite l'applicazione del filtro della media mobile, il *dc-drift*, ossia il rumore dell'onda elettromagnetica.

- Creazione dei marker: vengono generati, per ogni radargramma, dei *marker* equidistanti in base al numero totale delle scansioni. Se per esempio un radargramma è composto da 1000 scansioni cliccando il pulsante sopra citato verrà inserito un marker ogni 100 scansioni.
- Creazione delle slice *su dati grezzi*: vengono stabiliti il numero di *slice* e gli intervalli di profondità, espressa in *ns*, che si vogliono creare. In questa fase inoltre avviene l'individuazione dell'istante zero sulla scala temporale. Esso è ottenuto sottraendo all'istante in cui arriva il segnale di accoppiamento tra i dipoli ( $t_d$ ), il relativo tempo di volo

$$t_0 = t_d - D/v_0 \quad (2.21)$$

dove  $D$  è l'offset dei dipoli e  $v_0$  è la velocità nel vuoto.

- Filtraggi: è possibile applicare ai profili una serie di filtri rappresentanti algoritmi complessi che eliminano il rumore o le interferenze che possono presentarsi in fase di acquisizione (figura 2.14). I filtri che possiamo applicare sono:
  - *Automatic Gain Control (ACG)*: rappresenta la tecnica più significativa per recuperare i dati in ampiezza del segnale che è attenuato con la profondità. L'attenuazione del segnale ha un andamento esponenziale che dipende dalla conducibilità del terreno. Esistono molteplici tipi di guadagni, sia lineari che esponenziali. Questi filtri agiscono su ogni singola traccia.
  - *Band pass filter*: agisce su una sola traccia e permette di filtrare una specifica banda di frequenza. I parametri da impostare sono due frequenze: quella più bassa e quella più alta, al di sotto e al di sopra delle frequenze impostate il filtro non agisce. Si dividono in filtri passa banda e passa alto. I filtri passa banda, o filtri verticali, vengono utilizzati per eliminare anomalie ad alta e bassa frequenza verificatesi durante l'acquisizione dei dati I filtri passa alto rimuovono la bassa frequenza dei dati, generalmente sotto i 10 MHz, che può essere generata da un rumore che deriva dalla progettazione del sistema GPR utilizzato nell'acquisizione; viceversa i filtri passa basso rimuovono le anomalie ad alta frequenza che possono essere dovute a disturbi elettrici nelle vicinanze. Questo filtro deve essere utilizzato con molta attenzione e soltanto nel caso in cui si sia individuata una banda di frequenza dove il segnale è disturbato.

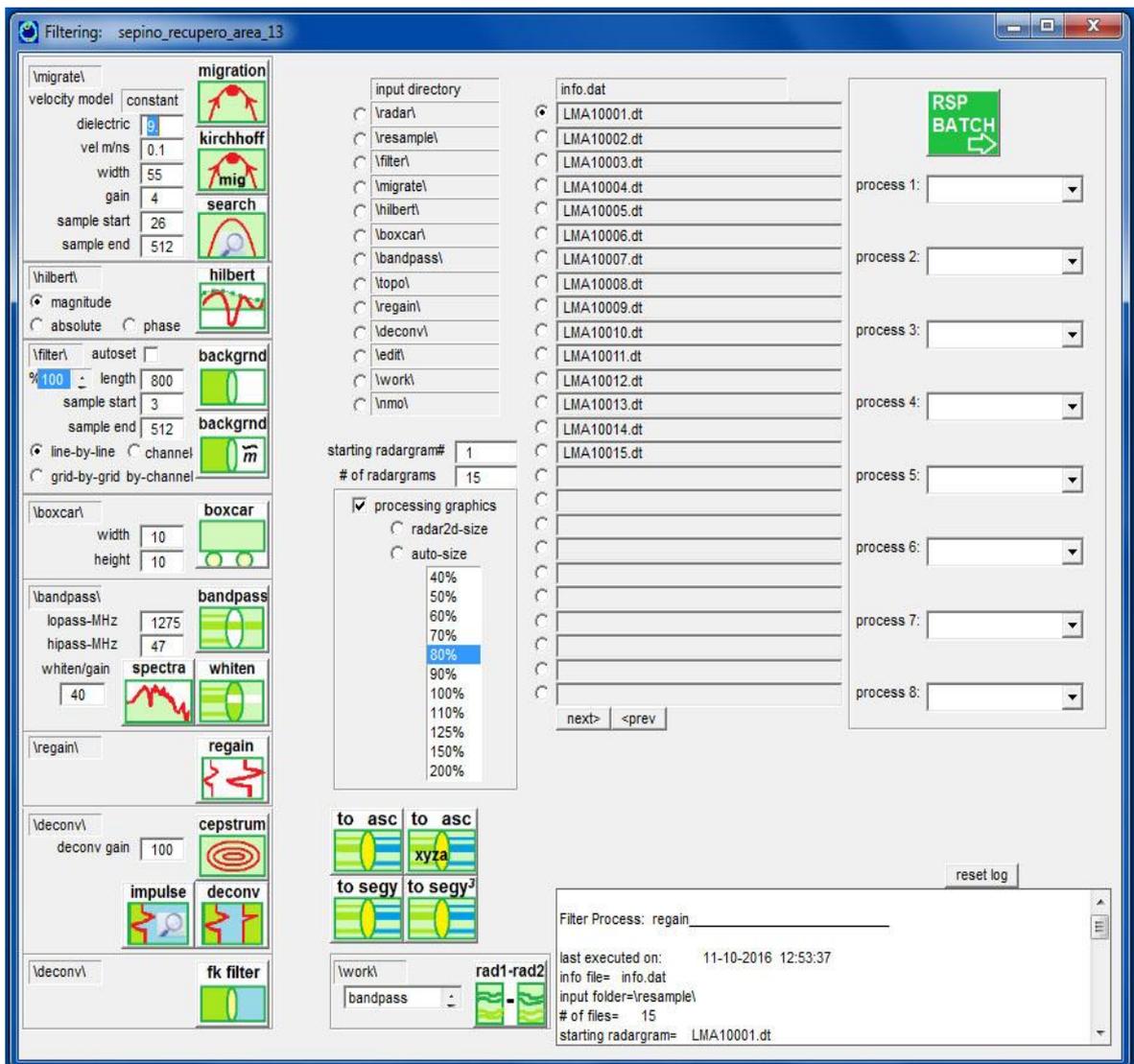


Figura 2.14. Software GPR-SLICE, filtraggi.

- *Background removal*: agisce su più tracce e rappresenta un filtro passa-alto che elimina le bande orizzontali visibili in molti profili GPR dovute a riflessioni che si verificano allo stesso tempo. Questa procedura va però seguita con molta cura, perché se lo scopo dell'indagine è quello di individuare delle interfacce orizzontali, applicando questo filtro, c'è il rischio di eliminare proprio le riflessioni che le contraddistinguono provocando così una perdita delle informazioni.
- *Il filtraggio F-K*: attraverso dei calcoli aritmetici complessi, trasforma le riflessioni registrate in termini di tempo in riflessioni in termini di frequenza. Questa procedura non va eseguita nel caso in cui si vogliono individuare corpi associabili a punti sorgente perché essa rimuove le riflessioni a grande angolo e quindi possibili iperboli di riflessione.

- *Deconvoluzione*: consente di ottenere un miglioramento della risoluzione in quanto si recupera larghezza di banda persa per fenomeni di attenuazione. Essa riporta il segnale a fase zero consentendo una focalizzazione molto più efficace.
- *Migrazione*: riunisce diversi tipi di operazioni tra le quali la *Kichoff migration* o *time migration*. Elimina le distorsioni causate dall'ampio raggio della propagazione e viene utilizzata principalmente per la focalizzazione delle iperboli di riflessione.

In figura 2.15 è riportato a titolo di esempio un radargramma grezzo a cui sono stati applicati l'*Automatic Gain Control (ACG)* e *Background removal*.

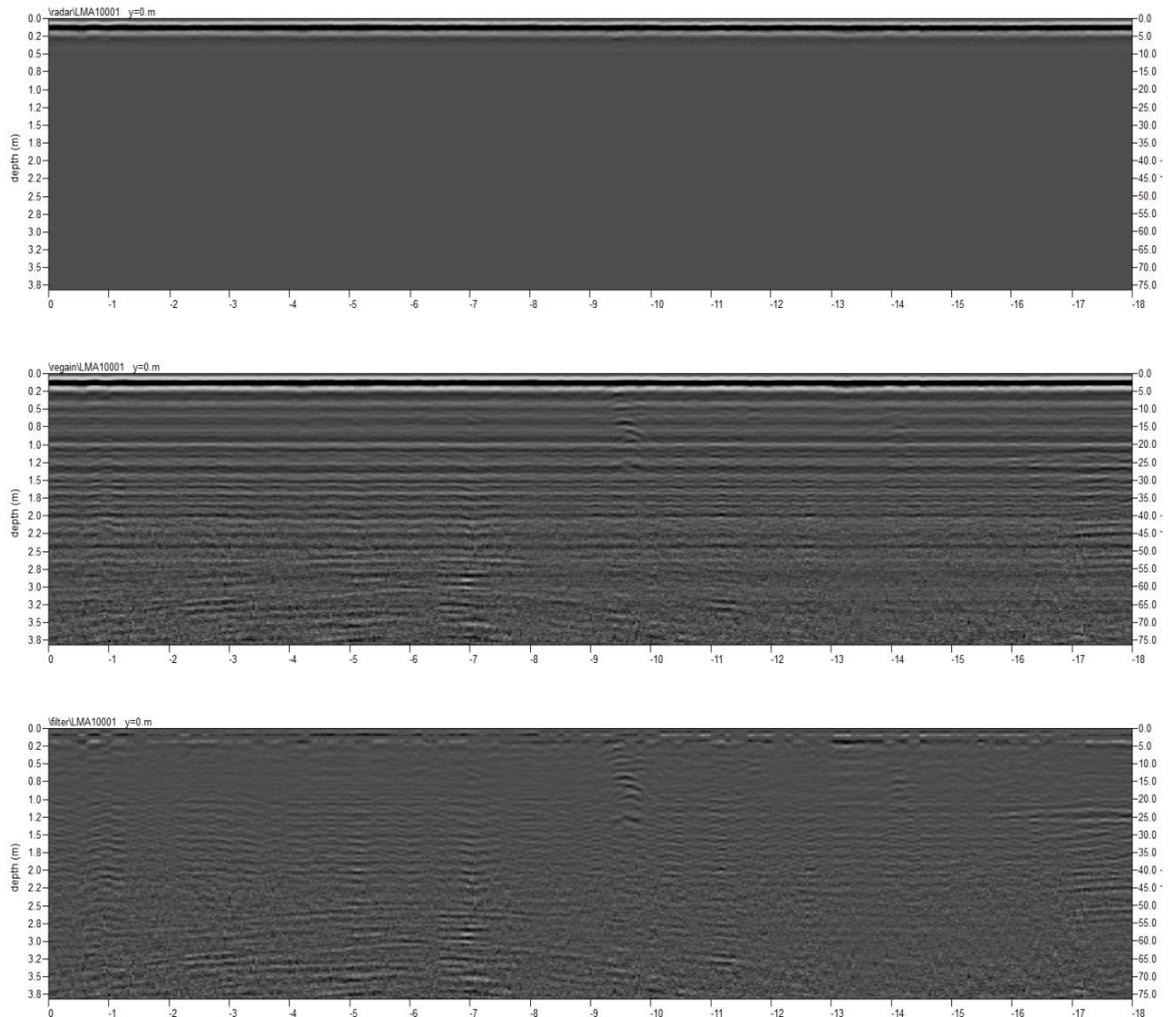


Figura 2.15. In alto radargramma grezzo, al centro applicazione dell'*Automatic Gain Control* e in basso applicazione del filtro *Background removal*.

- *Gridding*: viene creato il *grid* delle *time-slice* attraverso il metodo della distanza

inversa o il *krigging*. La costruzione delle *time-slices* consente anche l'implementazione di modelli 3D che facilita l'identificazione della localizzazione delle principali anomalie rilevate (figura 2.16). All'interno delle *time-slices* basse variazioni di ampiezze esprimono piccole riflessioni provenienti dal sottosuolo, e indicano la presenza di materiale abbastanza omogeneo. Viceversa, alte ampiezze indicano discontinuità rilevanti e spesso attestano la presenza di oggetti sepolti. Generalmente ai gradi di variazione di ampiezza nelle *time-slice* viene assegnata una scala cromatica in toni di grigio o a colori scelta in modo da mostrare il contrasto che facilita il riconoscimento delle anomalie.

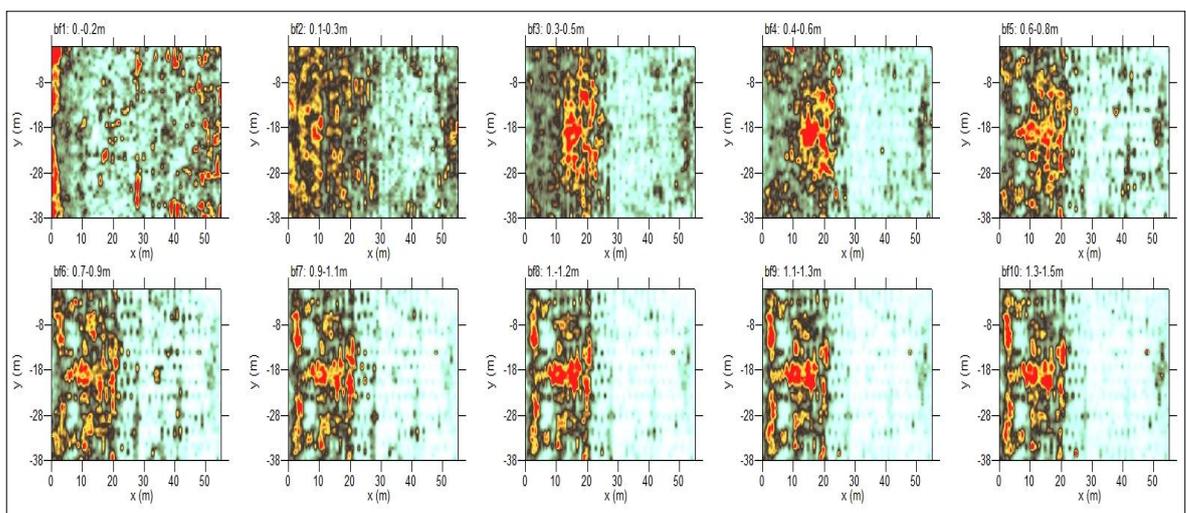


Figura 2.16. Software GPR-SLICE, time slice.

- *Visualizzazione 3D delle time slice*: vengono visualizzate le slice tridimensionalmente in un box dove sull'asse delle  $x$  e delle  $y$  è riportata la distanza in metri e sull'asse della  $z$  la profondità espressa in nanosecondi (figura 2.17).
- *Generazione dei modelli 3D*: vengono visualizzati tridimensionalmente alcuni volumi rendendo trasparenti alcuni valori misurati nel set di dati

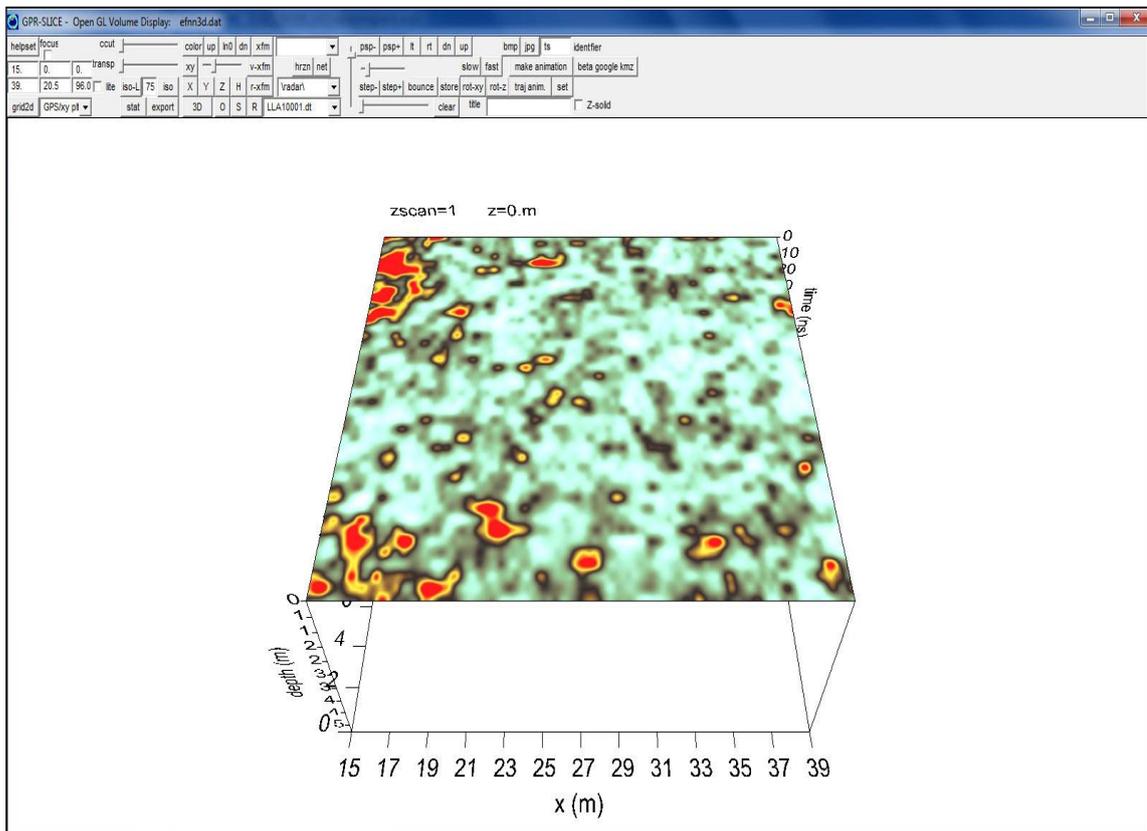


Figura 2.17. Software GPR-SLICE, visualizzazione delle 3D time – slice.

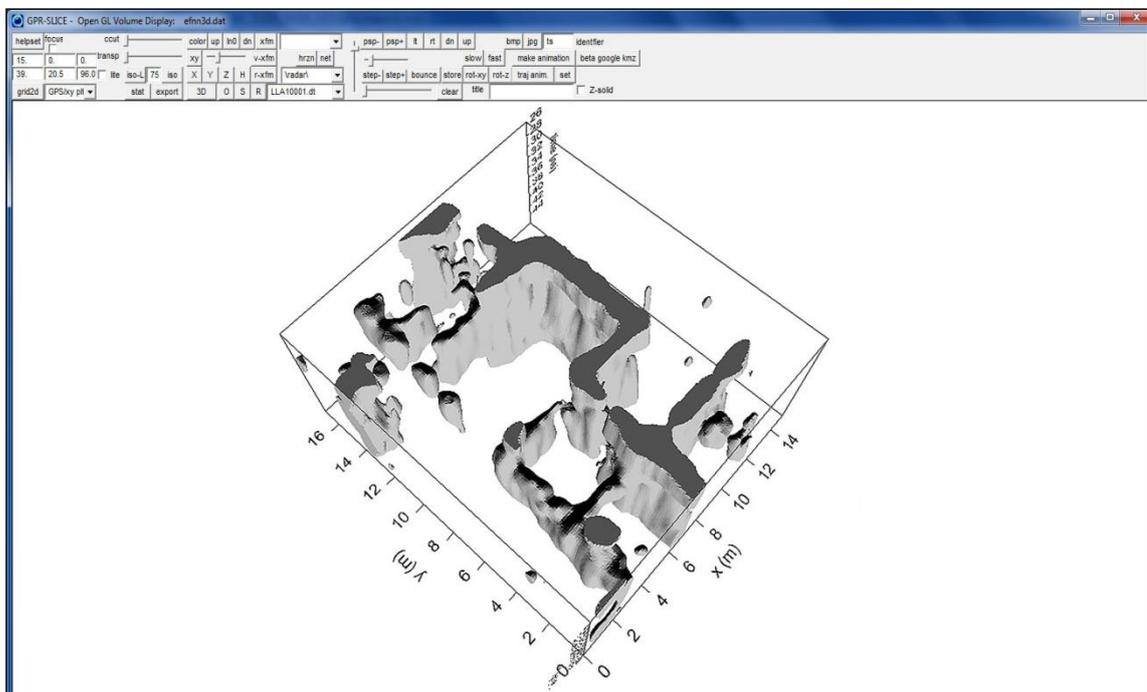


Figura 2.18. Software GPR-SLICE, visualizzazione di un solido tridimensionale.

### ***CAPITOLO 3 - TECNICHE GEOMATICHE PER IL RILIEVO DEI BENI CULTURALI.***

Dalla lista del patrimonio mondiale elaborata dall'UNESCO l'Italia risulta essere il Paese detentore del maggior patrimonio nel campo dei Beni Culturali al mondo. Requisito essenziale per la valorizzazione di questo patrimonio culturale è senza dubbio la sua conoscenza, sia nei termini più propriamente storico-artistici che per quanto concerne le caratteristiche di posizione, forma, geometria e colore. In questo senso il rilievo rappresenta l'operazione preliminare volta alla comprensione, alla conoscenza e alla successiva valorizzazione del bene. Questo settore ha suscitato, nel corso degli ultimi anni, un interesse sempre più frequente da parte della comunità scientifica che fa riferimento alle scienze del rilevamento; si è moltiplicato, infatti, il numero di convegni, congressi e workshop dedicati a questo tema.

Le nuove tecniche e tecnologie digitali offrono la possibilità di ottenere nuovi prodotti non solo dalle attività di rilievo, ma anche nella rappresentazione e nella visualizzazione, con lo scopo di avere una descrizione metrica accurata del territorio, di strutture, edifici e reperti; esse costituiscono potenti strumenti per l'analisi degli oggetti ed a supporto delle attività di ricostruzione e restauro. L'acquisizione ed il processamento dei dati devono essere realizzati prendendo in considerazione le caratteristiche di ogni tecnica in termini di capacità intrinseche (precisione, accuratezza e formato dei dati) con lo scopo di inserire tutti i prodotti in un comune *database* utile per molte applicazioni: divulgazione, documentazione, studi di stabilità delle strutture, documentazione di siti archeologici, documentazione del degrado, etc.

Nel campo dei Beni Culturali (in particolare per la documentazione di scavi archeologici) in relazione agli strumenti utilizzati si distinguono due tecniche fondamentali di rilievo (diretto e indiretto)<sup>70</sup>.

Con la prima definizione si intende che il rilievo comporta operazioni di misurazione a diretto contatto con gli oggetti da documentare e quindi immediatamente verificabili nei loro valori metrici. Per rappresentare la posizione dei punti nello spazio si esegue una trilaterazione (tecnica che permette di calcolare distanze fra punti sfruttando le proprietà dei triangoli) mediante l'utilizzo di strumenti semplici quali: fettucce metriche, fili a piombo, cordini e livelle, che vengono stesi lungo le superfici degli oggetti da riprodurre o

---

<sup>70</sup> BIANCHINI 2008, p. 71.

nelle loro vicinanze per misurare lunghezze, larghezze e per impostare gli allineamenti.

Il vantaggio principale offerto da questa tecnica di rilievo è che eventuali errori (misurazione, allineamento etc.) possono essere accertati in corso d'opera e quindi vi si potrà subito porre rimedio. Uno svantaggio invece risiede nella fase temporale, nel numero di operatori impiegati e nella precisione del rilievo.

Con la definizione di rilievo indiretto si intende che le misurazioni vengono effettuate con degli strumenti ottici, meccanici o informatici di grande precisione le quali svolgono una serie di calcoli al fine di ottenere una traduzione grafica degli oggetti rilevati all'interno di un sistema di coordinate spaziali.

Questa tecnica si è sviluppata in Europa a partire dal XVII secolo in ambito del rilevamento del territorio<sup>71</sup>.

Esistono vari tipi di strumenti per il rilievo indiretto quali: la stazione totale, il GPS, la fotogrammetria e il laser scanner, ognuno dei quali ha un suo specifico ambito di utilizzo<sup>72</sup>.

Si tratta di apparecchiature molto versatili che si prestano ad essere usate sia su scala territoriale (redazione di carte catastali o planimetrie) sia in contesti spaziali più ridotti come (beni architettonici e scavi archeologici). Questi strumenti rispetto al rilievo diretto offrono una maggior precisione e una fase temporale di acquisizione sul campo più breve. Lo svantaggio di queste strumentazioni risiede sia nel fattore economico (strumentazioni e software di elaborazione molto costosi) sia nelle capacità di utilizzo da parte dell'operatore (bisogna seguire specifici corsi di formazione).

In questo lavoro si è concentrati esclusivamente su tecniche di rilievo indiretto tridimensionale (laser scanner e fotogrammetria) che sono stati applicati e integrati in diversi casi studio in territorio nazionale ed internazionale.

### ***3.1 Il laser scanner tridimensionale.***

Vengono considerati scanner tridimensionali quegli strumenti in grado di rilevare, in un ridotto intervallo temporale e con una precisione millimetrica, la posizione spaziale di centinaia di migliaia di punti nello spazio circostante lo strumento; tutti questi punti elaborati tramite specifici *software* formeranno delle nuvole di punti.

Questa tecnologia rappresenta un nuovo ed efficiente metodo di rilevamento e negli ultimi anni ha conosciuto un notevole sviluppo. Il progresso tecnologico ha consentito di migliorare le strumentazioni sia in termini di caratteristiche strumentali (risoluzione, accuratezza, portata, ecc.) sia in termini di costi.

---

<sup>71</sup> BIANCHINI 2008, p. 72.

<sup>72</sup> MEDRI 2003, p.33.

La notevole versatilità unita all'elevata precisione che offre questa metodologia di rilievo ha permesso il suo utilizzo in molteplici campi d'acquisizione (rilievo architettonico e d'interni, documentazione di beni culturali e siti archeologici, ingegneria civile e analisi di scene del crimine ed incidenti).

Per l'acquisizione delle misure il laser scanner utilizza un raggio LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Esso (avente un diametro dell'ordine del millesimo di millimetro) è un'onda elettromagnetica formata da impulsi aventi stessa frequenza e fase nel tempo propagandosi per elevate distanze alla velocità della luce.

Il principio di funzionamento di un laser scanner è il seguente: Lo strumento per l'acquisizione dei punti emette (tramite un emettitore) un impulso elettromagnetico che viaggia nello spazio, quando incontra una superficie l'impulso viene riflesso all'indietro e ricevuto da un ricevitore. Dal tempo intercorso tra il tempo dell'emissione ( $t_0$ ) ed il tempo di lettura ( $t_1$ ) del raggio riflesso, lo strumento è in grado di determinare la distanza percorsa dal raggio.

Nel dettaglio, quando una radiazione colpisce una superficie essa viene in parte assorbita, in parte riflessa ed in parte trasmessa. Tali comportamenti sono funzione della lunghezza d'onda della radiazione incidente. Per classificare l'interazione tra energia e materia si possono definire i seguenti coefficienti adimensionali (variabili tra 0 e 1):

- Assorbimento: è il rapporto tra l'energia assorbita da una superficie e l'energia incidente secondo la formula:

$$E_A / E_I \quad (3.1)$$

- Riflessione: è il rapporto tra l'energia riflessa da una superficie e l'energia incidente:

$$E_R / E_I \quad (3.2)$$

- Trasmissione: è il rapporto tra l'energia trasmessa da una superficie e l'energia incidente:

$$E_T / E_I \quad (3.3)$$

La porzione di radiazione che una data superficie è capace di riflettere, e di conseguenza l'intensità con cui il segnale ritorna al sensore dello strumento, prende il nome di riflettanza.

In tabella 3.1 vengono riportati i valori di riflettanza di alcuni dei materiali più comuni che possono presentarsi all'interno di una scansione laser.

Vediamo schematicamente come è costituito il laser scanner. Nel centro dello strumento è posto l'emettitore del raggio, esso è solidale con l'asse verticale del goniometro posto sul piano orizzontale che determina gli angoli di rotazione del dispositivo su tale piano. Immediatamente di fronte l'emettitore è normalmente posto uno specchio solidale con

l'asse orizzontale (x, y) del goniometro verticale. Questo goniometro misura la posizione dello specchio e quindi del raggio luminoso sull'asse verticale (z). Misurando il tempo intercorso tra l'emissione e la riflessione del raggio si determina la distanza. Mediante il goniometro orizzontale, verticale e la distanza riusciamo a descrivere tutti i punti dello spazio circostante per mezzo di coordinate angolari delle polari. Successivamente elaborando i dati con specifici *software* riusciamo a rappresentare queste trasformazioni angolari in uno spazio cartesiano metrico.

	Materiale	Riflettanza
Comportamento	Carta bianca	Superiore al 100%
	Legno asciutto	94%
	Neve	80-90%
	Calcare, argilla	Superiore al 75%
	Alberi e foglie	Mediamente 60%
	Conifere	Mediamente 30%
	Sabbia	Mediamente 50%
	Calcestruzzo	24%
	Asfalto	17%
	Neoprene di colore nero	5%
	Gomma nera	2%
	Plastica opaca bianca	11%
	Plastica opaca nera	17%
	Plastica	Mediamente 50%

*Tabella 3.1. Riflettanza di alcuni dei materiali più comuni.*

Per ogni misurazione vengono acquisite due differenti tipi di mappe, una mappa di distanze ed una mappa dell'intensità del segnale di ritorno che descrive la superficie dell'oggetto

scansionato. Con la prima tipologia di mappa viene rappresentata la disposizione degli oggetti nell'ambiente, data dalle coordinate  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Le mappe di riflettanza (in toni di grigio) apparentemente possono sembrare “immagini fotografiche” e nel loro contenuto informativo è descritta la capacità che ha avuto una determinata superficie a riflettere il raggio laser (figura 3.1). Inoltre per facilitare la lettura del dato finale possono essere create delle mappe RGB che descrivono il colore naturale della superficie rilevata.



*Figura 3.1. Mappa di riflettanza.*

Sul mercato sono presenti numerosi modelli di laser scanner che si differenziano tra loro sul principio di misurazione del raggio, nella accuratezza del rilevamento, nella velocità di acquisizione e nella distanza massima raggiunta dal raggio laser. Le caratteristiche che differenziano i vari strumenti sono:

- **Accuratezza:** come tutti gli strumenti di misura la corrispondenza del valore misurato con il valore reale è un aspetto fondamentale. Come abbiamo già visto l'impulso laser viene direzionato sull'oggetto indagato tramite la rotazione di uno specchio deflettore e la conoscenza dei due angoli (azimutale e zenitale), che, associata alla misura della distanza, permette di individuare il punto nello spazio. Di conseguenza, ogni deviazione angolare nella rotazione degli specchi corrisponderà ad un errore nel posizionamento, minore sarà l'errore angolare maggiore sarà l'accuratezza del laser.
- **Risoluzione:** rappresenta la distanza minima che intercorre tra due punti rilevabili e di conseguenza sulla densità massima della nuvola di punti. Questo fattore può essere impostato dall'operatore al momento del rilievo.
- **Portata:** è il valore massimo di distanza a cui il sensore può effettuare la misura.

Esso dipende dalle caratteristiche del segnale emesso, dalla direzione con cui il raggio laser incide sulla superficie, dalle caratteristiche di riflettività del materiale e dalle condizioni ambientali. Superfici molto inclinate o materiali con un elevato potere radio-assorbente riducono l'intensità del segnale di ritorno limitando la portata dello strumento.

- Velocità di scansione: è funzione del metodo di misura dello strumento, della risoluzione scelta, del campo visivo di acquisizione, della distanza dall'oggetto e dalla velocità dei sistemi ottico-meccanici interni.
- Campo di scansione: In base all'asse attorno al quale può ruotare il sistema ottico-meccanico si ottengono diversi campi visivi. Questi possono variare da intervalli angolari, sia orizzontali che verticali, ben definiti ( $40 \times 40^\circ$ ,  $360 \times 80^\circ$ ) a campi quasi sferici ( $360 \times 320^\circ$ ) in base alle categorie dei laser.

Vi sono altre caratteristiche secondarie che possono risultare particolarmente convenienti in relazione al tipo di rilievo da svolgere. Tra queste possono essere annoverate la facilità di trasporto, la maneggevolezza e la possibilità di gestione in sito delle scansioni tramite software dedicati.

Nonostante le differenze di fabbrica dei diversi tipi di laser, questi ultimi possono essere classificati in due famiglie:

- Laser distanziometrici (*ranging scanner*): La posizione dell'emettitore (E) e del ricevitore (R) coincidono. La precisione nella misurazione è nell'ordine di millimetri o centimetri in base alla distanza tra dispositivo e oggetto da scansionare. Questi scanner possono utilizzare due tipologie di misurazione; tempo di volo (*Time of Flight*) (figura 3.2) o differenza di fase (*Phase – Based*) (figura 3.3). Nei laser scanner a tempo di volo la coordinata viene calcolata in base all'intervallo temporale intercorso tra l'emissione e la ricezione del raggio laser, secondo l'equazione:

$$d = (t_v c) / 2 \quad (3.4)$$

dove  $d$  è la distanza,  $t_v$  è il tempo di volo e  $c$  è la velocità della luce.

Questi dispositivi sono utilizzati principalmente per scansioni di oggetti grandi e distanti, avendo una portata che può raggiungere anche i 6.000 metri. Nei laser scanner a differenza di fase, invece, l'impulso emesso corrisponde ad un pattern illuminante che ha la forma di un'onda sinusoidale. In questo modo è possibile rilevare un oggetto con una maggiore accuratezza e precisione. Questi tipi di strumenti vengono utilizzati per scansionare oggetti di medie dimensioni con una portata generalmente di qualche centinaio di metri. Nei laser distanziometrici la

misura della posizione del punto considerato avviene in coordinate sferiche nel sistema di riferimento solidale con il centro dello strumento.

- Scanner a triangolazione (*Triangulation scanners*): emettitore (E) e ricevitore (R) sono separati da una distanza nota a priori (D), il principio di misurazione delle coordinate di un punto è analogo al processo di triangolazione che si effettua in topografia. La triangolazione ottica è utilizzata per scansioni ad altissima risoluzione di oggetti di dimensioni ridotte posizionati a brevi distanze. La precisione del rilievo in questo caso è sub-millimetrica (figura 3.4).

In base alla classificazione fatta, sul mercato esistono tre categorie di strumenti: I *Camera scanner*, i *Panorama scanner* e gli scanner ibridi, ossia che adottano una soluzione limitata nella rotazione di uno dei due assi. I *Camera scanner* (figura 3.5, sinistra) sono assimilabili alle macchine fotografiche in quanto hanno un campo visivo e l'intervallo angolare limitati. Questi vengono utilizzati soprattutto per il rilevamento ambientale. I *Panorama scanner* (figura 3.6, centro) hanno un campo visivo quasi sferico, limitato esclusivamente al cono d'ombra prodotto dal treppiede su cui poggia lo strumento. La quasi totale copertura del campo visivo rende questi tipi di strumenti adatti alla scansione di interni, siti archeologici e caverne.

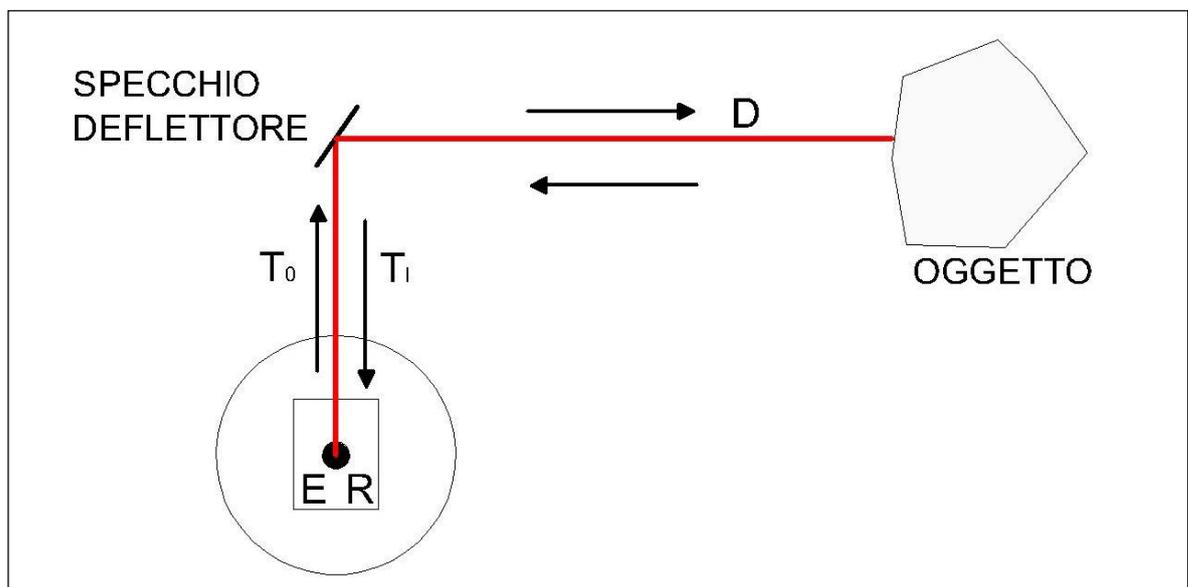


Figura 3.2. Schema di misurazione di un laser scanner a tempo di volo.

La terza categoria di scanner è rappresentata dai sistemi che possono compiere rotazioni complete solamente attorno ad uno degli assi, mentre quella intorno al secondo asse è

limitata entro i  $60^\circ$ -  $70^\circ$ <sup>73</sup> (figura 3.5, destra).

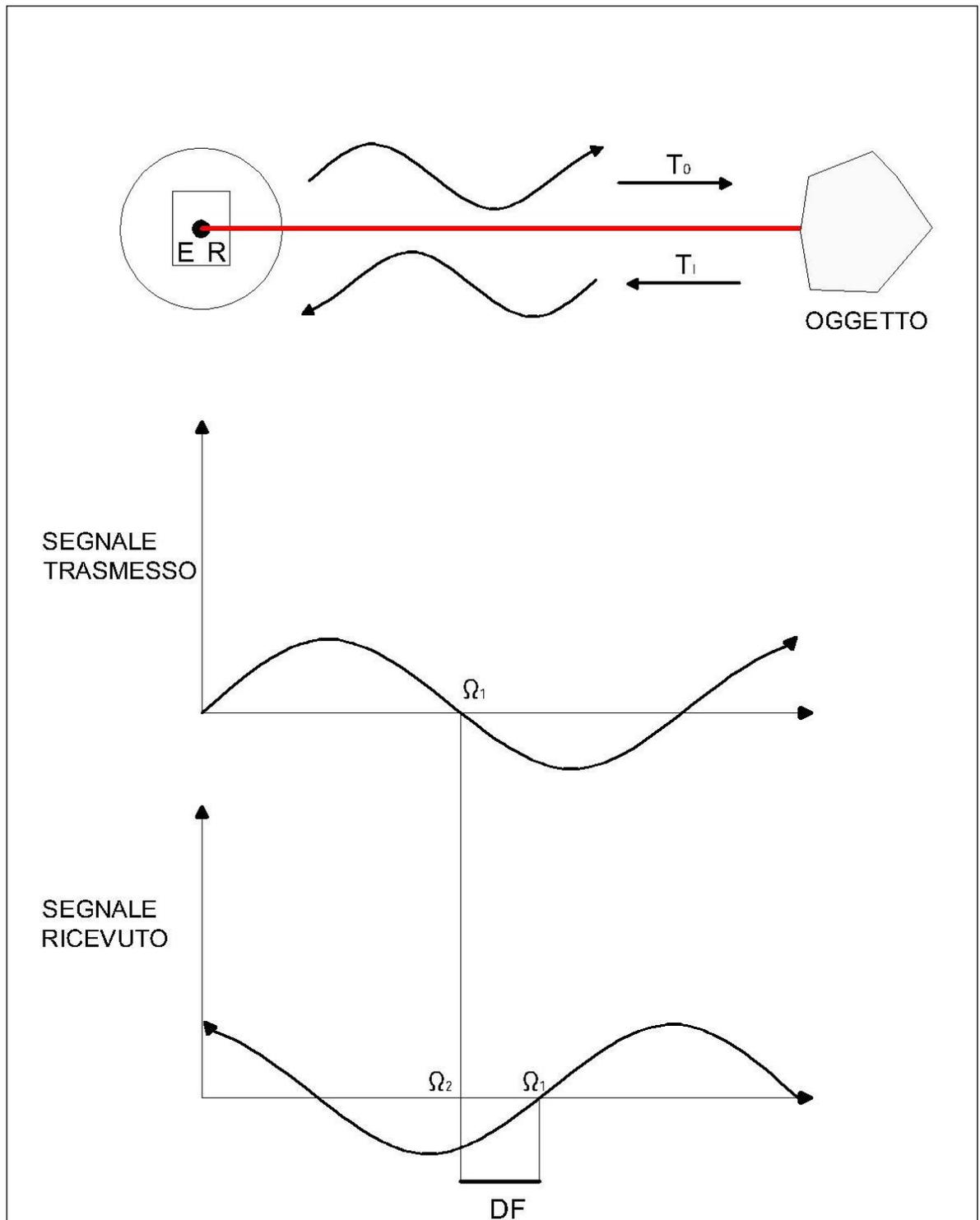


Figura 3.3. Schema di misurazione di un laser scanner a differenza di fase.

<sup>73</sup> SGRENZAROLI & VASSENA 2007, p. 15.

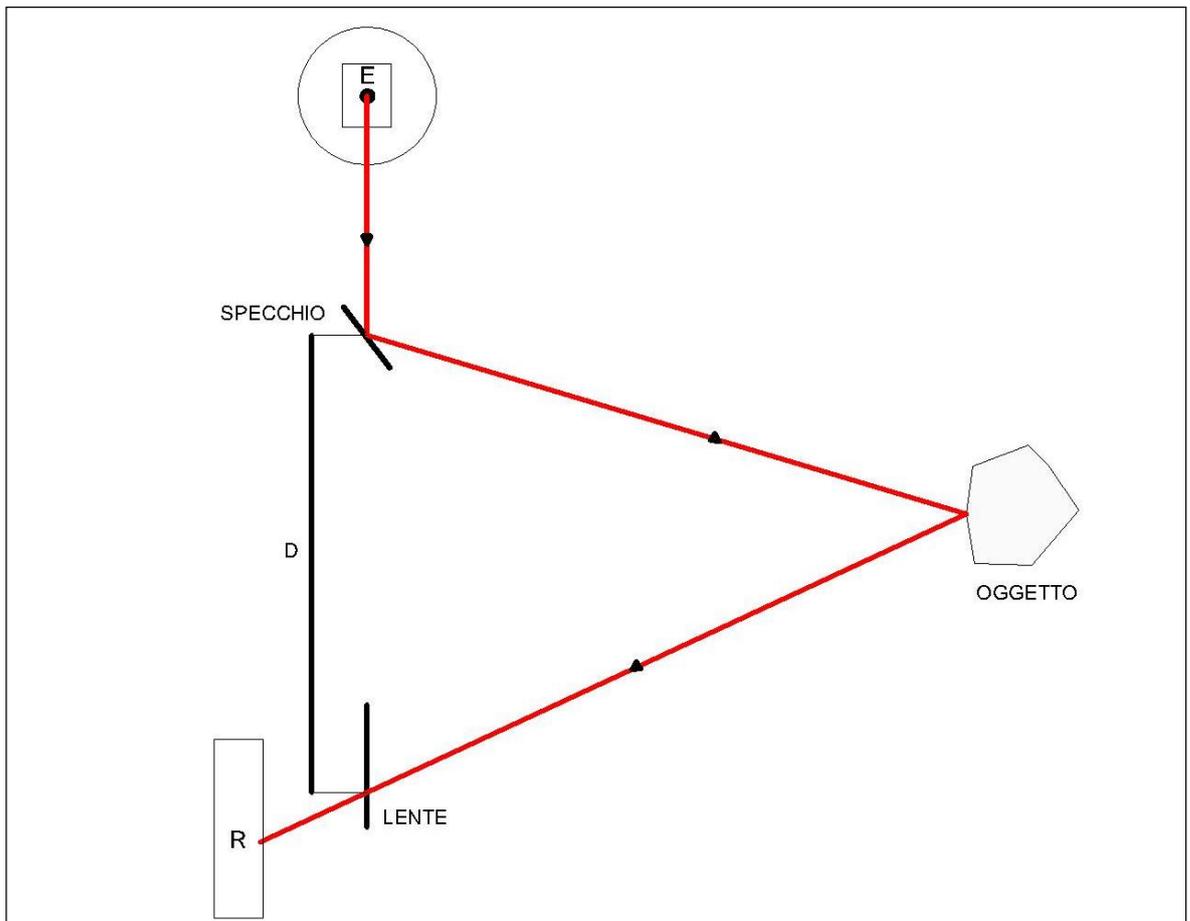


Figura 3.4. Schema di misurazione di uno scanner a triangolazione.

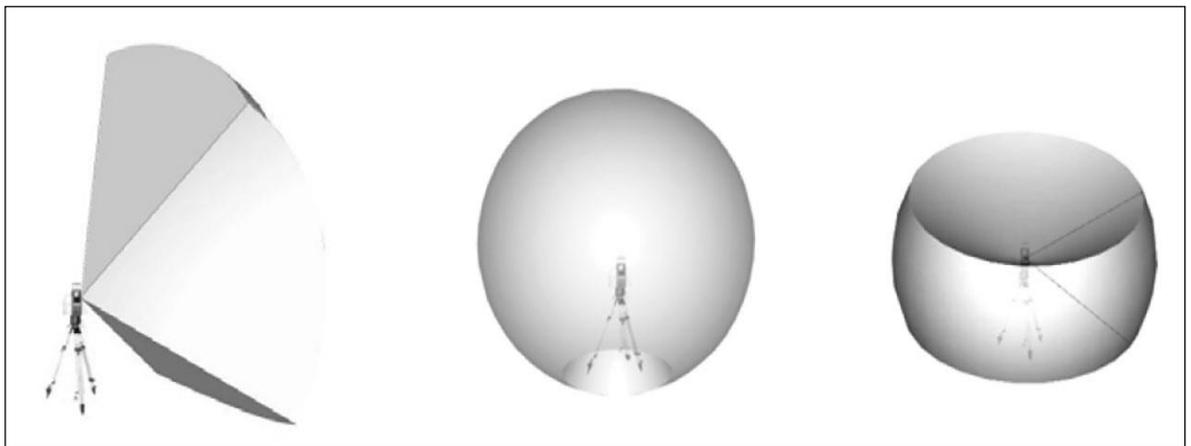


Figura 3.5. A sinistra i Camera scanner, al centro i Panorama scanner, a destra gli scanner di tipo ibrido, (da Sgrenzaroli, Vassena, 2007).

### 3.1.1 Strumentazione utilizzata per il rilievo laser scanner e procedure di acquisizione ed elaborazione dei dati.

Lo strumento con cui sono stati effettuati i rilievi in questa ricerca è un laser scanner Focus 3D MS120 della FARO (figura 3.6) che presenta le caratteristiche riportate in tabella 3.2.

Il dispositivo rientra nella famiglia degli scanner distanziometrici a differenza di fase<sup>74</sup>, ha una portata ottimale di circa 50 m e presenta una precisione di 2.5 mm.

Esso risulta di facile utilizzo grazie alla gestione tramite schermo *touch* e interfaccia grafica di elevata semplicità. La fotocamera integrata, di risoluzione non molto elevata, consente di acquisire e associare ad ogni punto rilevato le informazioni colorimetriche (RGB), così da restituire con maggiore fedeltà il modello tridimensionale e facilitare le operazioni di registrazione delle scansioni.

Grazie alle sue dimensioni particolarmente compatte lo strumento è risultato particolarmente maneggevole durante le fasi preparatorie di ciascuna scansione. In particolare, in presenza di pavimentazione non pianeggiante, l'esigenza di ricreare le condizioni di orizzontalità necessarie allo strumento per eseguire la scansione rendeva necessario agire direttamente sui supporti del treppiede. Il peso ridotto, dello strumento, ha consentito di svolgere questa operazione, utilizzando un solo operatore, in modo semplice ed efficace.



*Figura 3.6. Laser scanner Focus 3D MS120 della FARO.*

---

<sup>74</sup> si veda capitolo 3.1.

<b>SISTEMA LASER</b>	
Lunghezza d'onda	905 nm
Divergenza del raggio	0,16 mrad (0,009°)
Diametro del raggio (in uscita)	3,8 mm (circolare)
<b>UNITA' DI SCANSIONE</b>	
Principio operativo	Comparazione di fase
Accuratezza	± 2 mm a 10 m (25 m) con una riflettività della superficie del 10% (90%)
Precisione	A 10 m – dati grezzi: 0,6 mm rms con 90% refl.   1,2 mm rms con 10% refl. A 10 m – rumore filtrato: 0,3 mm rms con 90% refl.   0,6 mm rms con 10% refl. A 25 m – dati grezzi: 0,95 mm rms con 90% refl.   2,2 mm rms con 10% refl. A 25 m – rumore filtrato: 0,5 mm rms con 90% refl.   1,1 mm rms con 10% refl.
Portata	0,6 m – 20 m con superfici poco riflettenti, fino a 120 m con incidenza normale del raggio su superfici riflettenti (90%)
Velocità di acquisizione	Da 122.000 a 976.000 punti/secondo
Campo visivo	Verticale: 300° Orizzontale: 360°
Risoluzione angolare	0,009°
Dimensioni (peso)	240x200x100 mm (5Kg)
Dispositivi integrati	Unità colore: fotocamera integrata con adeguamento automatico della luminosità Sensore di altezza: barometro elettronico che restituisce l'altezza di ogni scansione rispetto ad un punto di riferimento Bussola: una bussola elettronica interna fornisce l'orientamento della scansione Inclinometro: una bolla elettronica interna serve a posizionare dritto lo strumento

Tabella 3.2. Caratteristiche tecniche del laser scanner utilizzato: sistema laser e unità di scansione, (da [www.faro.com](http://www.faro.com)).

Per quanto riguarda l'acquisizione delle scansioni la fase di progettazione delle prese con il laser scanner è un fattore fondamentale ed è determinato principalmente da:

- L'oggetto da rilevare: le dimensioni dell'oggetto e la sua complessità geometrica vincola non solo la tipologia di laser scanner da utilizzare ma anche la strategia di acquisizione. Prima di iniziare il rilevamento è sempre utile progettare il rilievo a tavolino possibilmente con una pianta alla mano per decidere il numero e la posizione sia dei *target* che delle scansioni al fine di garantire la corretta georeferenziazione delle scansioni. L'utilizzo dei *target* per rilevare oggetti aventi alta complessità geometrica è indispensabile. Essi possono essere di diverse tipologie (sfere, scacchiere, etc.) (figura 3.7).

Per creare un modello tridimensionale è necessario che ogni scansione, ottenuta spostando la posizione dello scanner in vari punti nello spazio (punto di stazione scanner), abbia una zona comune di sovrapposizione, comprendente non meno di tre punti facilmente riconoscibili nell'area scansionata.

Una maggiore precisione nell'allineamento e nella registrazione globale delle nuvole di punti può essere ottenuta rilevando i *target* con la stazione totale. L'ultima fase del rilievo in campo comprende la realizzazione di una campagna fotografica ad alta risoluzione dell'oggetto scansionato per la realizzazione del *mapping* fotorealistico del modello. I laser in commercio dispongono di una macchina fotografica interna, che acquisisce l'immagine digitale contemporaneamente alla scansione.

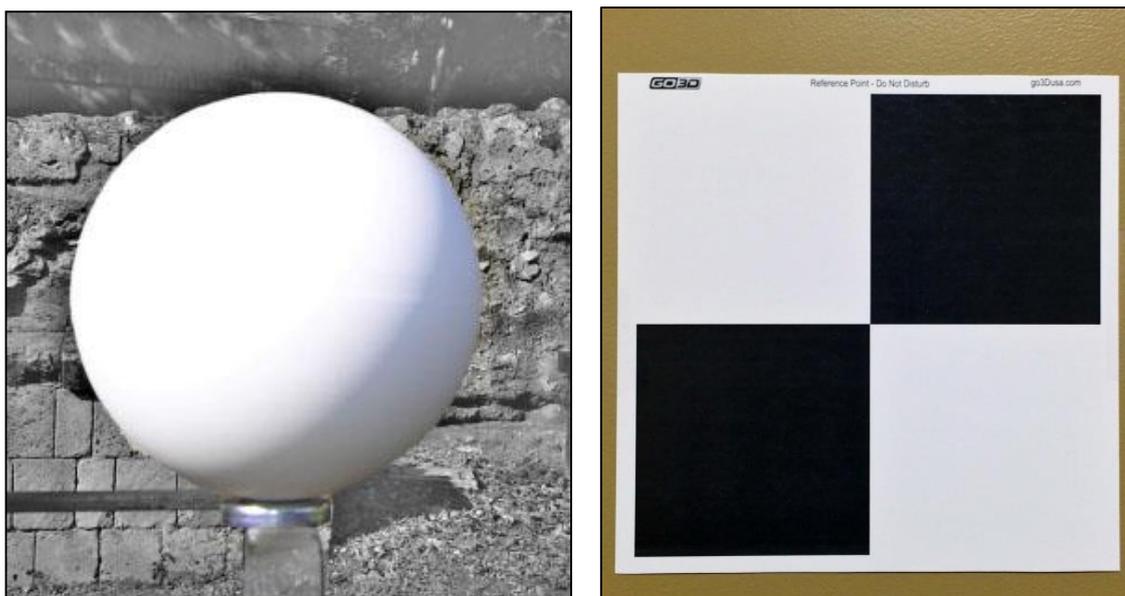


Figura 3.7. Target utilizzati per l'allineamento delle scansioni laser. A sinistra le sfere e a destra le scacchiere.

Solitamente le macchine fotografiche presenti nel laser hanno una risoluzione molto bassa; per ottenere ad esempio un ortofoto ad alta risoluzione dell'oggetto rilevato è utile acquisire fotografie di quest'ultimo, utilizzando una macchina fotografica esterna, che saranno successivamente spalmate sul modello tridimensionale ottenuto dalle scansioni laser. Viceversa se si deve effettuare un rilievo avente l'obiettivo di produrre esclusivamente pianta e sezioni le prese fotografiche non servono ed anche la densità della nuvola di punti dovrà essere minore.

- Risultato finale da ottenere: è bene stabilire a priori quale è il risultato finale che si vuole ottenere dal rilevamento con il laser scanner. Se ad esempio si vuole ottenere una vista ortografica della facciata di un edificio è consigliabile acquisire la geometria della facciata con prese il più ortogonali possibili ed eseguire, successivamente, una presa fotografica posizionandosi circa nella stessa posizione del laser scanner o sempre in maniera ortogonale dell'oggetto rilevato.

La procedura di restituzione dei dati rilevati con il laser scanner segue un processo completamente opposto al tradizionale metodo di rilievo. Nei rilievi con strumentazione topografica tradizionale la scelta degli elementi da rilevare viene fatta direttamente sul campo, al contrario, con il laser scanner vengono rilevate tutte le caratteristiche geometriche sia dell'oggetto sia dell'intero spazio circostante in tempi molto rapidi e solo in fase di elaborazione vengono scelti gli elementi di interesse. I tempi di elaborazione dipendono dal tipo di risultato che si vuole ottenere e vengono generalmente stimati in un rapporto di cinque volte superiori alla fase di acquisizione. L'elaborazione delle scansioni viene eseguita con programmi specialistici, idonei a trattare grandi volumi di dati e si svolge nelle seguenti fasi:

- Pre-processamento dati: consiste nel filtraggio della nuvola di punti in quanto i laser scanner sono soggetti a diversi rumori (errori di divergenza del raggio, errore strumentale dei goniometri, errore termico del sensore in fase di emissione e ricezione, etc.). Tutti questi rumori interni dello strumento possono essere trattati in fase di pre-processamento applicando filtri statistici che hanno lo scopo di eliminarli salvaguardando la complessità e la risoluzione della nuvola di punti.
- Allineamento delle scansioni: dopo l'acquisizione, le nuvole di punti devono essere roto-traslate secondo un medesimo sistema di riferimento. L'allineamento consiste nell'aggancio tramite *target* o punti omologhi delle nuvole di punti contigue.
- Mappatura del colore: la *texture mapping* è caratterizzato dall'associazione delle riprese fotografiche sul modello. Per eseguire questa operazione è necessario

individuare almeno undici punti omologhi tra l'area scansionata con il laser scanner e le immagini fotografiche. Questa operazione viene effettuata soprattutto su rilievi di carattere archeologico (documentazione di scavi e monumenti in antichi) dove il colore rappresenta un aspetto fondamentale per l'interpretazione del dato.

- Creazione delle *mesh* poligonali: consente di ricostruire la superficie dell'oggetto rilevato tramite l'interpolazione geometrica (triangoli quadrilateri) dei dati misurati. E' possibile impostare numerosi parametri per la costruzione delle *mesh* (dimensione e quantità di triangoli utilizzati) che influenzano fortemente il risultato finale.
- Estrazione dati: dal modello tridimensionale è possibile estrarre diverse informazioni (piante, sezioni, DEM) di tipo metrico necessarie alla valutazione dell'oggetto e della sua superficie. L'analisi geometrica rappresenta uno dei contributi fondamentali del rilevamento con laser scanner in quanto ogni calcolo risulta facilmente ricavabile direttamente dal computer.

### ***3.2 La fotogrammetria digitale.***

La fotogrammetria si basa su complesse analisi geometriche che consentono di ricavare, partendo da fotografie riprese da diversi punti, la forma, la dimensione e la posizione nello spazio di un qualunque oggetto.

Da un punto di vista geometrico una fotografia può essere assimilata ad una proiezione centrale ottenuta proiettando, dal centro di proiezione, i punti dell'oggetto su un piano (detto piano o quadro di proiezione).

In una macchina fotografica si identificano il centro di proiezione e il piano di proiezione rispettivamente ad un punto dell'obiettivo della fotocamera e al sensore della stessa, mentre le rette proiettanti vengono assimilate ai raggi luminosi che formano l'immagine. L'obiettivo fotografico è costituito da due punti nodali, posti lungo l'asse ottico ad una determinata distanza l'uno dall'altro. I raggi luminosi uscenti da ciascun punto della superficie di un oggetto prima di raggiungere il sensore, passano per il primo punto nodale N1, emergendo nello spazio interno alla fotocamera, una volta passati per dal secondo punto nodale N2 che funge da mezzo di registrazione (figura 3.8). Per semplicità è frequente far corrispondere il centro di presa con il primo punto nodale.

La proiezione centrale dell'oggetto nel sensore avviene al momento dello scatto dell'otturatore.

Per poter prendere misure di oggetti a partire dalle loro fotografie è necessario conoscere con precisione la geometria interna della macchina fotografica utilizzata, che è definita

dalla lente focale, dalla posizione del punto principale e dalla distorsione della lente. La lente focale è chiamata distanza principale e rappresenta la distanza del centro di proiezione dal punto principale del piano dell'immagine.

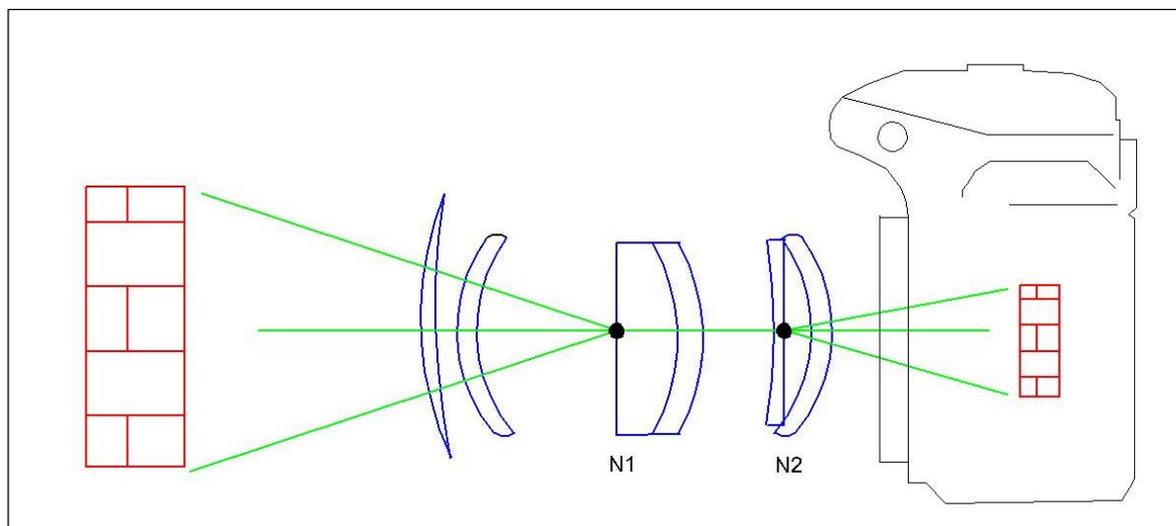


Figura 3.8. Schema di proiezione di una macchina fotografica; (blu) obiettivo fotografico con la posizione dei due punti nodali (N1-N2); (verde) rette proiettanti; (rosso) oggetto ripreso.

Fino a pochi decenni fa la fotogrammetria tradizionale rappresentava una tecnica di documentazione che esigeva l'impiego di attrezzature molto sofisticate e costose che solo un personale altamente qualificato era in grado di manipolare. La rivoluzione digitale ha comportato notevoli innovazioni alle tecniche fotogrammetriche. A partire dagli anni '90, con l'evoluzione tecnologica e con il progressivo miglioramento dei computer e della grafica computerizzata (in grado di gestire un grande numero di dati), la fotogrammetria digitale si è sviluppata enormemente sostituendo quella tradizionale e diventando una delle tecniche di acquisizione dei dati architettonici e territoriali tra le più attendibili, veloci ed affidabili.

La differenza tra le due categorie di fotogrammetria (tradizionale e digitale) consiste dal diverso modo di registrare l'immagine da parte della fotocamera. In quelle analogiche questo avviene su pellicola, nelle fotocamere digitali, invece, avviene mediante due tipi di sensori: *Charge-Coupled Device* (CCD dispositivo ad accoppiamento di carica) e *Complementary Metal Oxide Semiconductor* (CMOS semiconduttore a metallo ossido complementare).

Entrambi i sensori hanno come elemento di base il fotodiodo, ossia l'elemento fotosensibile che, colpito da un raggio di luce, genera una carica elettrica. La differenza tra i due tipi di

sensori consiste nella modalità con cui avviene la trasformazione della carica elettrica in tensione ed il suo trasferimento dal *chip* alla camera.

Nel caso del sensore *CCD*, la carica elettrica di ogni pixel viene trasferita ad un “nodo” di output (*chip*) per essere poi convertita tutta insieme in tensione, memorizzata ed inviata come segnale analogico alla camera che lo trasferisce come *digital number*. Tutti i fotodiodi sono dedicati esclusivamente alla lettura della luce e l'uniformità del segnale generato è alta. In un sensore *CMOS* la trasformazione della carica elettrica a tensione avviene all'interno di ogni pixel ed il *chip* trasferisce direttamente il *digital Number* (figura 3.9).

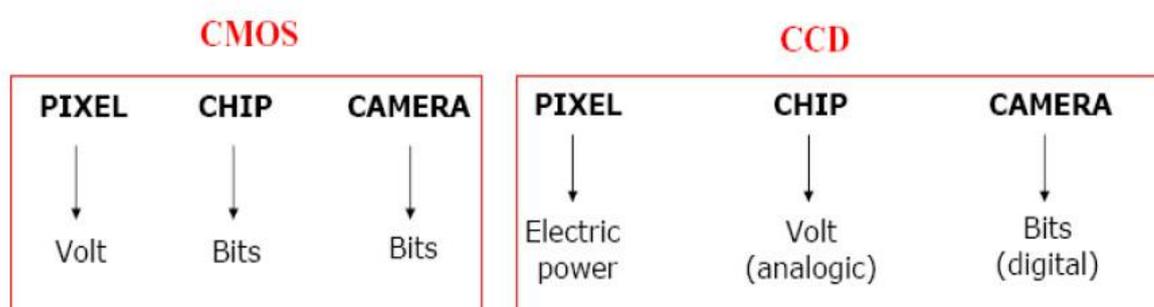


Figura 3.9. Conversione e trasferimento del segnale digitale nei sensori CMOS e CCD (da Grielli, 2006).

La maggior parte delle camere amatoriali a medio e basso costo utilizza sensori *CCD* a matrice che impiegano la tecnologia *Interline Transfer*, le camere professionali invece, molto più costose, utilizzano una tecnologia *Frame Transfer* (figura 3.10).

In pratica nelle camere professionali in ogni diodo foto-sensibile c'è una memoria che serve per conservare e trasferire l'informazione acquisita, cioè la carica elettrica; nelle camere commerciali invece esiste un'unica memoria che immagazzina i dati corrispondenti a più diodi di una stessa riga del sensore e poi la trasferisce; questo determina uno *shift* temporale nella registrazione del dato.

Gli strumenti fotografici, utilizzati in fotogrammetria, si dividono in tre categorie:

- Camere metriche: questo tipo di camere sono costruite appositamente per usi fotogrammetrici, le geometrie interne sono stabili e note e vengono normalmente determinate dal costruttore nella messa a punto della camera. Lo stesso costruttore fornisce quindi con la camera i valori della distanza focale, della distorsione radiale e della distanza focale calibrata. Gli elementi risultanti dalla calibrazione vengono normalmente riportati in un documento detto certificato di calibrazione. Le foto

prodotte sono definibili fotogrammi, cioè fotografie metriche, sulla quale cioè si possa eseguire la misura delle coordinate cartesiane dei punti-immagine con un'alta precisione. Si tratta, dunque, di strumentazioni di alta precisione il cui svantaggio è costituito da un costo molto elevato.

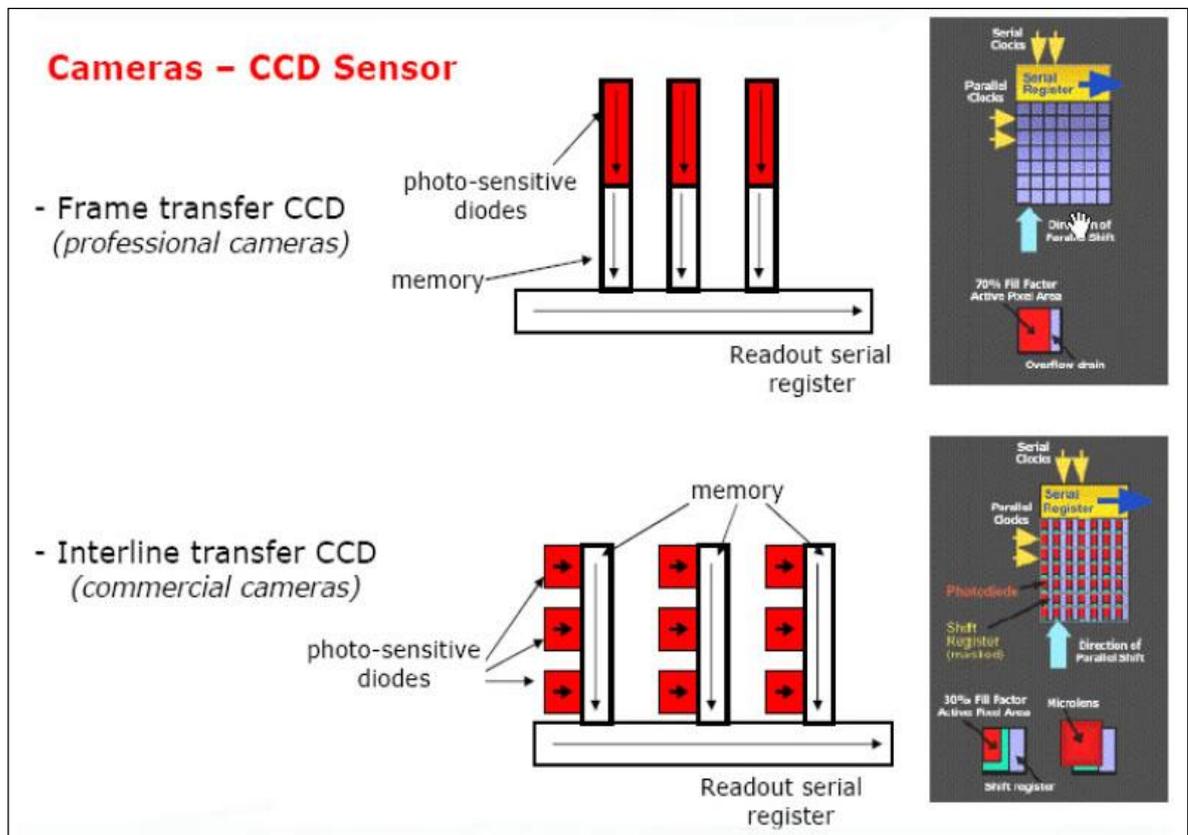


Figura 3.10. Differenza fra la tecnologia Frame Transfer e Interline Transfer per un sensore CCD (da Girelli, 2006).

- Camere stereometriche: Un camera stereometrica consiste da due camere metriche, dotate delle stesse caratteristiche geometriche, montate alle estremità di una barra, che ha una lunghezza nota (di solito 120 o 140 cm.) e che funziona come base.
- Camere amatoriali: Si parla di camere amatoriali quando la geometria interna non è stabile e nota, come accade con le normali macchine fotografiche in commercio.

In base alla posizione della fotocamera e dell'oggetto rilevato si distinguono:

- fotogrammetria aerea:
  - fotogrammetria a lunga distanza: con la messa a fuoco della fotocamera impostata su “infinito” e una distanza di circa 300 m tra l'oggetto ripreso e il sensore;
  - fotogrammetria dei vicini o *Close-Range Photogrammetry*: con la regolazione

della messa a fuoco della fotocamera impostata su valori finiti e una distanza inferiore a 300 m tra l'oggetto ripreso e il sensore.

- Fotogrammetria terrestre:
  - fotogrammetria topografica: rilevamenti urbani e territoriali;
  - fotogrammetria non topografica: rilevamenti architettonici e dei beni archeologici.

Il formato delle immagini digitali maggiormente utilizzato in ambito fotogrammetrico sono il TIFF (*Tag Image File Format*) un tipo di formato che permette sia di memorizzare in un unico file più immagini, sia di adottare un sistema di compressione e decompressione non distruttiva, in grado di dimezzare le dimensioni del file su immagini RGB e il JPEG (*Joint Photographic Experts Group*).

Le operazioni comunemente eseguite da un sistema fotogrammetrico digitale sono l'importazione ed esportazione di formati (dwg, jpg, tiff, ecc.), l'estrazione automatica del DEM, la restituzione stereoscopica vettoriale e la produzione di ortofoto digitali.

### ***3.2.1. Strumentazione utilizzata per il rilievo fotogrammetrico e procedure di acquisizione ed elaborazione dei dati.***

La macchinetta fotografica utilizzata in questa ricerca per effettuare i rilievi fotogrammetrici è una reflex Nikon D80 dotata di sensore *CCD* (23,6 x 15,8 mm) da 12,2 milioni di *pixel* e lunghezza focale di 24 mm (figura 3.11).

Quando si acquisiscono immagini fotografiche per un buon esito del risultato è utile impostare bene determinati parametri quali:

- Modi di esposizione: l'esposizione rappresenta la quantità di luce che viene fatta giungere al sensore ed è influenzata dal tempo di scatto o tempo di esposizione, dal diaframma e dalla sensibilità (ISO).
- Tempo di scatto o tempo di esposizione: determina quanto tempo l'otturatore deve rimanere aperto per consentire alla luce di raggiungere il sensore ed è proporzionale all'apertura del diaframma. A parità di luce diaframmi aperti avranno tempi di scatto brevi, viceversa diaframmi chiusi avranno tempi di scatto più lunghi.
- Diaframma: secondo la sua apertura determina la quantità di luce che raggiunge il sensore nel periodo di tempo entro cui l'otturatore rimane aperto. La sua apertura incide anche sulla profondità di campo. Aprendo il diaframma (valori numerici più bassi) la profondità di campo si riduce ed è possibile isolare il soggetto mantenendolo nitido davanti ad uno sfondo più sfumato. Chiudendo il diaframma

(valori numerici più alti) la profondità di campo aumenta ed è possibile avere nitidi soggetti esposti a distanze diverse.

- ISO: rappresenta la sensibilità del sensore alla luce. Questo valore viene impostato dall'operatore in relazione alla quantità di luce e alla qualità dell'immagine che si vuole. A parità di luce con valori di ISO bassi si ottengono immagini di qualità superiori.



*Figura 3.11. Reflex Nikon D80.*

Stando a quanto detto in questa ricerca la macchinetta fotografica è stata settata in modalità automatica a priorità di diaframma (A). Questa funzione permette all'operatore di decidere l'apertura del diaframma e in base a questo valore la macchinetta fotografica stabilisce la velocità di scatto per una corretta esposizione. Visto che le prese fotografiche sono state effettuate in siti archeologici all'aperto (con molta luce) è stato settato un'apertura di diaframma di  $f/9$  con una velocità di scatto mediamente pari a 0.64 secondi. Per quanto riguarda la sensibilità volendo sfruttare al massimo la qualità dell'immagine è stato impostato un ISO (variabile da 100 a 1600) pari a 100.

Per effettuare un rilievo fotogrammetrico la fase più delicata consiste nella presa delle immagini. Ci sono varie tecniche di acquisizione<sup>75</sup> da utilizzare in base al risultato che si vuole ottenere, nel dettaglio abbiamo:

- Presa in singola immagine: consiste nel fotografare un oggetto da un'unica posizione (figura 3.12). In fase di elaborazione grazie a specifici *software* di foto raddrizzamento si può raddrizzare l'immagine fotografica eliminando le deformazioni prospettiche (figura 3.13).

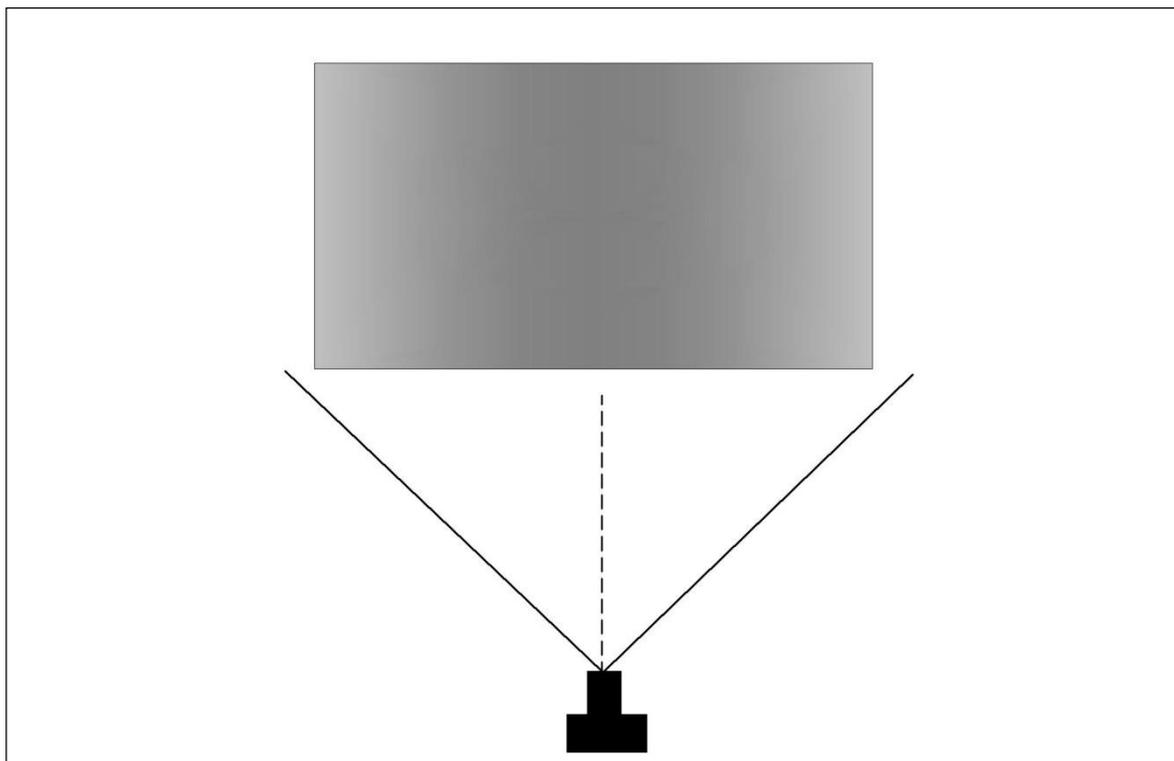


Figura 3.12. Acquisizione del dato secondo il sistema di presa della singola immagine.

- *Presca stereoscopica* Per ogni lato dell'oggetto da rilevare vengono eseguite due o più prese. Per essere allineati correttamente i fotogrammi devono parzialmente sovrapporsi, ossia comprendere una porzione comune dell'oggetto ripreso pari almeno al 60%. Infatti come detto precedentemente la ripresa fotografica dello stesso oggetto effettuata da più punti di vista differenti consente di risolvere in modo univoco il sistema di equazioni formato dalle rette che congiungono il punto dell'immagine con il punto nodale dell'obiettivo (figura 3.14).

---

<sup>75</sup> KASSER & EGELS, 2002.

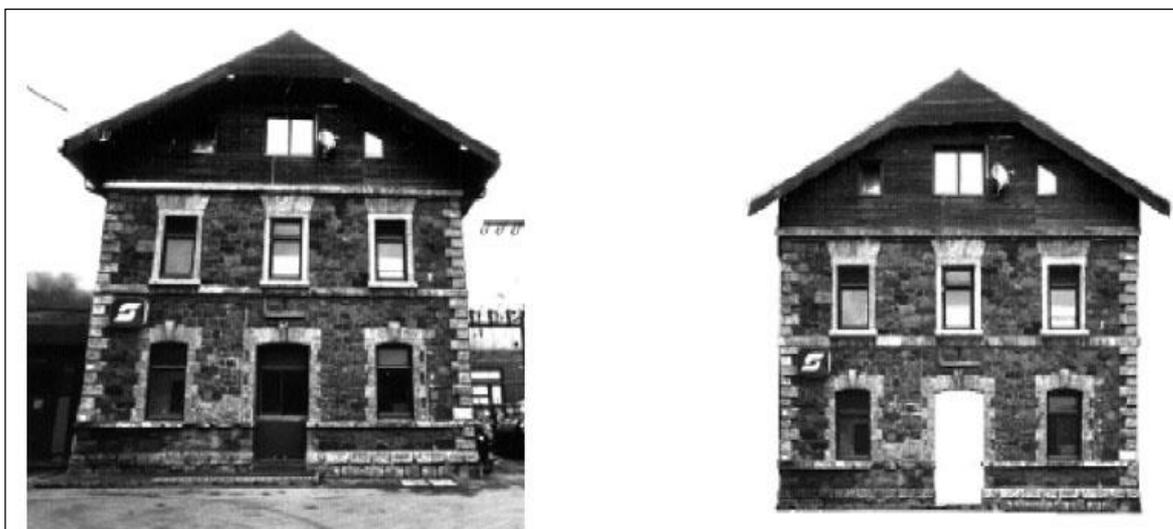


Figura 3.13. A destra fotogramma originale di una facciata di un edificio, a sinistra fotogramma raddrizzato (da Kasser & Egels, 2002).

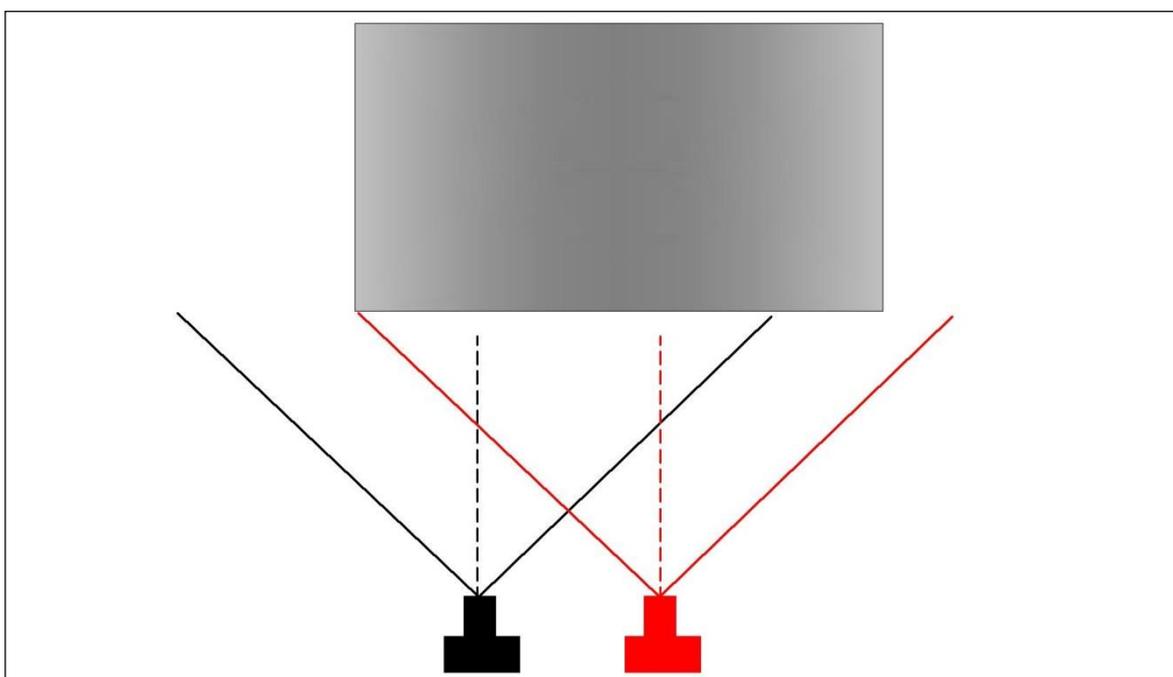


Figura 3.14. Acquisizione del dato secondo il sistema di presa stereoscopica, con i differenti colori vengono rappresentati gli spostamenti nello spazio della macchina fotografica.

- Presa secondo il metodo dei fasci proiettivi o *bundle restitution*: generalmente accade che l'edificio o l'oggetto da rilevare sia troppo complicato come dimensioni o come geometria per poter essere rilevato solo tramite prese stereoscopiche. In questo caso devono essere effettuate un gran numero di immagini da diversi punti di vista intorno all'oggetto e con assi convergenti. Anche in questo caso i

fotogrammi devono avere una porzione comune dell'oggetto ripreso pari almeno al 60% (figura 3.15).

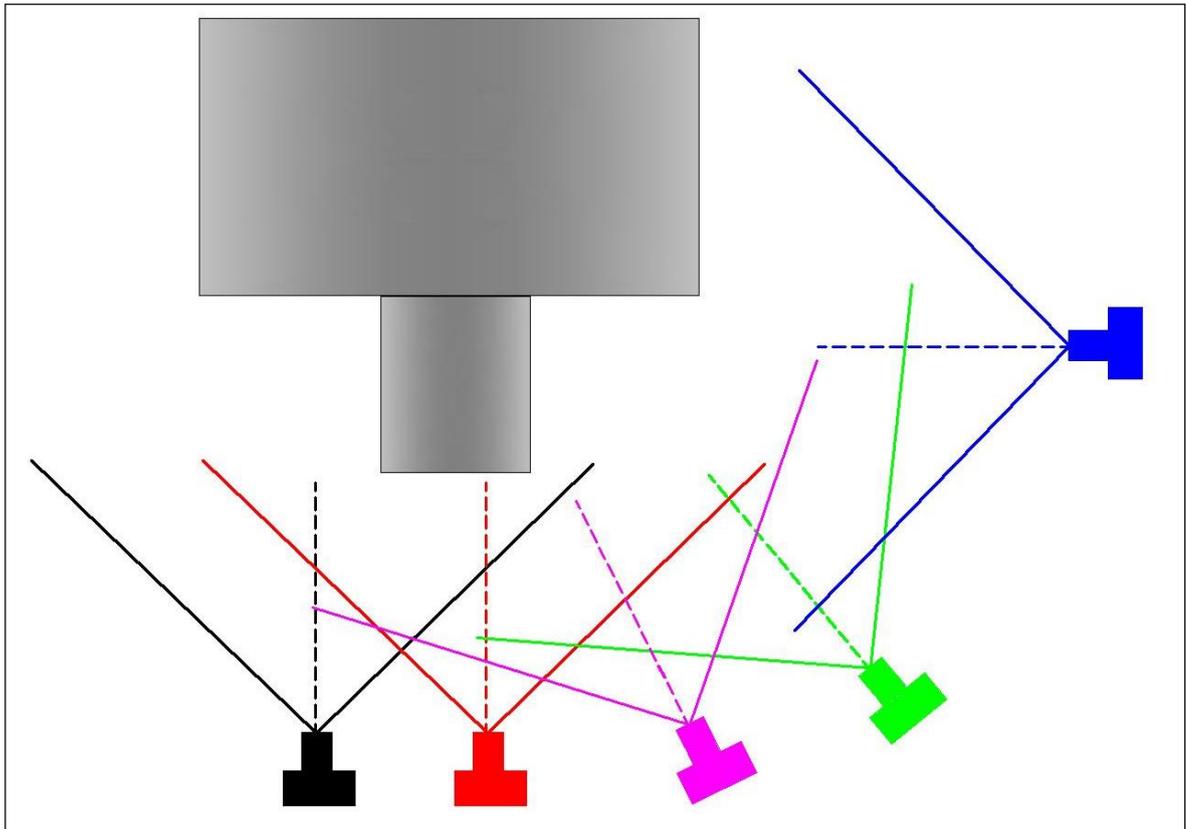


Figura 3.15. Acquisizione del dato secondo il sistema di presa per fasci proiettivi o bundle restitution, con i differenti colori vengono rappresentati gli spostamenti nello spazio della macchina fotografica.

Il lavoro di elaborazione viene svolto interamente al computer utilizzando appositi *software* di fotogrammetria ed è articolato in tre passaggi: allineamento dei fotogrammi, costruzione della geometria e creazione della *texture*.

Un ulteriore *step* da effettuare prima di iniziare con la fase di elaborazione è quello che riguarda il miglioramento delle immagini. Quando si acquisiscono fotografie di un oggetto da diverse angolazioni queste presentano una disuguale esposizione alla luce e quindi luminosità differenti. Per uniformare la luminosità, il contrasto ed eliminare eventuali difetti che possono presentarsi in fase di acquisizione vengono utilizzati programmi di grafica (es. Photoshop). Il trattamento grafico rappresenta un'operazione indispensabile e può essere effettuato esclusivamente se le immagini sono state acquisite in formato RAW<sup>76</sup>.

<sup>76</sup> Il formato RAW o "grezzo" indica che l'immagine acquisita dal sensore della macchina fotografica viene

Il *software* di elaborazione utilizzato in questa ricerca è stato Agisoft PhotoScan. Questo programma consente la creazione di modelli tridimensionali ad alta risoluzione utilizzando immagini fotografiche. Vediamo nel dettaglio i tre passaggi sopra citati per la corretta creazione di un modello fotogrammetrico tridimensionale.

- Allineamento dei fotogrammi: per eseguire l'allineamento delle fotografie il software utilizza la tecnica denominata *Structure From Motion (SFM)*. Questo metodo consente la ricostruzione della geometria della scena tridimensionale e delle posizioni nello spazio della fotocamera al momento della presa. Per operare la ricostruzione l'algoritmo *SFM* individua punti caratteristici dell'immagine bidimensionale (bordi dell'oggetto o punti caratteristici) e rintraccia gli stessi punti nelle immagini successive.

L'allineamento può essere effettuato secondo tre differenti gradi di qualità: alto, medio e basso ed in base a questi parametri si avrà una precisione maggiore o minore della restituzione con un conseguenziale aumento/diminuzione dei tempi di elaborazione. Generalmente quando si lavora con molte immagini è consigliabile procedere prima con un allineamento di bassa qualità in modo da accorciare i tempi di processamento del *software* individuando subito le fotografie alle quali è associato un errore più elevato di quello preventivato. Le immagini alle quali sono associati gli errori più alti potrebbero essere sfocate oppure essere state acquisite senza la giusta sovrapposizione. In questo caso è consigliabile rimuovere le foto che creano problemi e procedere con l'allineamento in base alla qualità desiderata. Al termine di questo processo il programma fornirà tre *set* di dati: una nuvola di punti discreta (formata da poche migliaia di punti che descriverà la geometria dell'oggetto), le posizioni della fotocamera all'atto dell'acquisizione dei fotogrammi (figura 3.16) e i parametri interni di calibrazione della fotocamera (lunghezza focale, tre coefficienti di distorsione radiale e due tangenziale rispetto ad un punto principale). La conoscenza di questi parametri consentirà al software di eliminare le distorsioni introdotte dall'obiettivo.

- Costruzione della geometria: dopo aver allineato correttamente le fotografie si procede con la costruzione della nuvola densa. Anche in questo caso è possibile scegliere l'accuratezza del processo in base a cinque parametri (altissimo, alto, medio basso e bassissimo) che incideranno sulla risoluzione del prodotto finale e sui tempi di elaborazione.

---

registrata nella sua forma originaria, ossia, non è soggetta a successive elaborazioni (bilanciamento del bianco, miglioramento del contrasto e della luminosità, etc.) da parte del sensore.

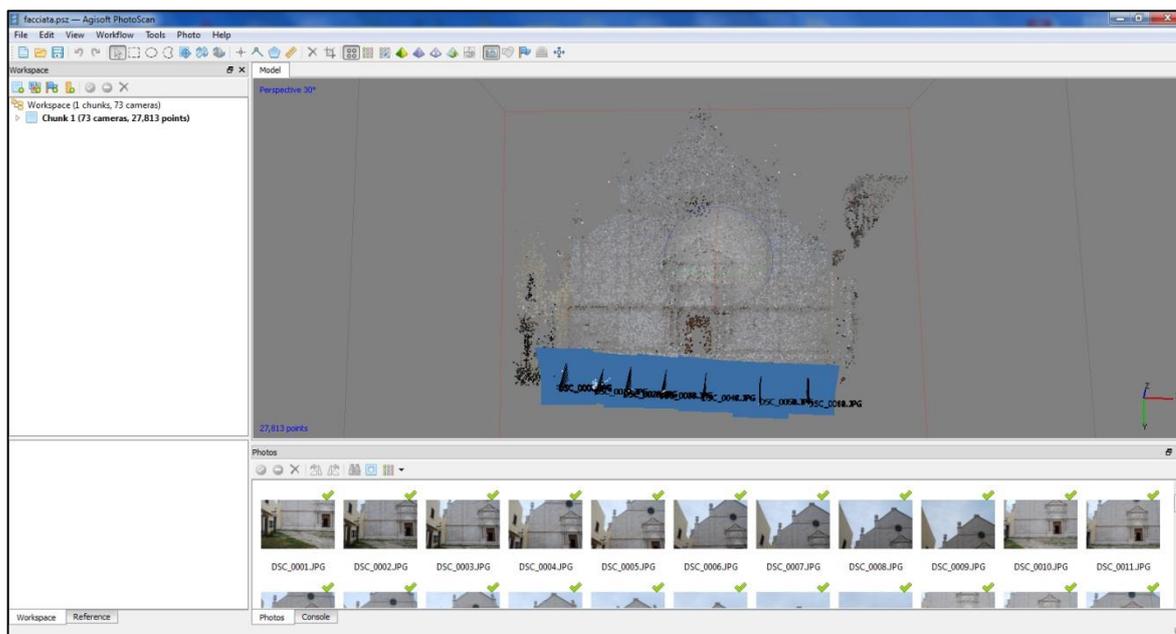


Figura 3.16. Agisoft PhotoScan: nuvola di punti discreta e posizioni delle fotocamera elaborate dopo la fase di allineamento delle immagini.

Questa fase è quella che richiede tempi di processamento più elevati, dunque, per avere un buon risultato in termini di qualità/tempo è consigliabile (dipendentemente dal numero di foto, dalla potenza del computer utilizzato e dal dettaglio che vuole avere) impostare una qualità media. Il risultato finale di questo processo vedrà la costruzione di una nuvola densa di punti (figura 3.17). Lo *step* successivo per la costruzione della geometria del modello vede la creazione delle *mesh*. In questa fase è possibile trasformare le nuvole di punti in superfici. Anche qui abbiamo quattro qualità di precisione (alta, media, bassa e personalizzata) che influiscono sulla risoluzione del prodotto finale e sui tempi di elaborazione. Al termine di questo processo la nuvola di punti sarà trasformata in una superficie composta da un numero  $x$  di punti triangolati (in base al numero di facce create) (figura 3.18).

- Costruzione della texture: con questa fase vengono applicate le immagini fotografiche ed è possibile selezionare la modalità di costruzione tra tre diverse scelte (Generico, Ortofoto e foto singola). Per impostazione predefinita si ha la mappatura generica che non considera la forma dell'oggetto ricostruito, mentre, stando alle indicazioni dei produttori, per superfici piane si hanno risultati migliori con la modalità ortofoto (figura 3.19). Alla fine di questo processo il modello tridimensionale è completo e la sua risoluzione dipende dai parametri che abbiamo impostato precedentemente. Successivamente a quest'ultima fase di elaborazione si procede con l'esportazione del modello in diversi formati (.dxf, .obj, .txt, .pdf, etc.)

e con la creazione di ortofoto in formati TIFF, JPEG, PNG, etc. (figura 3.20).

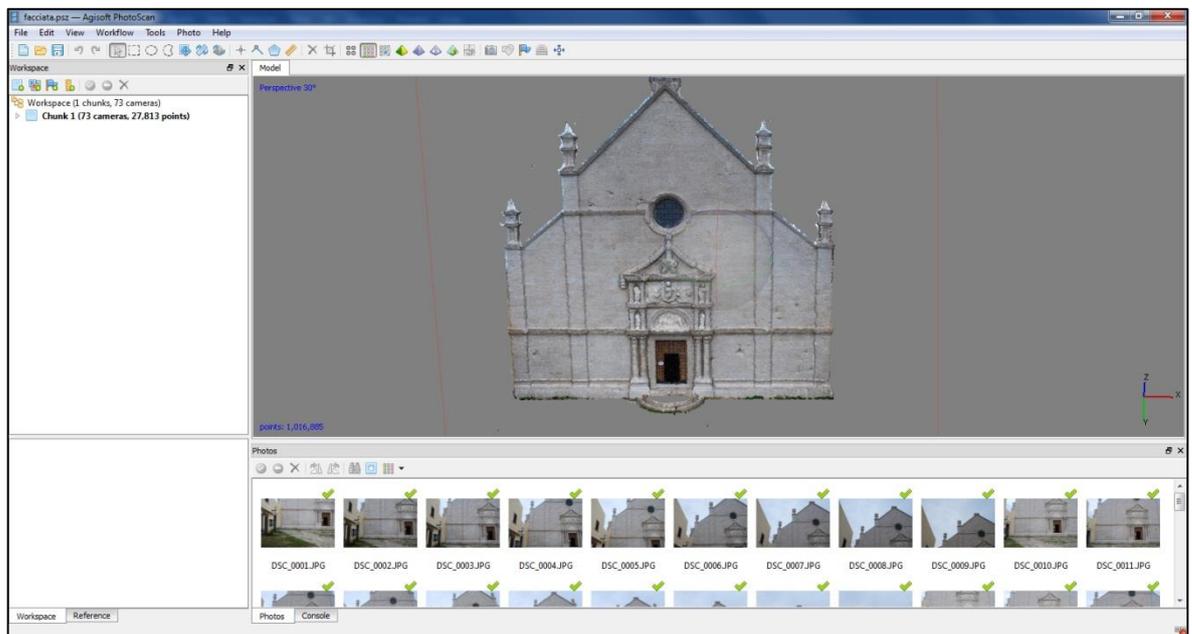


Figura 3.17. Agisoft PhotoScan: costruzione della nuvola densa.

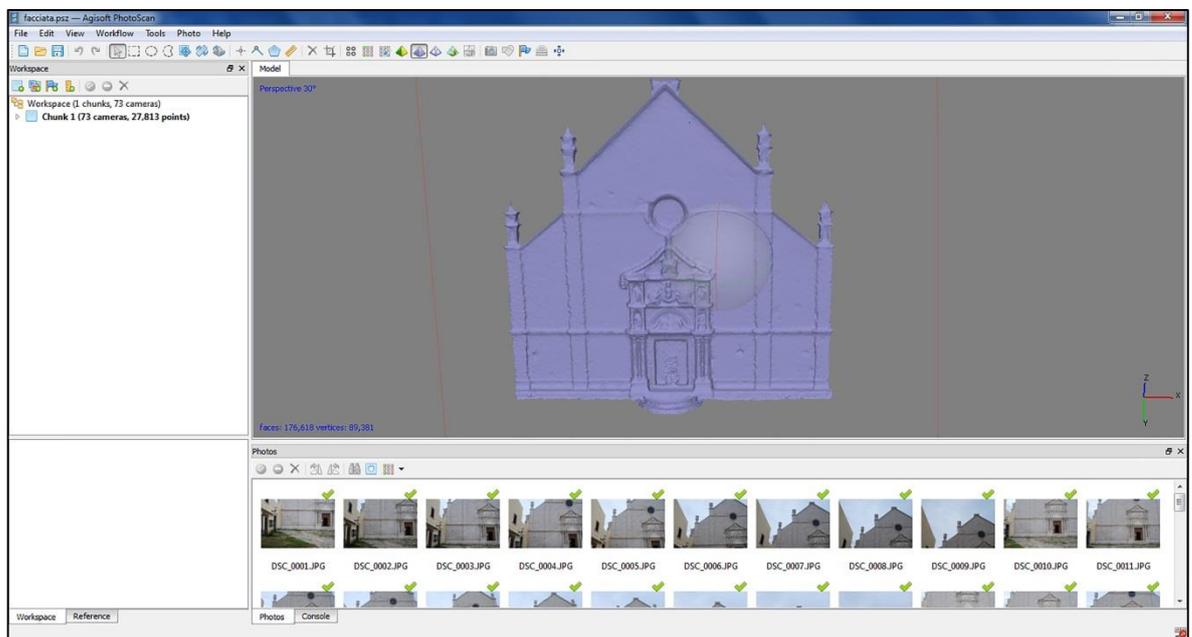
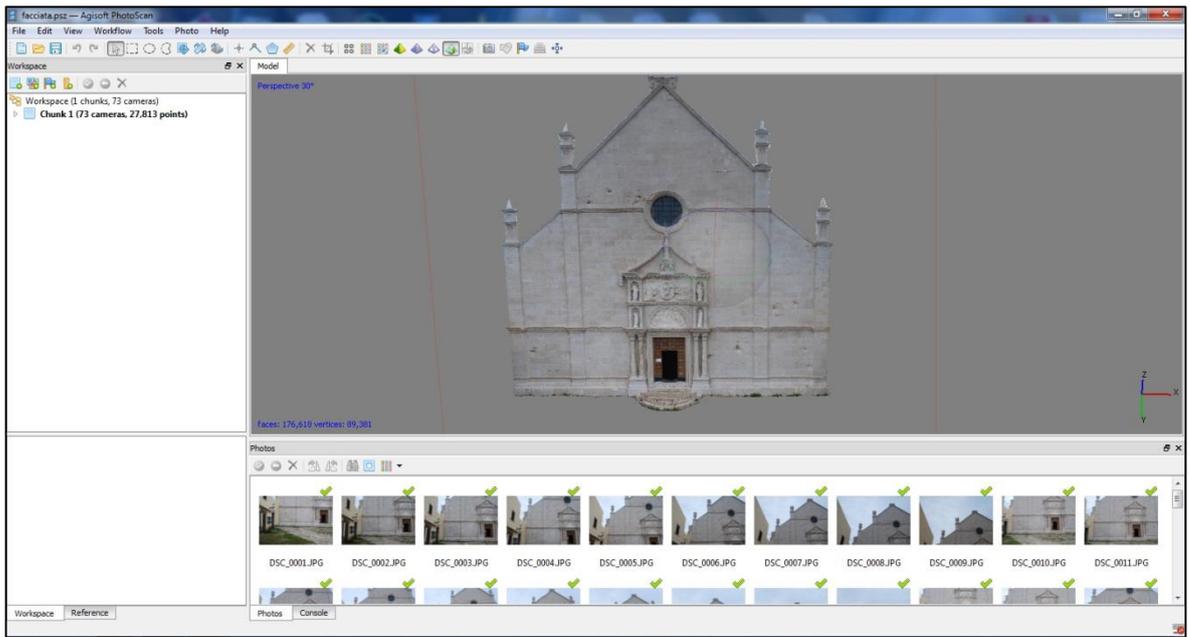


Figura 3.18. Agisoft PhotoScan: costruzione delle mesh.



*Figura 3.19. Agisoft PhotoScan: costruzione della texture.*



*Figura 3.20. Ortofoto di dettaglio estrapolata dal software Agisoft PhotoScan.*

## CAPITOLO 4 – IL PARCO ARCHEOLOGICO DI EGNAZIA.

### 4.1 Inquadramento storico archeologico.

Il Parco Archeologico di Egnazia è situato in Puglia, nel territorio comunale di Fasano, lungo il tratto litoraneo tra Bari e Brindisi (figura 4.1).



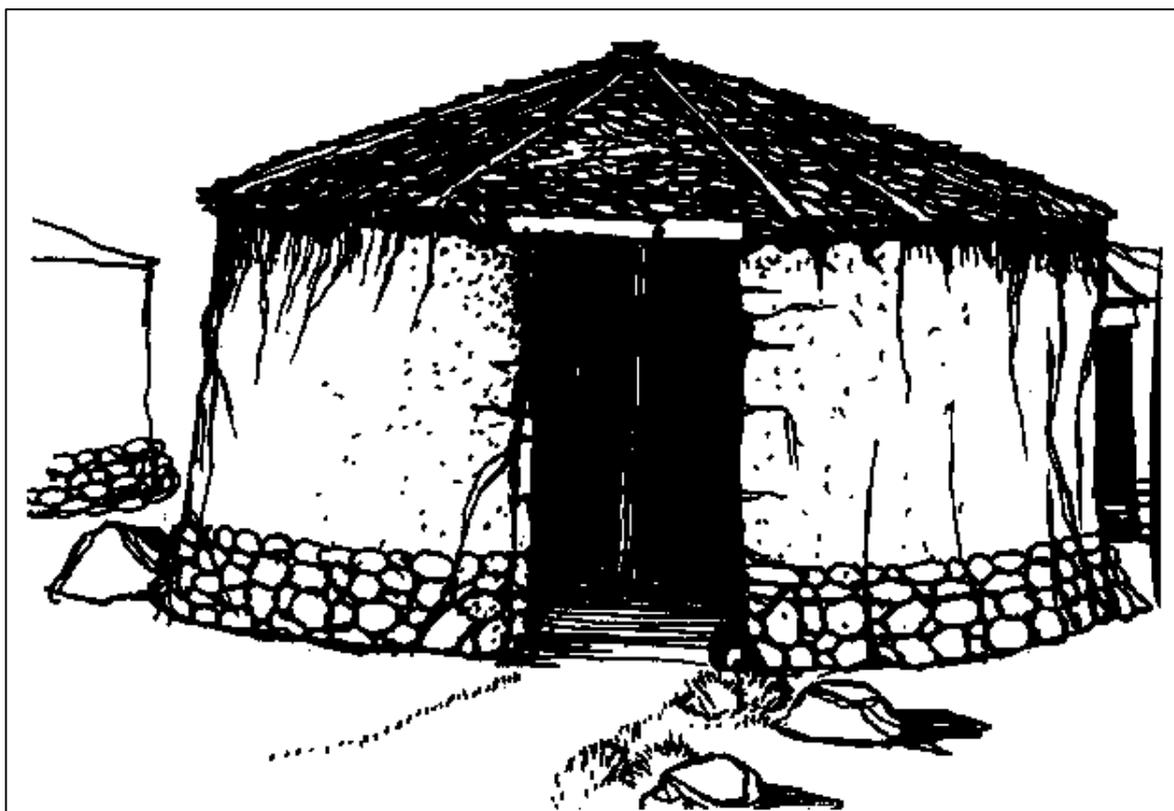
Figura 4.1. Localizzazione del Parco archeologico di Egnazia.

I primi scavi archeologici furono avviati nel 1912 dal Soprintendente della Puglia e del Materano Quintino Quagliati che portò alla luce alcuni dei monumenti più importanti della città (piazza porticata, una delle basiliche cristiane e i quartieri abitativi e produttivi). Successivamente intense campagne di scavo si sono succedute dagli anni '40 fino alla metà degli anni '90. In questi cinquanta anni di scavi vennero effettuate le scoperte più significative (il circuito murario, l'acropoli, il sacello delle divinità orientali, il tempio, la Basilica civile e le necropoli litoranea, occidentale e meridionale) per la ricostruzione della storia dell'abitato. Dopo una breve interruzione alla fine degli anni '90, scavi sistematici sono stati ripresi a partire dal 2001 e tutt'ora in corso dall'Università di Bari che ha contribuito a chiarire le diverse fasi dell'insediamento e ha portato alla luce diverse

strutture localizzate ad Est delle terme del foro.

#### **4.1.1 Età del Bronzo ed età Arcaica.**

Il primo insediamento attestato in questo territorio è costituito da un villaggio composto da capanne (con zoccolo di fondazione in pietre sistemate a secco, elevato in mattoni crudi di argilla e copertura su intelaiatura lignea ottenuta con rami e canne) (figura 4.2) databile al XVI secolo a.C. situato sulla penisola protesa nel mare, che diventerà in seguito l'acropoli della città<sup>77</sup>.



*Figura 4.2. Ipotesi ricostruttiva di una capanna del villaggio protostorico (da Cassano 2009).*

Gli scavi archeologici condotti in questo settore documentano, per questo periodo, attività artigianali ed economiche tipiche dei villaggi protostorici pugliesi. L'attività prevalente è rappresentata dall'allevamento soprattutto degli ovicapri a cui è legata la lavorazione della lana, testimoniata dal rinvenimento di fuseruole e pesi da telaio<sup>78</sup>.

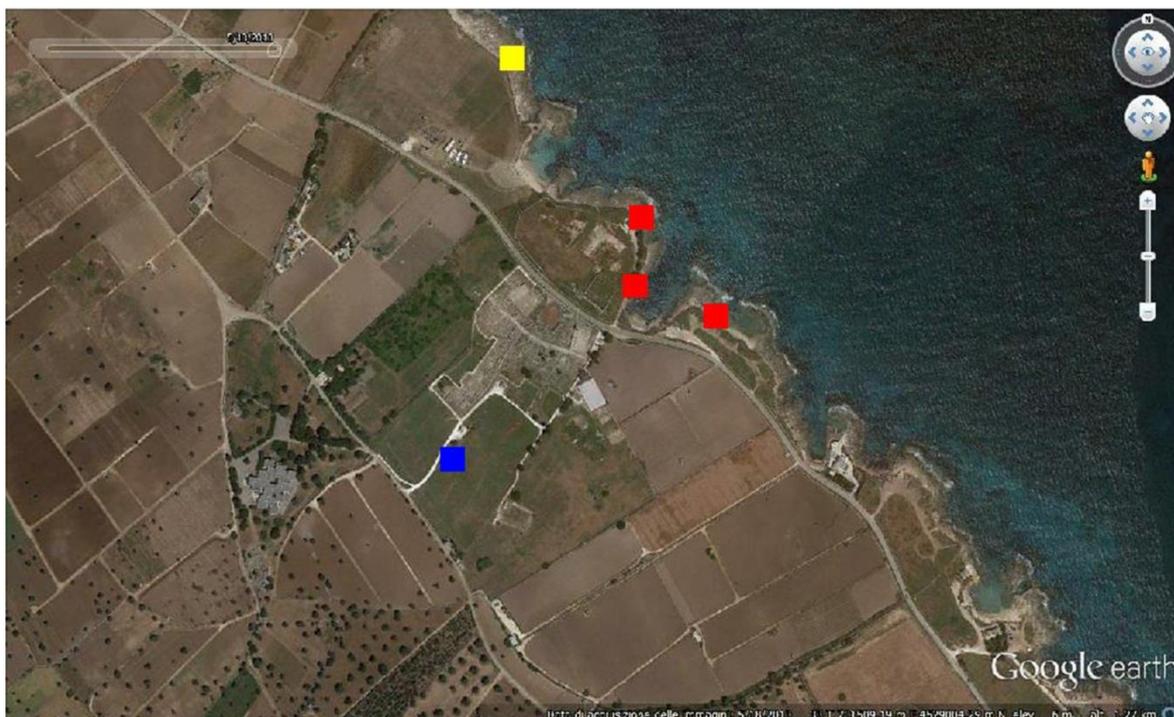
Tra il IX e il VI secolo a.C. l'insediamento, privo di fortificazioni e organizzato per nuclei sparsi di abitazioni, ciascuno dei quali è provvisto del proprio spazio funerario, si estende

<sup>77</sup> CINQUEPALMI 2000, p. 17.

<sup>78</sup> CASSANO & FIORIELLO 2009, p. 39.

oltre i limiti dell'acropoli<sup>79</sup>. L'estensione dell'abitato è documentato dalla posizione di due necropoli (litoranea e meridionale). La prima localizzata lungo la costa, ai lati dell'acropoli, la seconda nella parte meridionale di quest'ultima (figura 4.3).

Alla fine del VI secolo a.C., come testimonianza della fiorente attività ed organizzazione economica della comunità di *Egnatia*, è documentato un impianto produttivo localizzato sulla costa, a Nord-Ovest dell'acropoli. Esso è costituito da pozzi e vasche per l'approvvigionamento di acqua a cui si affiancano due fornaci destinate alla produzione di vasi ceramici.



*Figura 4.3. Localizzazione su immagine satellitare© 2013 DigitalGlobe Inc. di Google Earth™ 2013 della necropoli litoranea (rosso), necropoli meridionale (blu) e impianto artigianale (giallo) di età arcaica.*

La posizione geografica favorisce, a partire dal VI secolo a.C. e in particolare nel V secolo a.C., scambi intensi e costanti con l'altra sponda dell'Adriatico (in particolare con la Grecia) documentati dal rinvenimento di manufatti (corredo funerario della tomba a fossa 83/1 della necropoli meridionale)<sup>80</sup> che imitano forme greche e le adattano alla tradizione artigianale locale.

#### **4.1.2 Età ellenistica.**

<sup>79</sup> Dato accertato dal rinvenimento di buche di palo e da un piano di cottura refrattario databili all'Età del Bronzo al di sotto del lastricato della piazza porticata (CASSANO *et. al.* 2007, p. 9).

<sup>80</sup> ANDREASSI & COCCHIARO 1987, p. 19.

Il periodo compreso tra la fine del IV secolo a.C. e gli inizi III secolo a.C. rappresenta per Egnazia un periodo di profondo rinnovamento che segna il passaggio dal sistema insediativo per gruppi sparsi ad una prima organizzazione di tipo urbano<sup>81</sup>. A questa data si deve la fortificazione del centro abitato che risponde alla necessità di definire l'area della nuova città rispetto al territorio extraurbano e allo stesso tempo assicura protezione dalle mire espansionistiche dei popoli della Lucania e di Roma.

All'interno delle mura vengono costruiti diversi edifici pubblici sull'area dell'acropoli e, a Sud di quest'ultima, una grande area pubblica (con piano di calpestio in terra battuta) per incontri di carattere politico amministrativo<sup>82</sup>. Le aree sepolcrali si concentrano ai margini del nuovo abitato con l'ampliamento della necropoli litoranea e l'abbandono della necropoli meridionale (viene costruita una nuova necropoli meridionale nel settore Sud-Est al di fuori delle mura). Una nuova necropoli detta occidentale (caratterizzata sia da deposizioni semplici in fossa coperte da lastroni sia da tombe a camera dipinte scavate nella roccia) si estende all'esterno delle mura nel settore Sud-Ovest, nella zona in cui sorge attualmente il Museo Nazionale Archeologico<sup>83</sup> (figura 4.4).



*Figura 4.4. Localizzazione delle necropoli litoranea (giallo), necropoli meridionale (verde) necropoli occidentale (nero) e circuito murario difensivo (rosso) di età ellenistica.*

<sup>81</sup> CASSANO & FIORIELLO 2009, p. 43.

<sup>82</sup> CASSANO *et. al.* 2004.

<sup>83</sup> ANDREASSI & COCCHIARO 1987, p. 18.

#### 4.1.3 Età romana.

Tra il II sec. a.C. e il I sec. d.C. l'organizzazione urbana della città diviene sistematica. Un ruolo urbanistico prioritario è svolto dalla via *Minucia*, che snodandosi a Sud dell'acropoli, divide lo spazio pubblico, situato a Nord nella fascia tra la strada e il mare, dai settori residenziali e produttivi, localizzati nell'entroterra, e procede alla volta di Brindisi. Nello stesso periodo si realizzano gli spazi e le strutture tipiche di una città romana: vengono costruiti un grande portico sotterraneo nella zona meridionale, usato forse come deposito e sormontato probabilmente da un imponente edificio pubblico, il porto localizzato a Nord dell'acropoli, il santuario sull'acropoli, l'area di culto delle divinità orientali, le terme, il foro, la basilica civile ed i quartieri produttivi e residenziali localizzati a Sud dell'asse viario principale (figura 4.5).

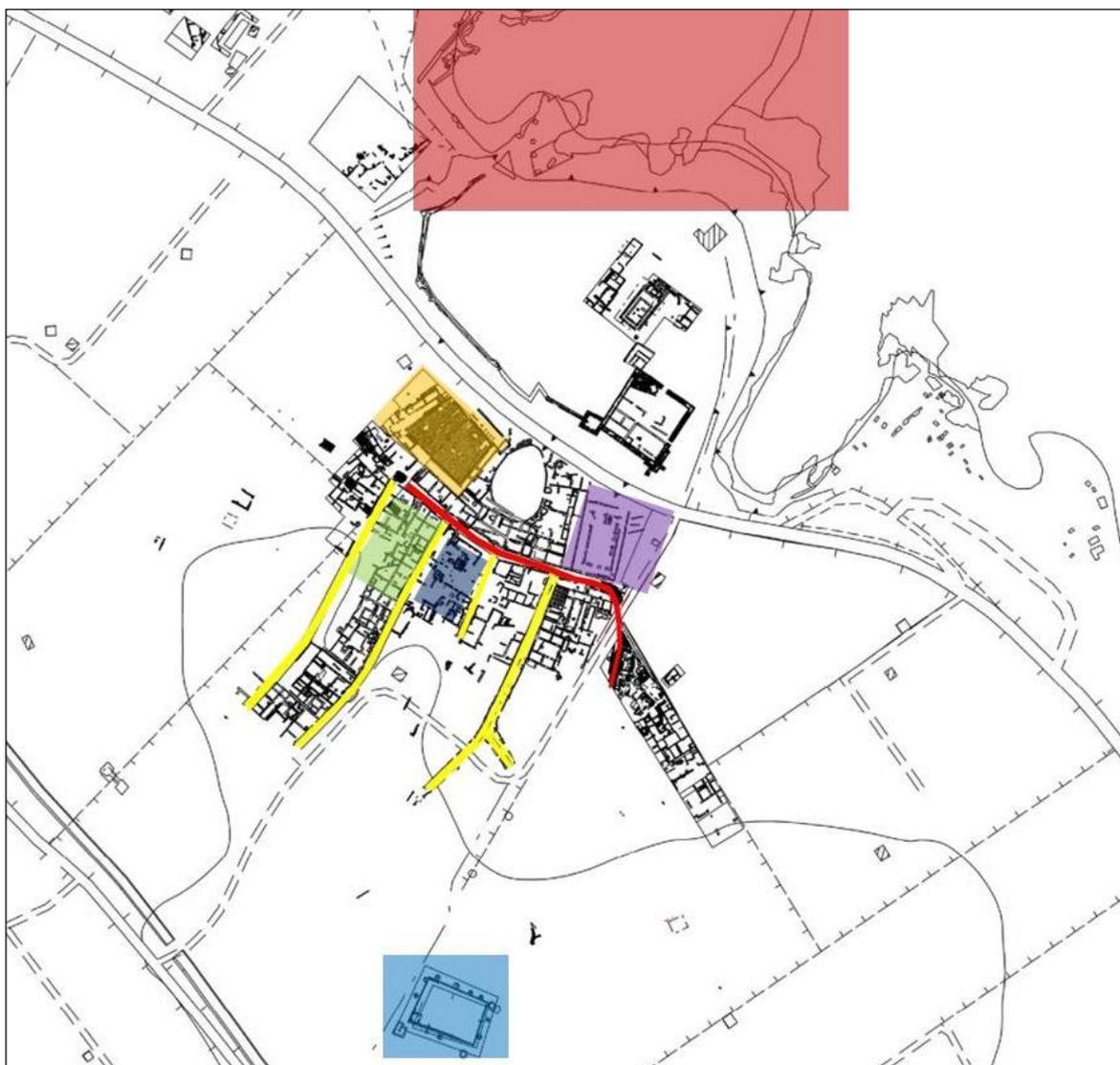


Figura 4.5. Pianta della città e settori interessati da interventi architettonici tra la tarda età repubblicana e la prima età imperiale. In rosso il percorso della via Traiana, in giallo le arterie secondarie.

Per collegare i vari settori della città vengono tracciate una serie di strade che intersecano l'arteria principale ad intervalli regolari (circa 35 m).

A partire dall'età repubblicana ci sono dei profondi rinnovamenti anche in ambito sepolcrale, viene abbandonata la necropoli litoranea, vengono ampliate le necropoli occidentali e meridionali e si assiste ad un profondo cambiamento del rituale funerario che vede il passaggio dall'inumazione all'incinerazione.

Tra il 108 e il 110 d.C. Traiano promuove la risistemazione della via *Minucia* con l'obiettivo di potenziare e velocizzare i collegamenti tra Brindisi e Roma. La nuova via *Traiana* (che prende il nome dall'imperatore) costituita da una pavimentazione in basoli di calcare ricalca fedelmente il percorso della strada più antica (figura 4.6). In concomitanza con la sistemazione del nuovo asse viario si procede ad un più ampio rinnovamento del tessuto urbano che coinvolge l'intera maglia stradale e interessa sia gli edifici pubblici (la piazza porticata, le terme, l'area di culto delle divinità orientali e il recinto monumentale noto come anfiteatro) sia i settori residenziali.

Alla piazza porticata sono riservati gli interventi architettonici più incisivi aventi lo scopo di rafforzarne il collegamento diretto con il porto<sup>84</sup> (figura 4.7).



Figura 4.6. Percorso della Via Traiana (modificata da [www.ArchèoGeographie.org](http://www.ArchèoGeographie.org)).

<sup>84</sup> CASSANO *et. al.*, 2007, pp. 15-17.

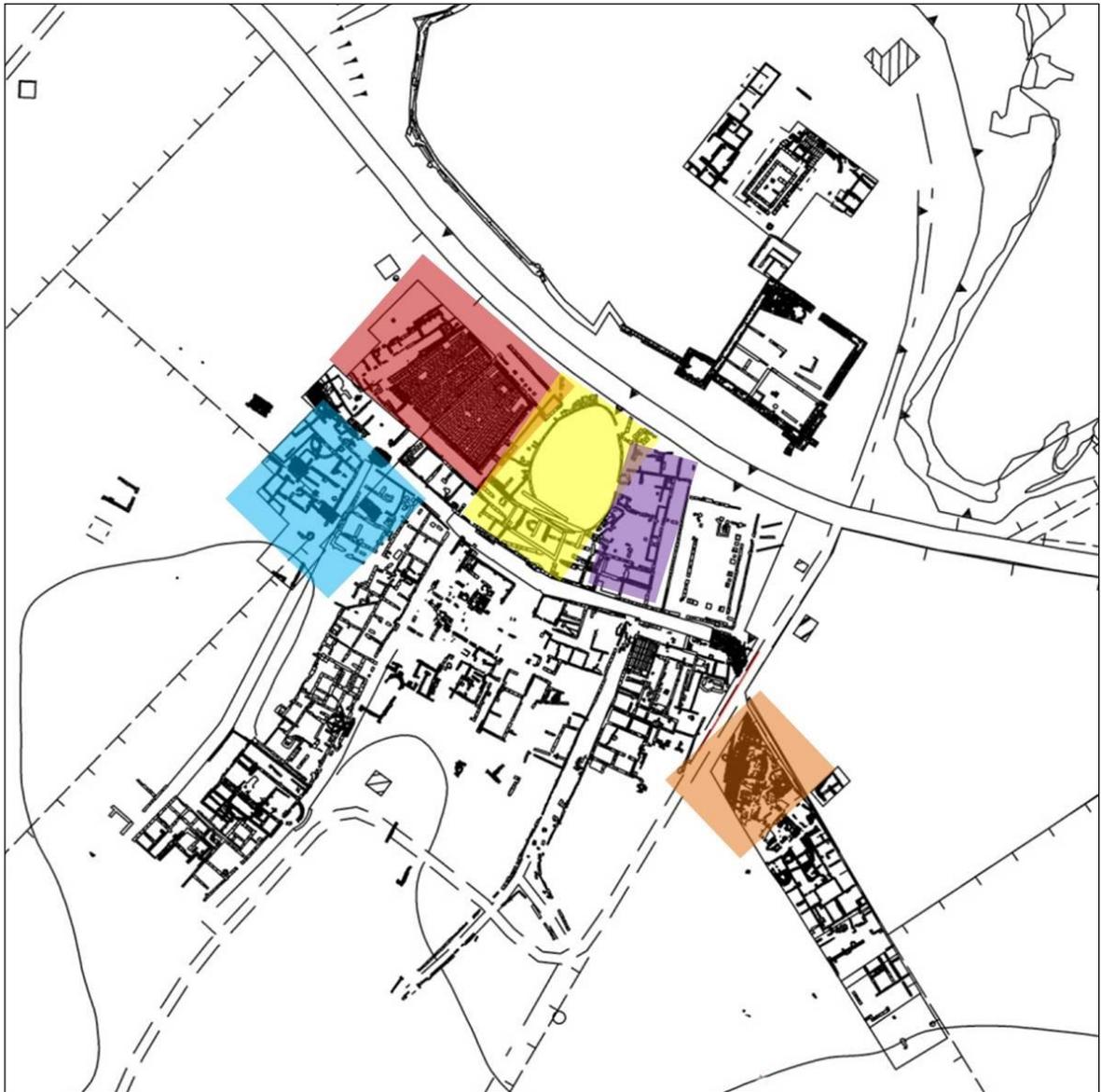


Figura 4.7. Pianta della città e settori interessati da interventi architettonici nel II secolo d.C.

#### ***4.1.4 La fase tardoantica.***

Alla fine del IV secolo d.C. si assiste ad un ulteriore rinnovamento del paesaggio urbano in seguito alla distruzione di numerosi settori della città da parte del terremoto del 365 d.C che colpì diverse zone del Mediterraneo.

La rapida riorganizzazione della città, che si attua in pochi decenni, rivela il tenore ancora alto delle attività economiche e produttive e palesa l'affermazione di nuove esigenze nella gestione cittadina favorendo l'ampliamento degli impianti commerciali e artigianali.

A questa data si registra l'affermarsi del potere del vescovo<sup>85</sup> ed è proprio a questa autorità che si possono collegare i nuovi e numerosi interventi sia di rifunzionalizzazione degli

---

<sup>85</sup> CASSANO 2007.

spazi e dei monumenti preesistenti (la piazza porticata, il santuario sull'acropoli) sia la realizzazione di nuovi edifici tra cui la basilica episcopale e quella meridionale.

Alla fine del VI sec. d.C. l'abitato torna a restringersi entro l'antica acropoli difesa in questo periodo da una fortificazione e perdura fino al XIII secolo<sup>86</sup>.



*Figura 4.8. Pianta della città e settori interessati da interventi architettonici in età tardoantica.*

#### **4.2 Il telerilevamento.**

In questa ricerca il telerilevamento è stato utilizzato come strumento di indagine che aiutasse a chiarire lo sviluppo della viabilità sia nei terreni di pertinenza del Parco Archeologico che in quelli localizzati al di fuori del circuito murario (che non sono stati

<sup>86</sup> CASSANO 2010.

indagati per mezzo di indagini geofisiche e scavi archeologici).

Il *dataset* di immagini (acquisite da piattaforme aeree e satellitari) utilizzato per l'identificazione di tracce archeologiche è costituito da:

- n. 2 di foto aeree rispettivamente del 1967 e del 2010;
- n.1 ortofoto digitale a colori acquisita nel 1998 in scala nominale 1:10.000 (volo IT2000 del Ministero dell'Ambiente) con risoluzione di 1 m/pixel;
- n. 2 di ortofoto © 2004-2016 Blom Terra Italy del 2006 e del 2008 con risoluzione di 0.50 m/pixel;
- n. 2 di immagini satellitari ©2013 DigitalGlobe Inc. di Google Earth™ del 9 maggio 2005 e del 18 maggio 2013;
- n. 1 di immagini satellitari QuickBird *pansharpening* acquisita il giorno 14 febbraio 2008 con una risoluzione 0.70 m/pixel;
- n. 1 di immagine MIVIS di proprietà dell'Arma dei Carabinieri acquisita il 20 settembre del 2011 ad una quota di volo relativa di 1500 m con risoluzione di 3 m/pixel.

Per ricostruire la viabilità interna ed esterna del sito il lavoro è stato articolato in tre fasi (correzione geometrica delle immagini, trattamento delle immagini multispettrali, identificazione ed interpretazione delle tracce).

Visto che le immagini sono state acquisite da sensori con caratteristiche spaziali differenti è stato necessario renderle geometricamente appropriate con il sistema di riferimento prescelto. Utilizzando il metodo *Ground Control Points* (descritto nel capitolo 1.4.1.3) tutte le immagini sono state georiferite nel sistema di coordinate cartografico UTM, mantenendo come *datum* il WGS84 Fuso 33N.

Dopo la correzione geometrica le immagini composte da un'unica banda (fotografie aeree del 1967 e del 2010, satellitari di Google Earth, ortofoto del 1998 volo IT2000 e Terra Italy del 2006 e del 2008) sono state analizzate esclusivamente da un punto di vista visivo. Viceversa per l'immagine MIVIS e Quickbird *pansharpening* (composte da più bande dello spettro elettromagnetico) è stato possibile applicare filtri che hanno la caratteristica di enfatizzare determinati fattori ambientali (grado di umidità del suolo, crescita della vegetazione etc.) allo scopo di semplificare l'individuazione e la lettura delle tracce.

Il software utilizzato per la visualizzazione e il trattamento delle immagini è stato ENVI 4.5<sup>87</sup> e i filtri applicati a queste ultime sono stati il calcolo *Normalized Difference*

---

<sup>87</sup> <http://geomasterz.wordpress.com>.

*Vegetation Index NDVI* (che consente di enfatizzare la presenza, il tipo e lo stato della vegetazione e la sua applicazione può essere di grande utilità per identificare la presenza di strutture sepolte sulla base delle differenze di crescita della vegetazione soprastante), la composizione in falsi colori *False colour composites FCC* (per la produzione di immagini in cui vengono esaltate, tramite l'attribuzione di specifici colori, determinate caratteristiche del terreno, quali ad esempio il grado di umidità, fattore molto utile nella discriminazione di anomalie) e l'applicazione dei filtri passa-alto e passa-basso (rappresentano tecniche di filtraggio numerico che offrono la possibilità di migliorare il contrasto di un'immagine esaltando le zone dove i valori di *DN* subiscono bruschi cambiamenti).

Successivamente tutte le immagini sono state inserite all'interno di un Sistema Informativo Geografico (GIS) e le tracce individuate sono state interpretate dal punto di vista archeologico e topografico (cercando di attribuire un preciso significato ad ogni singola traccia) e sono state confrontate con i risultati ottenuti mediante le indagini geofisiche e per mezzo delle attività di scavo.

#### ***4.3 Le indagini geofisiche.***

Le indagini geofisiche sono state realizzate nei terreni racchiusi all'interno del circuito murario (di pertinenza del Parco Archeologico e non ancora soggetti a scavi archeologici) ed hanno avuto lo scopo di mappare l'intera area per individuare la presenza di strutture sepolte e comprenderne il loro andamento rispetto alle strutture già portate alla luce dai precedenti scavi.

Prima di iniziare con l'acquisizione del dato è stata individuata un'area campione dove sono state applicate varie metodologie di indagine variando per ognuna i parametri di *setup* e di configurazione durante l'acquisizione dei dati, modalità e ordine di applicazione delle tecniche, procedure di elaborazione dati e di correlazione tra le diverse anomalie e modalità di rappresentazione dei risultati.

L'obiettivo del test preliminare è stato quello di stabilire, in base alle risposte ottenute, la strategia migliore da adottare per mappare in maniera veloce ed accurata un vasto settore della città tenendo in considerazione le caratteristiche del sito archeologico (tipo di strutture, dimensioni, profondità), la natura geologica del terreno, le condizioni logistiche dell'area e la presenza di disturbi antropici. Verificato che la profondità delle strutture è compresa nei primi 1.5 m del sottosuolo e appurata la risposta dei vari sistemi alle condizioni del terreno, si è optato di procedere con l'integrazione dell'indagine ad induzione elettromagnetica e GPR, la prima per ottenere un inquadramento a grande scala del sito, la seconda per ottenere una risoluzione maggiore nella discriminazione delle

strutture nel settore a Est delle terme.

#### ***4.3.1 Il metodo ad induzione elettromagnetica.***

Il rilievo elettromagnetico è stato realizzato utilizzando il Profiler EMP-400 (descritto nel capitolo 2.1.1) (figura 4.9).



*Figura 4.9. Acquisizione dei dati mediante Profiler EMP-400.*

Con questa strumentazione sono stati ispezionati tutti i terreni localizzati all'interno del circuito murario di pertinenza del Parco Archeologico. Vista la grande estensione del sito si è preferito suddividere il territorio in dieci aree creando griglie di acquisizione che si adattassero alla geometria del terreno da investigare prediligendo dove possibile griglie regolari (quadrate e rettangolari).

All'interno di queste ultime l'acquisizione dei dati è stata realizzata lungo dei profili paralleli (con modalità a zig zag) equidistanti di 0.5 m (in modo da ottenere una fitta maglia di misure) raccogliendo dati continui (registrati puntualmente tramite il GPS integrato nel sistema) in modalità multifrequenza (2000 Hz, 8000 Hz e 1500 Hz) e cercando di evitare zone di interferenza quali reti metalliche, pali della corrente etc.

Durante la fase di elaborazione i valori di conducibilità (calcolati dalla componente in

quadratura del campo magnetico secondario misurato) sono stati convertiti in resistività elettrica ed elaborati con un programma di *contouring* per la realizzazione di una mappa bidimensionale di variazione del parametro geofisico.

#### 4.3.2 Il GPR.

Il rilievo GPR è stato condotto utilizzando un georadar della IDS (descritto nel capitolo 2.2.1). Utilizzando questa strumentazione è stata indagata una superficie (65 x 45 m) localizzata ad Est delle terme e suddivisa in sei aree d'acquisizione di differenti dimensioni (figura 4.10).

L'obiettivo dell'indagine radar, in questo settore della città, è stato quello di verificare (utilizzando un metodo ad alta risoluzione) la presenza di eventuali strutture sepolte in quanto l'ultimo quadrato di scavo (figura 4.10 in verde) risultava sterile di strutture archeologiche. L'indagine dunque ha avuto lo scopo di comprendere se quel determinato settore risultasse o meno importante da un punto di vista archeologico.

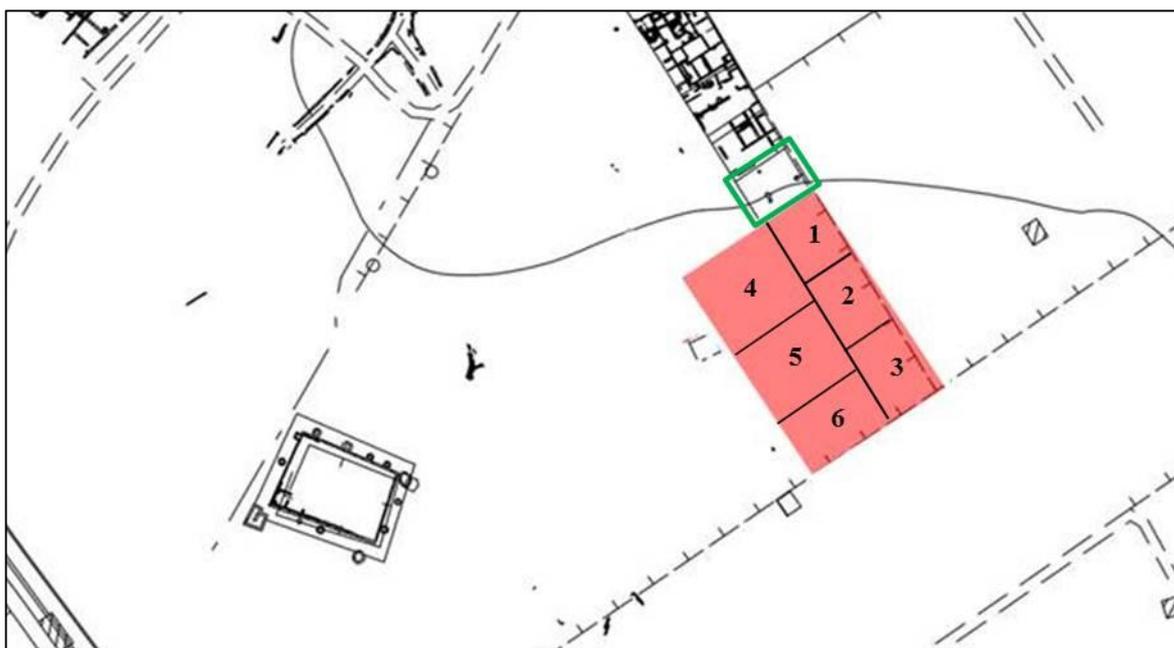


Figura 4.10. Localizzazione delle aree ispezionate mediante indagine GPR e quadrato di scavo sterile di strutture archeologiche (in verde).

Per ogni area è stata creata una griglia regolare (quadrata o rettangolare) e l'acquisizione dei dati è stata realizzata lungo dei profili paralleli equidistanti di 0.50 m (la distanza è stata scelta in quanto lo scopo dell'indagine è stato quello di individuare strutture murarie aventi uno spessore di circa 0.60 m).

Visto che questa strumentazione è sprovvista di GPS tutte le aree di indagine sono state

inserite all'interno di uno stesso sistema di coordinate (x, y) con lo scopo di creare un'unica mappa geofisica derivante dall'unione delle sei aree.

Per l'acquisizione è stata utilizzata un'antenna *cross* combinata (200 – 600 Mhz) e lo strumento è stato settato con una finestra temporale (*time window*) di 80 ns con 512 *seamples per radar scan*.

L'elaborazione dei dati è stata effettuata utilizzando il *software* GPR-SLICE v.7 ( secondo le modalità descritte nel capitolo 2.1.1) e scegliendo la frequenza di 600 Mhz (in quanto ha fornito informazioni più dettagliate).

Utilizzando questo programma tutti i profili sono stati inquadrati, tramite l'assegnazione di coordinate spaziali (x, y), all'interno delle rispettive griglie di acquisizione. Ai radargrammi sono stati applicati tre tipi distinti di filtri (*Acg Gain, Bandpass, Background*) e per ogni area sono state create 30 *slice*. Successivamente utilizzando il *software* Surfer 8 tutte le aree sono state unite al fine di creare un'unica mappa geofisica.

#### **4.4 Risultati.**

La fotolettura e la fotointerpretazione delle immagini da remoto hanno consentito di individuare la presenza di diverse tracce lineari di colore chiaro attribuibili a strutture e a possibili percorsi antichi che si snodano sia all'interno dell'area urbana sia in ambito extraurbano. Le tracce individuate su ogni immagine sono state numerate e divise per tipologia.

Nelle figure successive (figure 4.11 – 4.22) vengono riportate le immagini utilizzate per la ricostruzione della viabilità e l'indicazione delle tracce segnalate in giallo. Per ogni traccia è stata fatta un'interpretazione dal punto di vista archeologico-topografico e sono state segnalate le immagini dove le anomalie risultano ben visibili.

La traccia n.1a è ben riscontrabile nella fotografia aerea del 1967 (figura 4.11a,b), sulle ortofoto IT2000 (figura 4.12a,b), Terra Italy del 2006 (figura 4.13a,b) e del 2008 (figura 4.14a,b), sull'immagine MIVIS (figura 4.15a,b) e sulle relative elaborazioni (Falsi colori figura 4.16a,b e filtro passa-basso figura 4.17a,b), sulla QuickBird *pansharpening* con l'elaborazione per falsi colori (figura 4.20a,b); risulta meno distinguibile (individuandone solo un tratto) sull'immagine MIVIS con l'applicazione del filtro passa-alto (figura 4.18a,b) e sull'immagine Google Earth del 2013 (figura 4.21a,b).

Questa traccia potrebbe essere identificata con l'antico percorso della via Traiana (documentata nel settore extraurbano dallo scavo archeologico nell'area di Masseria Cimino localizzata a circa 1 km da Porta Sud) che partendo all'altezza della piazza porticata attraversa l'area degli edifici pubblici, la zona delle terme del foro e curva

leggermente in direzione Sud-Est proseguendo con andamento rettilineo verso Porta Sud.

Un'altra traccia di rilievo (n. 2) è riconoscibile esclusivamente nell'ortofoto Terra Italy del 2006 (figura 4.13a,b). Questa anomalia potrebbe rappresentare un'arteria secondaria che si snoda dalla via Traiana nel punto in cui il decumano descrive la curva tra la basilica civile e le terme. Il primo segmento di questa arteria stradale, portato alla luce dai recenti scavi nel settore delle terme del foro, si differenzia dall'asse principale in quanto ha una funzione esclusivamente pedonale. La strada, che si dirige con andamento piuttosto rettilineo verso l'attuale strada provinciale, sembra deviare per uscire dalla città e proseguire sul percorso litoraneo del quale è stato di recente individuato un tratto ricavato nel banco roccioso.

Ad Est della via Traiana sono state individuate due distinte anomalie (n. 3-4) parallele tra loro che curvano in direzione di Porta Sud. Le tracce di colore chiaro e con orientamento Nord Est–Sud Ovest potrebbero essere pertinenti alla viabilità urbana antica. La traccia n. 3 risulta ben distinguibile sull'ortofoto IT2000 (figura 4.12a,b), sulla QuickBird *pansharpening* elaborazione per falsi colori (figura 4.20a,b) e sulla MIVIS con l'applicazione del filtro passa-basso (figura 4.17a,b). Mentre è identificabile solo in parte sull'immagine MIVIS (figura 4.15) e sulle relative elaborazioni con l'applicazione del filtro passa-alto (figura 4.18a,b) e falsi colori (figura 4.16 a,b), sulla fotografia aerea del 1967 (figura 4.11a,b), sull'immagine satellitare di Google Earth del 2005 (figura 4.22a,b) e sulle ortofoto Terra Italy del 2006 (figura 4.13a,b) e del 2008 (figura 4.14a,b). La traccia n.4, invece, è ben visibile sulla fotografia aerea del 1967 (figura 4.11a,b) e sulle ortofoto Terra Italy del 2006 (figura 4.13a,b) e 2008 (figura 4.14a,b). Risulta, invece, leggibile solo in parte sull'immagine satellitare di Google Earth del 2005 (figura 4.22a,b).

La traccia n. 5 che risulta ben percepibile nell'ortofoto IT2000 (figura 4.12a,b) e nell'immagine satellitare QuickBird *pansharpening* elaborazione per falsi colori (figura 4.20a,b), potrebbe essere interpretata come la biforcazione dell'arteria secondaria della via Traiana (si snoda all'altezza della basilica civile) e collega il criptoportico con gli isolati del settore settentrionale della città.

Nel settore Sud della città si individuano due tracce parallele di colore chiaro (n. 6–7) che potrebbero rappresentare la continuazione di due assi stradali secondari che si snodano dalla via Traiana.

La traccia n. 6 potrebbe identificare la prosecuzione del diverticolo stradale della via Traiana (portato in luce dai recenti scavi solo in parte) che si snoda all'altezza della basilica civile. La n. 7, anch'essa identificabile come un'arteria secondaria della via Traiana, potrebbe essere la continuazione di un ulteriore asse stradale secondario (non individuato dagli scavi in quanto obliterato dalla basilica episcopale) che verosimilmente

doveva snodarsi all'altezza del cosiddetto "anfiteatro". Le due anomalie risultano riconoscibili nella fotografia aerea del 1967 (figura 4.11a,b), nell'immagine MIVIS (figura 4.15a,b) con le relative elaborazioni (filtro passa-basso figura 4.17a,b, filtro passa-alto figura 4.18a,b, falsi colori figura 4.16a,b e *NDVI* figura 4.19a,b) e nell'immagine satellitare di Google Earth 2013 (figura 4.21). Nelle altre immagini (ortofoto Terra Italy 2006 figura 4.13a,b e 2008 figura 4.14a,b, IT2000 figura 4.12a,b e Quickbird *pansharpening* in falsi colori figura 4.20a,b) è visibile esclusivamente la traccia n. 6.

Le due tracce sopra descritte si incrociano con un'ulteriore traccia lineare perpendicolare ad esse visibile esclusivamente nell'immagine satellitare di Google Earth 2013 (figura 4.21a,b), che potrebbe essere indentificata come un'ulteriore tratto di viabilità.

La traccia n. 8 individuabile nell'ortofoto IT2000 (figura 4.12a,b) e nell'immagine satellitare Google Earth 2013 (figura 4.21a,b), potrebbe essere interpretata come la continuazione di un'ulteriore asse secondario (portato alla luce dai precedenti scavi che si snoda dalla via Traiana all'altezza della piazza porticata) che deviando verso Nord-Ovest sembrerebbe collegarsi con la traccia n. 9 che dovrebbe rappresentare la sua naturale prosecuzione. Quest'ultima anomalia che si distingue molto bene nella fotografia aerea del 1967 (figura 4.11a,b) e nelle immagini MIVIS (figura 4.15a,b) con le rispettive elaborazioni (filtro passa-basso figura 4.17a,b e falsi colori figura 4.16a,b) sembrerebbe a sua volta collegarsi con la traccia n. 11 riconoscibile sulla fotografia aerea del 1967 (figura 4.11a,b), sull'ortofoto IT2000 (figura 4.12a,b) e sull'immagine satellitare QuickBird *pansharpening* in falsi colori (figura 4.20a,b).

La traccia n. 10 che risulta ben visibile sulla fotografia aerea del 1967 (figura 4.11a,b), sull'immagine satellitare QuickBird *pansharpening* in falsi colori (figura 4.20a,b) e sulle ortofoto IT2000 (figura 4.12a,b), Terra Italy 2006 (figura 4.13a,b) e 2008 (figura 4.14a,b) si presenta di colore chiaro rispetto al terreno circostante e presenta andamento curvilineo. Essa è stata individuata e interpretata dal Ceraudo<sup>88</sup> come segno dell'estremo occidentale della cinta muraria.

Nel settore Sud-Est della città sono identificabili sull'immagine satellitare QuickBird *pansharpening* in falsi colori (figura 4.20a,b) numerose anomalie che per forma e tipologia potrebbero essere pertinenti a strutture che si dispongono lungo la viabilità urbana. In particolare, a Sud delle terme del foro, nel punto in cui l'analisi della fotografia aerea acquisita nel 2010 (figura 4.23a,b) ha evidenziato anomalie chiare e significative, lo scavo archeologico, ha confermato la presenza di un edificio religioso a tre navate (figura 4.23c).

---

<sup>88</sup> CERAUDO 2003; CERAUDO 2008..

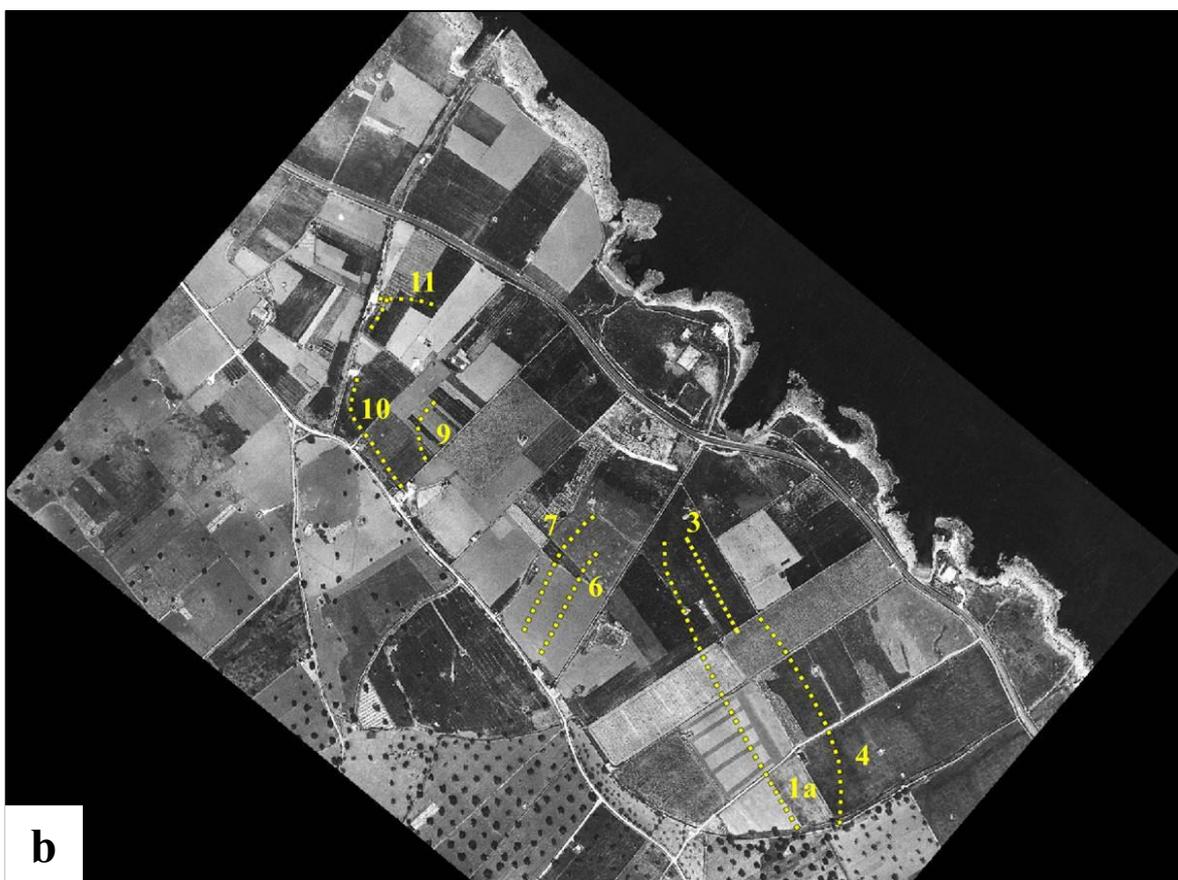
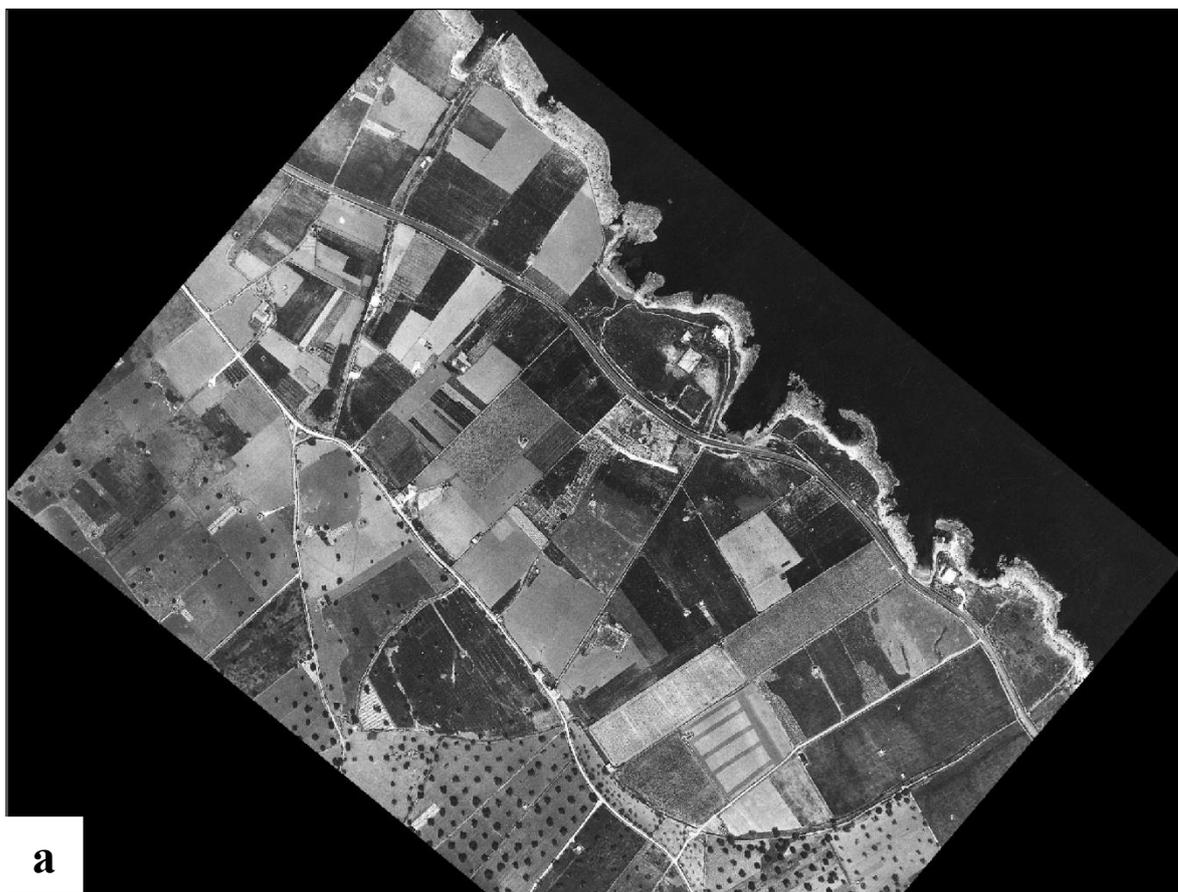


Figura 4.11. a) Fotografia aerea acquisita nel 1967; b) individuazione delle tracce archeologiche.



*Figura 4.12. a) Ortofoto acquisita nel 1998 (volo IT2000 del Ministero dell' Ambiente); b) identificazione delle tracce archeologiche.*



Figura 4.13. a) ortofoto © 2004-2016 Blom Terra Italy del 2006; b) identificazione delle tracce archeologiche.



Figura 4.14. a) ortofoto © 2004-2016 Blom Terra Italy del 2008; b) identificazione delle tracce archeologiche.



Figura 4.15. a) Immagine multispettrale MIVIS acquisita nel 2011; b) identificazione delle tracce archeologiche.



Figura 4.16. a) Immagine multispettrale MIVIS acquisita nel 2011, elaborazione in Falsi Colori; b) identificazione delle tracce archeologiche.

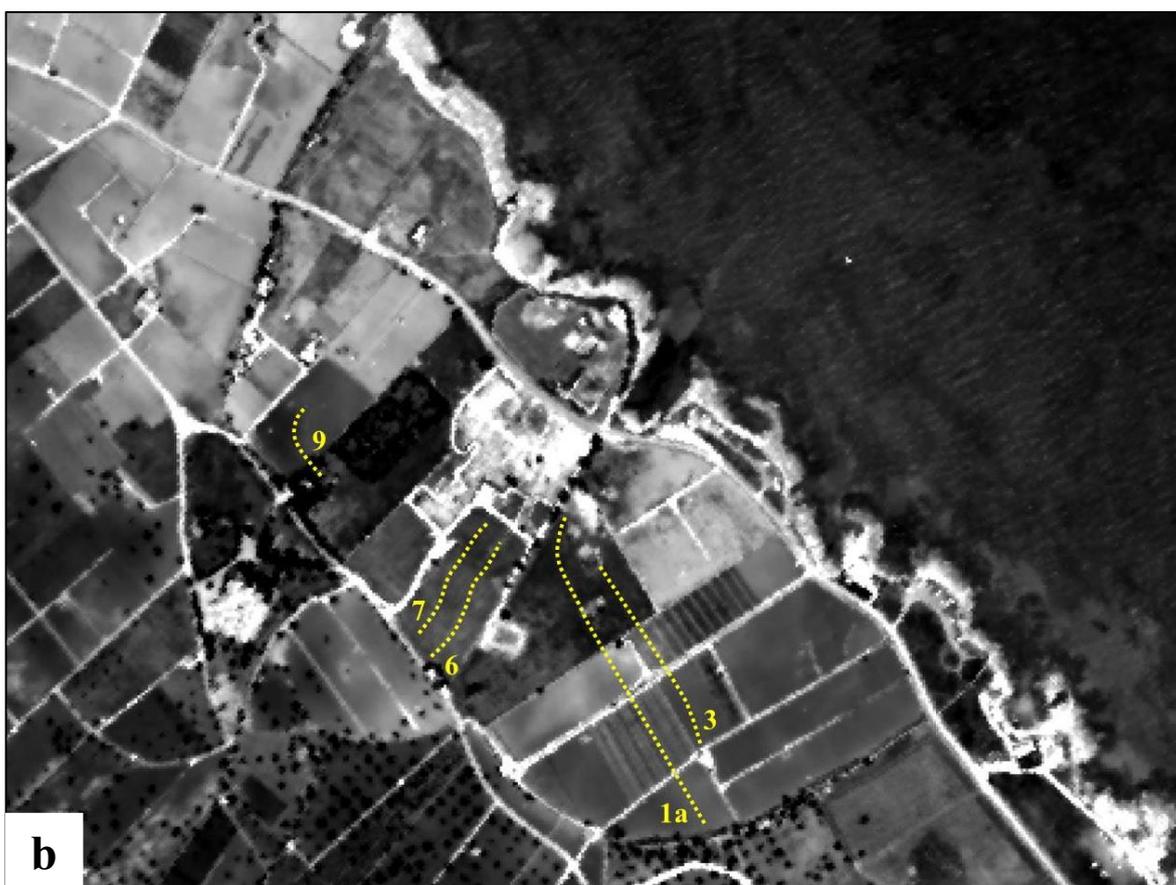


Figura 4.17. a) Immagine multispettrale MIVIS acquisita nel 2011, elaborazione tramite l'applicazione del filtro passa-basso; b) identificazione delle tracce archeologiche.

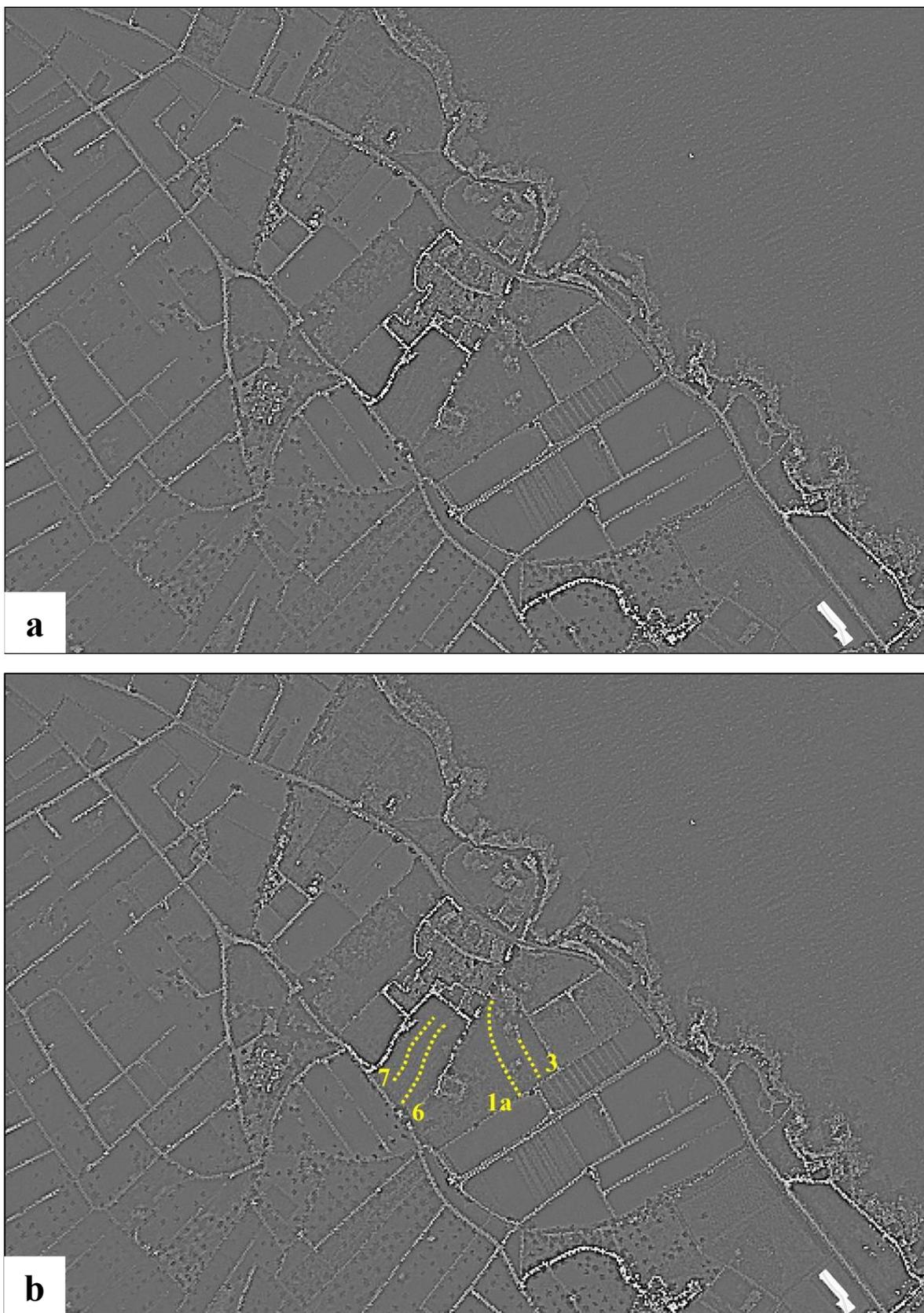
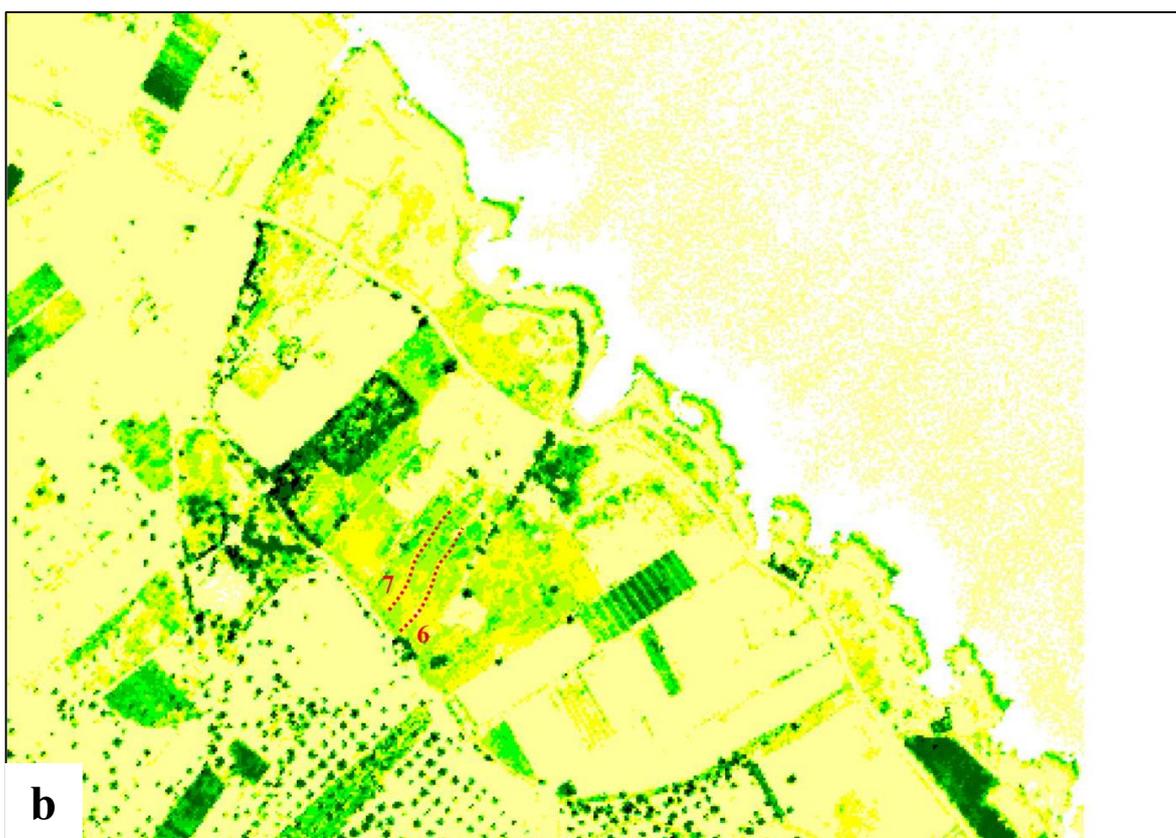
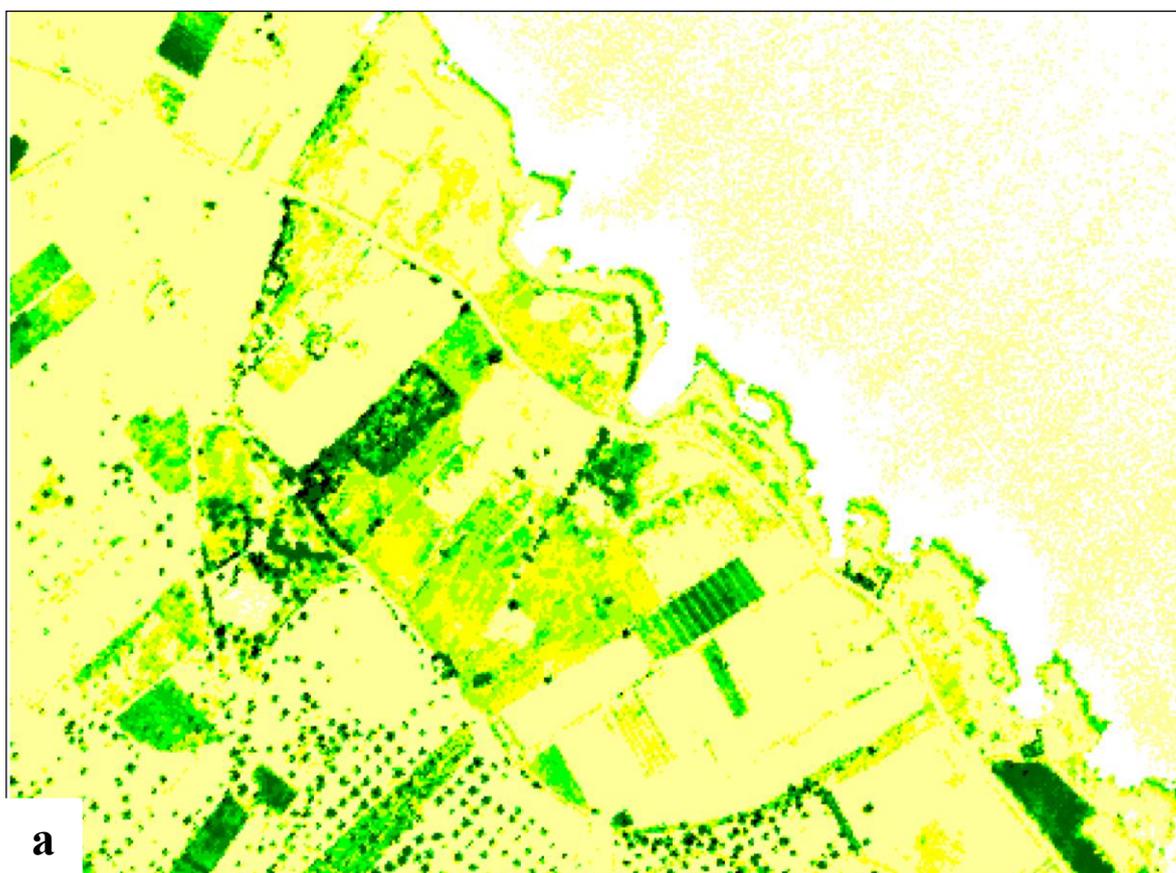


Figura 4.18. a) Immagine multispettrale MIVIS acquisita nel 2011, elaborazione tramite l'applicazione del filtro passa-alto; b) identificazione delle tracce archeologiche.



*Figura 4.19. a) Immagine multispettrale MIVIS acquisita nel 2011, elaborazione tramite l'applicazione dell'indice di vegetazione NDVI; b) identificazione delle tracce archeologiche.*

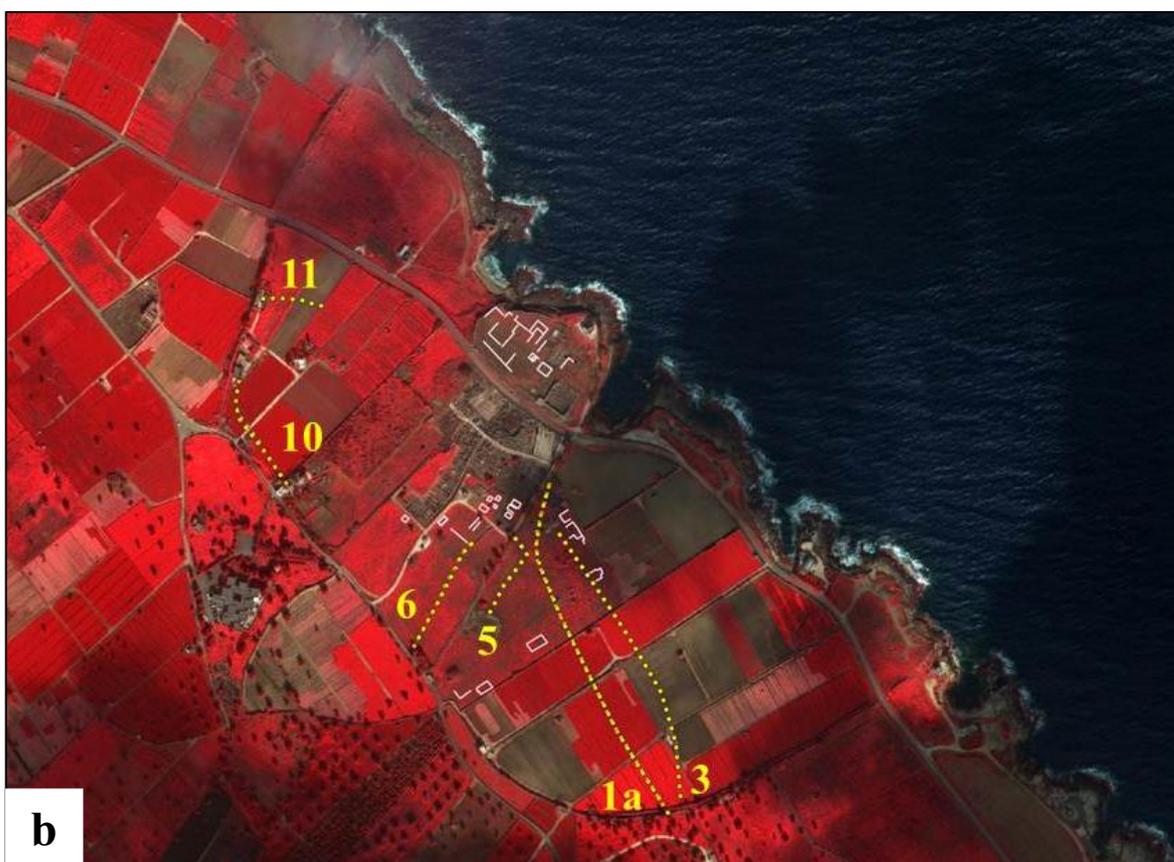


Figura 4.20. a) Immagine satellitare QuickBird pansharpening acquisita il 14 febbraio 2008, elaborazione in falsi colori; b) identificazione delle tracce archeologiche.



Figura 4.21. a) Immagine satellitare ©2013 DigitalGlobe Inc. di Google Earth™ del 2013; b) identificazione delle tracce archeologiche.



Figura 4.22. a) Immagine satellitare ©2013 DigitalGlobe Inc. di Google Earth™ del 2005; b) identificazione delle tracce archeologiche.

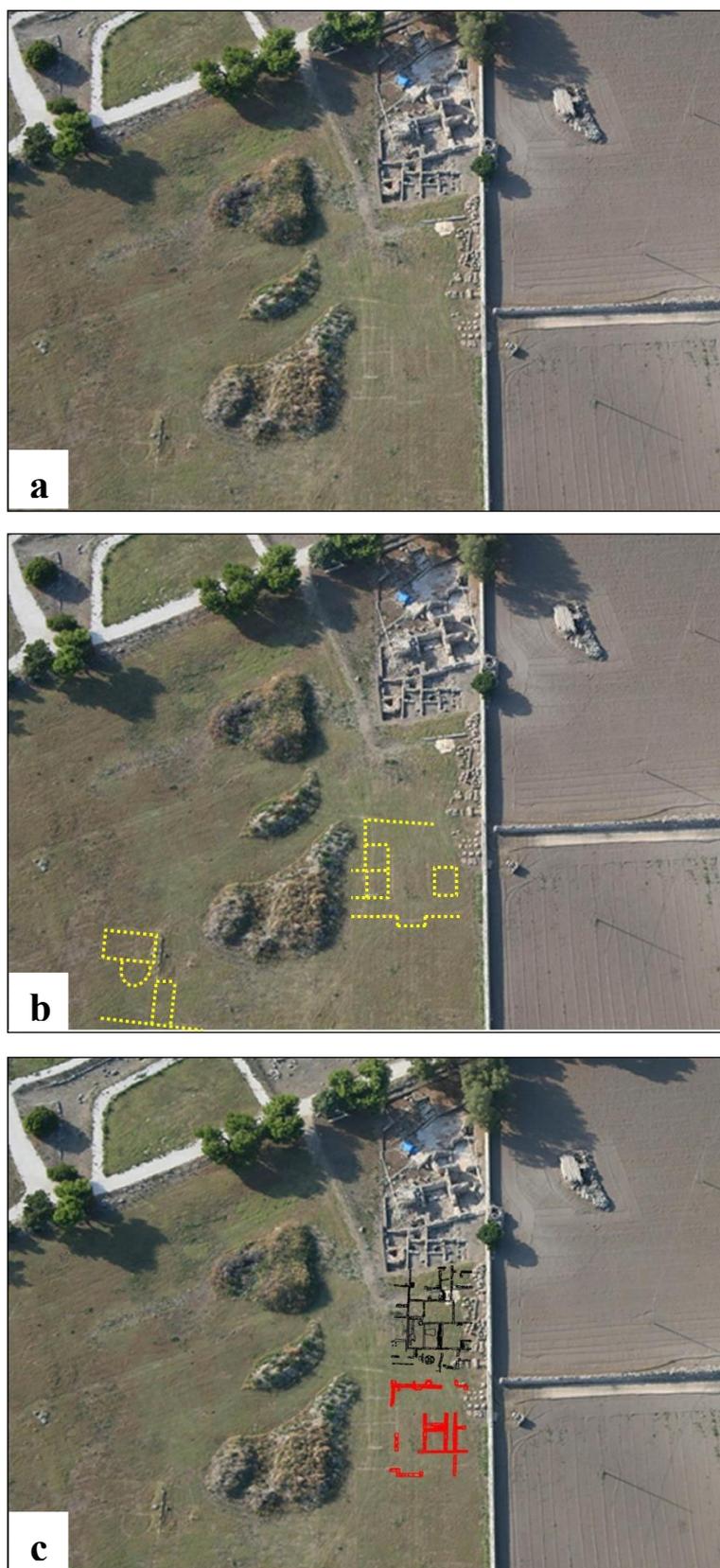


Figura 4.23. a) Fotografia aerea del 2010 del settore a sud delle terme (gentilmente concessa da Consorzio Universitario di Bari, Laboratorio Centro Aereofotografico); b) individuazione delle tracce; c) sovrapposizione delle strutture portate alla luce dallo scavo archeologico, in rosso struttura religiosa visibile dalle tracce.

Nell'area della acropoli sono state individuate anomalie che documentano la presenza di strutture antropiche sepolte (QuickBird *pansharpening* in falsi colori figura 4.20a,b). Anche per questo settore, ulteriori attività di indagine realizzata per mezzo di campagne di scavo, hanno confermato la presenza di elementi presenti nel primo sottosuolo che per tipologia ed organizzazione nello spazio sono state identificate come edifici la cui funzione è ancora da capire.

In figura 4.24 è riportata la pianta delle evidenze archeologiche (fornita dall'Università di Bari) dove sono state indicate, con differenti colori, le aree di acquisizione. Per quanto riguarda la mappa ottenuta dal rilievo ad induzione elettromagnetica si è scelta la frequenza più significativa tra quelle acquisite (15000 Hz) in quanto ha fornito informazioni più dettagliate circa la distribuzione delle anomalie nei primi metri del sottosuolo (figura 4.25). Le graduazioni di verde evidenziano le zone che hanno maggior capacità di condurre energia elettrica, le graduazioni di rosso più intenso rappresentano invece le zone con minore capacità. In figura 4.26 con il color magenta viene riportata l'interpretazione delle anomalie più rilevanti effettuata sulla mappa di resistività ed in figura 4.27 è visibile esclusivamente l'interpretazione sovrapposta al rilievo delle evidenze archeologiche.

La mappa di resistività ha delineato a grande scala e con una discreta risoluzione diverse zone in cui sono presenti anomalie ascrivibili ad attività antropiche.

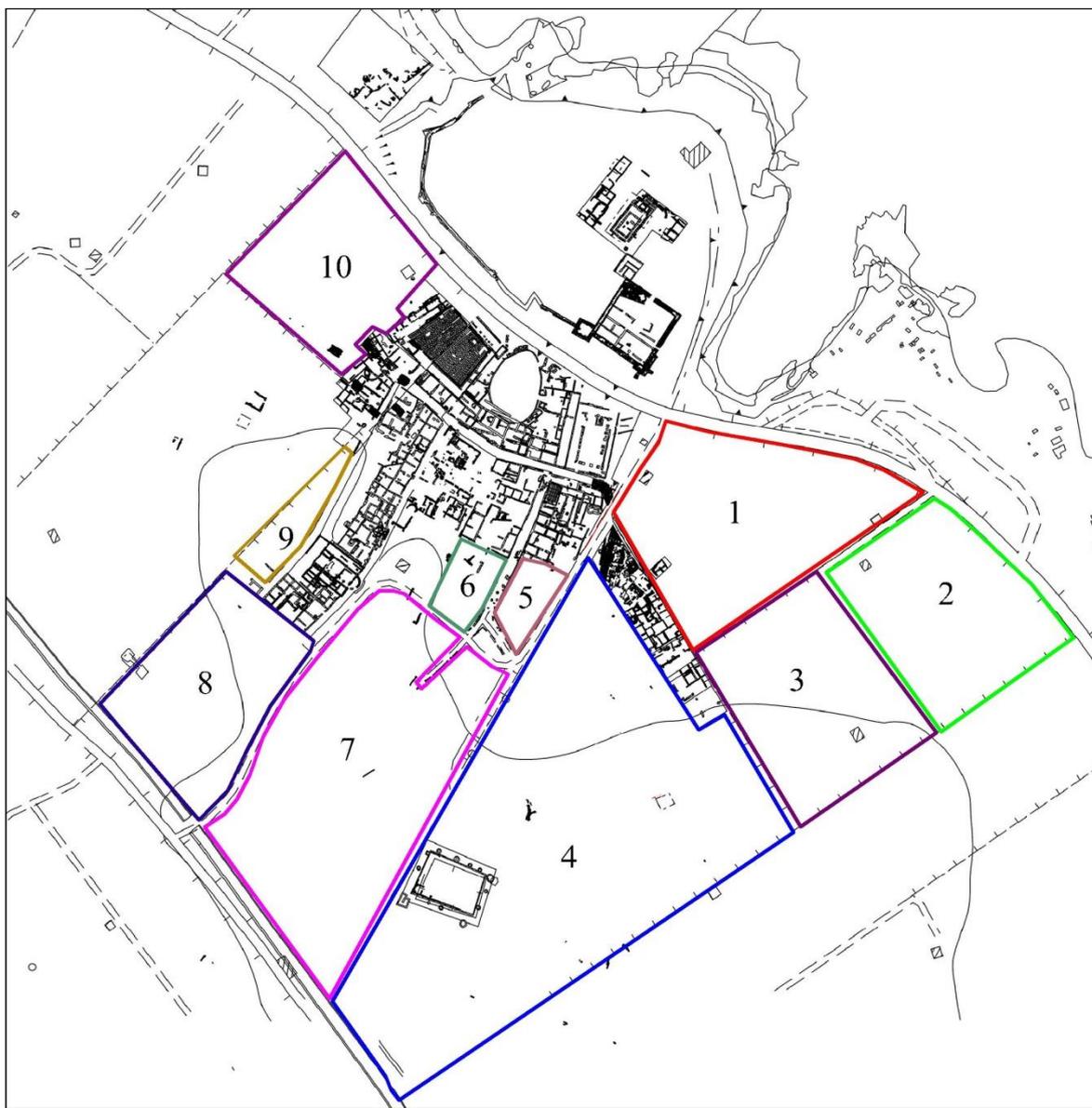
Nel dettaglio, nelle aree 1-2-3 (figure 4.24) si individuano quattro corpi anomali alto resistivi (di dimensioni notevoli) rappresentanti probabili strutture sepolte (figura 4.25). Da un punto di vista archeologico le anomalie più significative in queste tre aree sono rappresentate da una zona caratterizzata da bassa resistività di forma rettangolare e da un'anomalia alto resistiva localizzata a Sud di quest'ultima che attraversa tutta l'area 2 con un andamento rettilineo.

La prima presenta dimensioni di circa 58 x 62 m (area di 4188 m<sup>2</sup>). Considerata la forma (rettangolare) e la sua posizione all'interno della città (accanto la basilica civile) potrebbe essere identificata verosimilmente con la piazza forense.

La seconda ricalca fedelmente la traccia n. 2 individuata dalle immagini da remoto e interpretata come un'arteria secondaria della via Traiana. Considerata la sua larghezza (circa 3.5 m) e il suo andamento rettilineo potrebbe confermare l'ipotesi formulata.

Nell'area 4 (figura 4.24) si notano molte anomalie alto resistive localizzate soprattutto nel settore immediatamente a Sud delle terme (figura 4.25). Partendo dal presupposto che queste anomalie potrebbero essere identificate come strutture antropiche risulta impossibile comprenderne la forma e l'orientamento in quanto lo svantaggio principale di questa

metodologia è quello di non definire perfettamente la geometria dei corpi sepolti, soprattutto in un'area caratterizzata da molte evidenze ravvicinate. Nonostante questa difficoltà le anomalie ritenute più rilevanti sono tre.

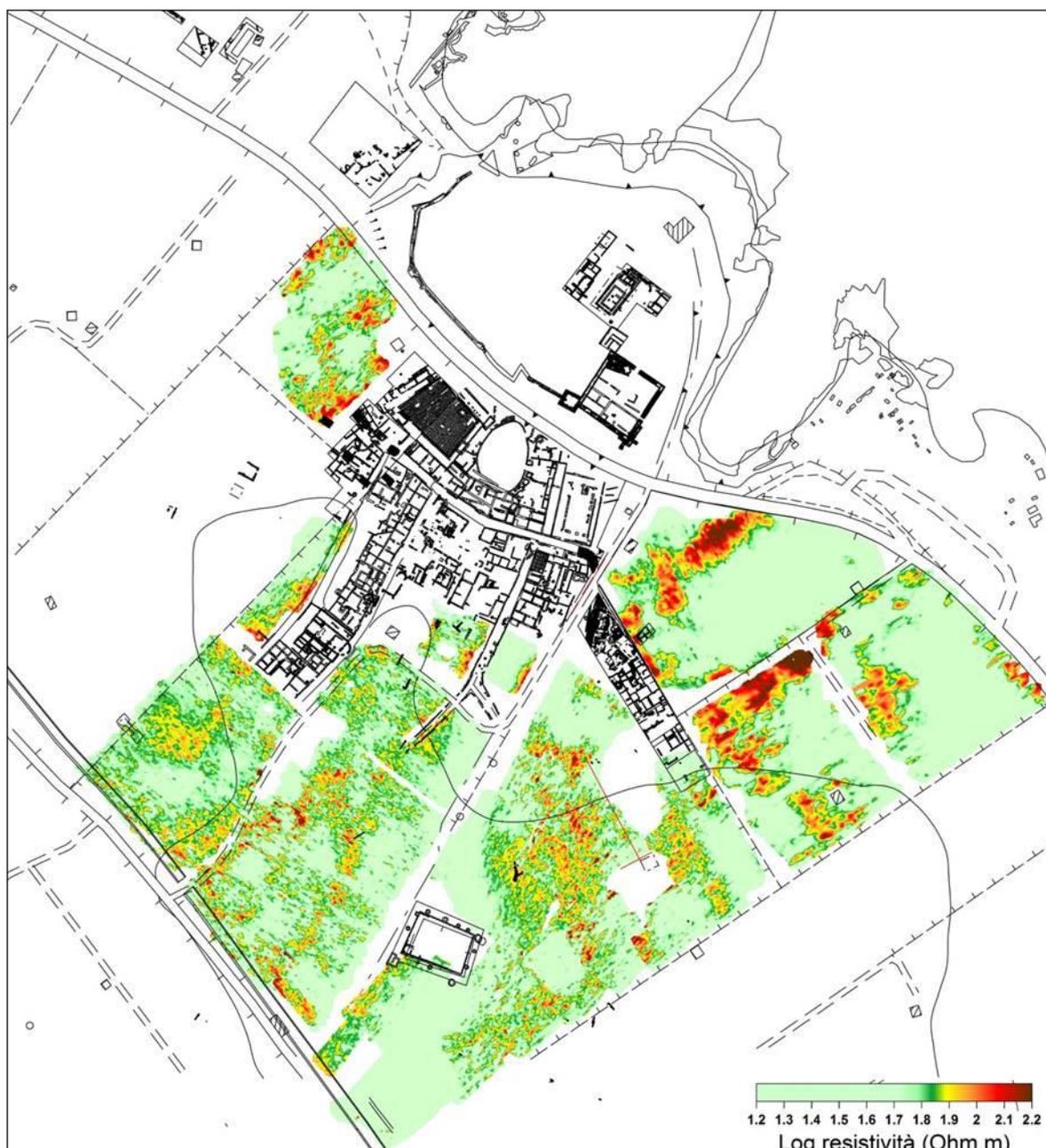


*Figura 4.24. Aree di acquisizione del metodo ad induzione elettromagnetica.*

La prima, visibile in figura 4.26 con una colorazione viola, potrebbe rappresentare la continuazione della via Traiana che dopo aver superato il settore delle terme curva verso Sud-Est per proseguire con un andamento rettilineo verso la Porta Sud. La seconda presenta un andamento rettilineo e un orientamento parallelo alla precedente. Considerato che questa anomalia costeggia le strutture portate alla luce dai recenti scavi, potrebbe essere interpretata come una diramazione secondaria della via Traiana che aveva la funzione di mettere in collegamento il settore Ovest della città con quello Est. Le due

anomalie trovano una perfetta corrispondenza con le tracce n. 1 e 3 individuate analizzando le fotografie aeree e le immagini satellitari.

La terza caratterizzata, come le precedenti, da un andamento rettilineo è localizzata immediatamente a Sud del criptoportico ed è stata interpretata come un'arteria stradale, in quanto si dispone ad una distanza di circa 40 metri<sup>89</sup> dall'anomalia individuata nell'area successiva ed interpretata come un'asse viario.



*Figura 4.25. Mappa di resistività elettrica relativa alla frequenza di 15000 Hz.*

<sup>89</sup> Le arterie secondarie erano disposte ad intervalli regolari di circa 35 m ed avevano lo scopo di mettere in collegamento tutti i settori della città.

Nell'area 7 (figura 4.24) vengono individuate tre anomalie alto resistive di grande interesse (figura 4.25). Le prime due (visibili nelle immagini da remoto n. 6-7) hanno una larghezza di circa 4 m, presentano un andamento parallelo e si dispongono ad una distanza di circa 30 m l'una dall'altra.

La prima rappresenta la naturale prosecuzione di un'arteria secondaria (scavata solo in parte) che si snoda dalla via Traiana all'altezza della basilica civile. La seconda, identificabile anche essa come un'asse stradale secondario, doveva snodarsi dalla via principale all'altezza del cosiddetto "anfiteatro".

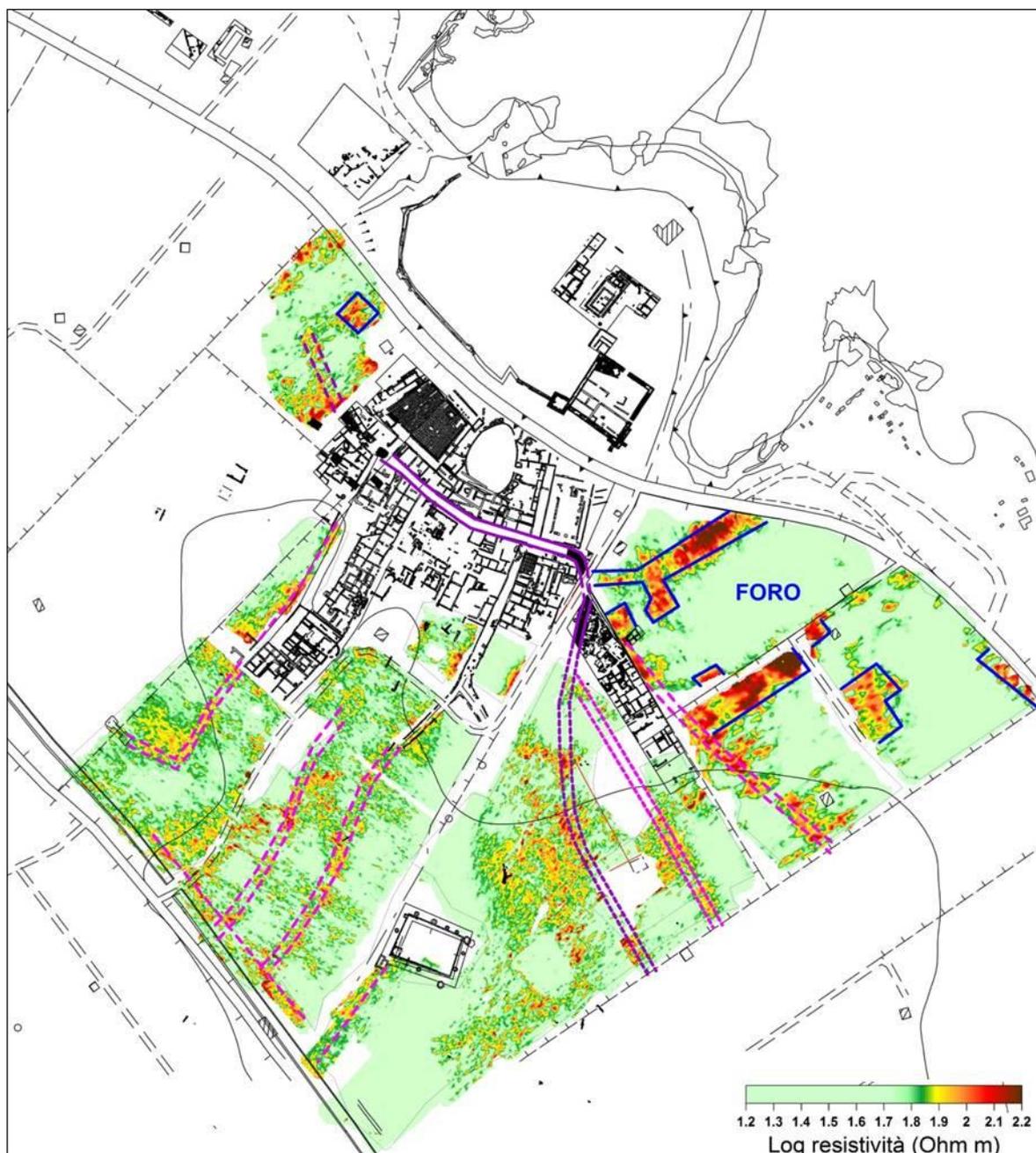
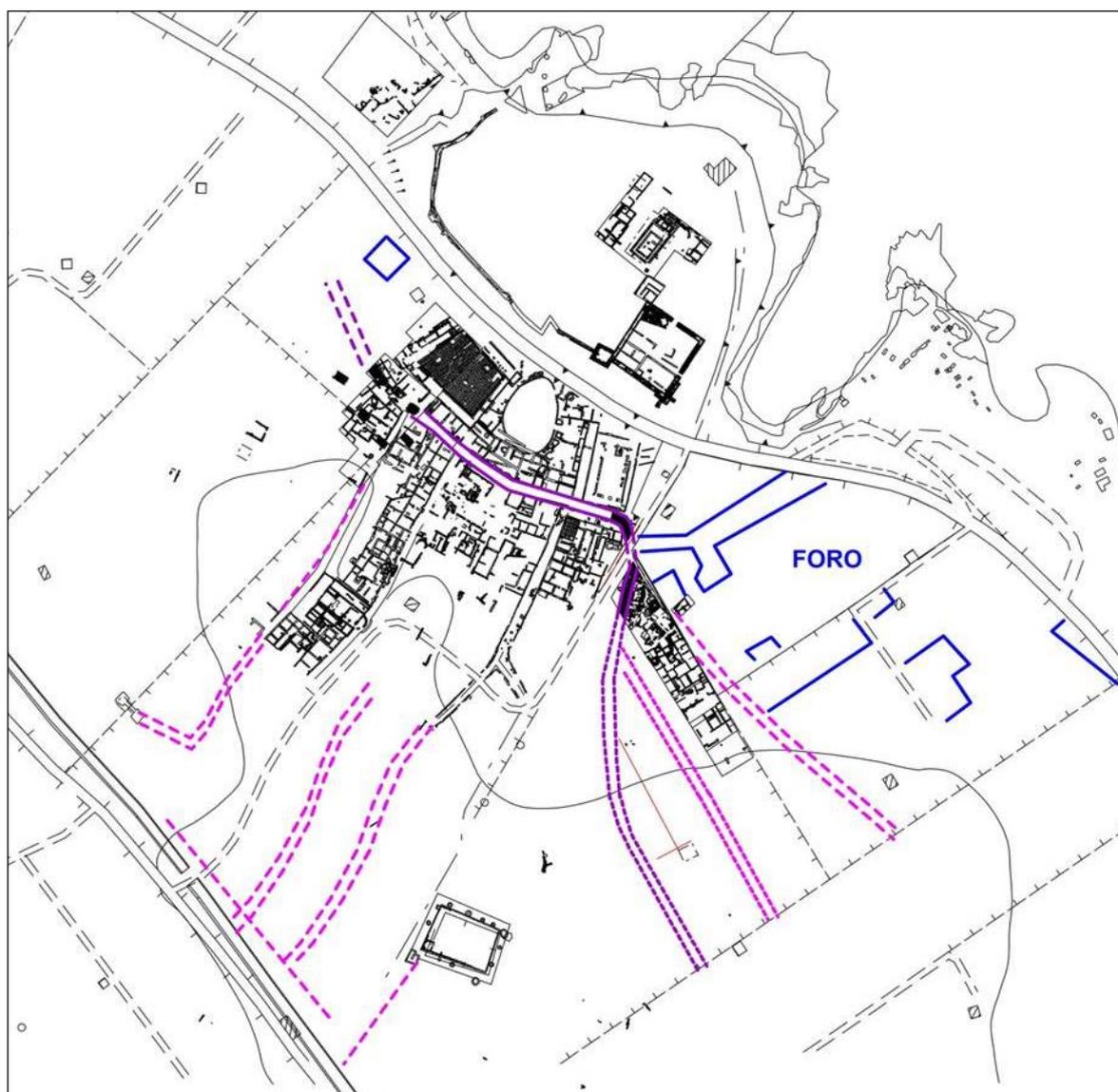


Figura 4.26. Mappa di resistività elettrica relativa alla frequenza di 15000 Hz con l'identificazione delle anomalie più rilevanti. In blu vengono identificate le strutture, in viola il percorso della via Traiana ed in magenta i percorsi degli assi viari secondari.

Quest'ultima non è stata portata alla luce dagli scavi in quanto risulta obliterata dalla costruzione della basilica episcopale.

La terza anomalia, caratterizzata un andamento rettilineo, risulta essere perpendicolare alle prime due e potrebbe essere identificata con ulteriore asse viario.

Nelle aree 8 e 9 (figura 4.24) vengono identificate due anomalie alto resistive che potrebbero rappresentare la prosecuzione di un arteria secondaria che si snoda dalla via Traiana all'altezza della piazza porticata (figura 4.25). L'anomalia più interessante è quella localizzata nell'area 8 (individuata sulle immagini telerilevate n. 8). Essa caratterizzata nel tratto iniziale da un andamento rettilineo devia bruscamente verso Ovest.



*Figura 4.27. Mappa di interpretazione delle anomalie sovrapposta al rilievo delle evidenze archeologiche.*

Infine nell'area 10 (figura 4.24) viene identificata un'anomalia rettilinea alto resistiva che

si dirige verso Nord-Ovest e risulta essere la prosecuzione della via Traiana (figura 4.25). Per quanto riguarda il rilievo GPR l'elaborazione dei dati ha previsto il filtraggio dei radargrammi e la creazione di 30 *slice* corrispondenti a tagli orizzontali (ciascuno effettuato ogni 4 ns) del volume investigato.

In figura 4.28 viene mostrata, a titolo di esempio, la griglia di acquisizione relativa all'area 1. Nella figura successiva (figura 4.29), invece, vengono presentati i radargrammi filtrati della citata area con l'identificazione delle riflessioni più rilevanti. Essi, numerati in base alla posizione spaziale (x, y) che occupano all'interno della griglia, presentano una scala di colore in toni di grigi (i colori più scuri identificano riflessioni più forti e viceversa). In figura 4.30 vengono mostrate le *slice* più rilevanti ottenute dall'unione delle sei aree di acquisizione e la relativa profondità espressa in ns. Le gradazioni di rosso indicano le zone che hanno prodotto riflessioni più forti, viceversa alle riflessioni più deboli è stata attribuita una tonalità tendente al bianco.

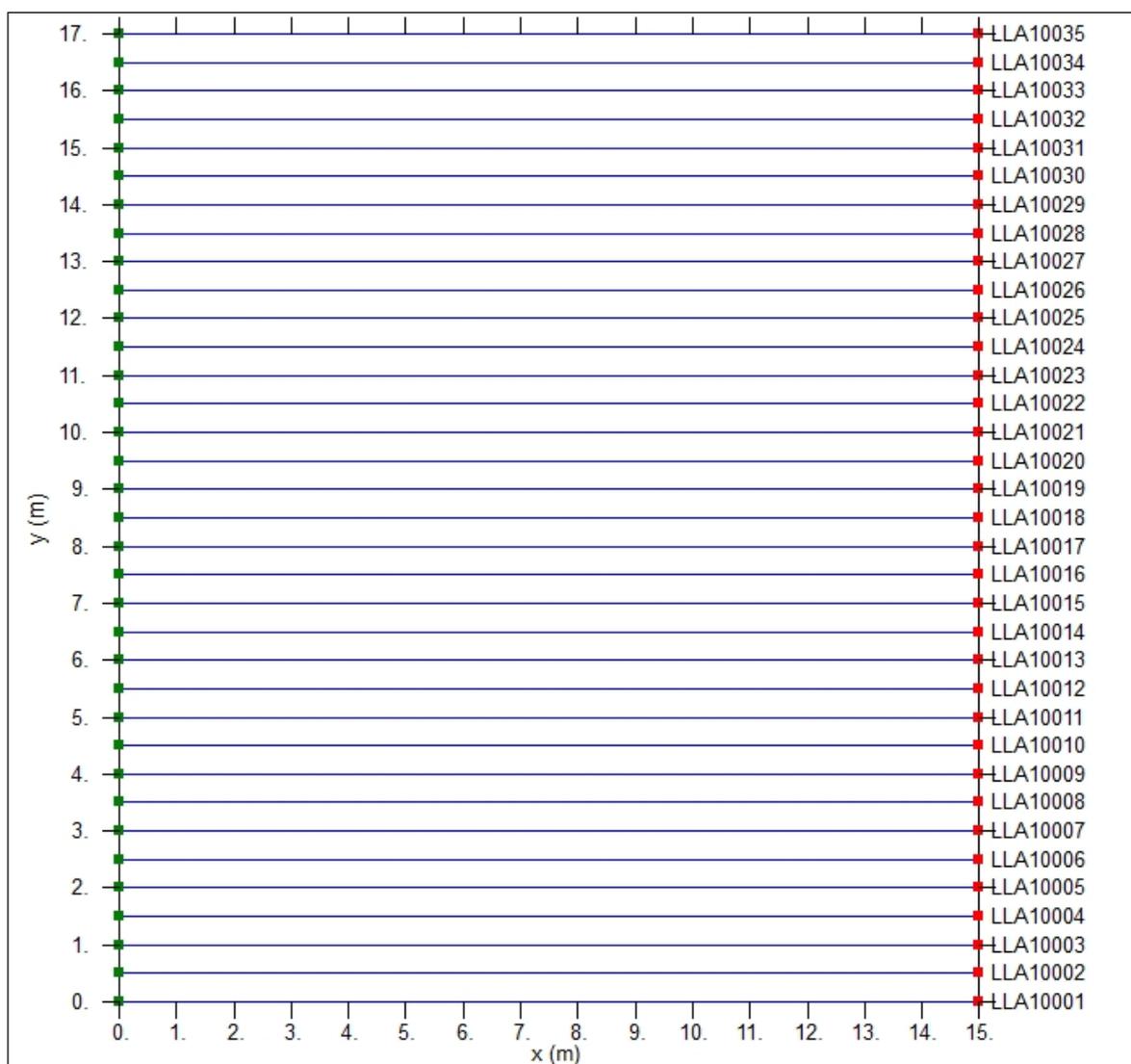
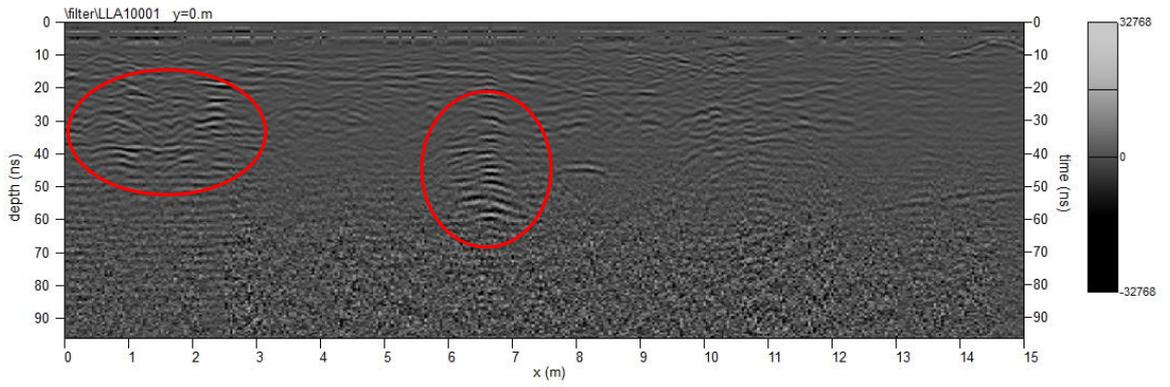
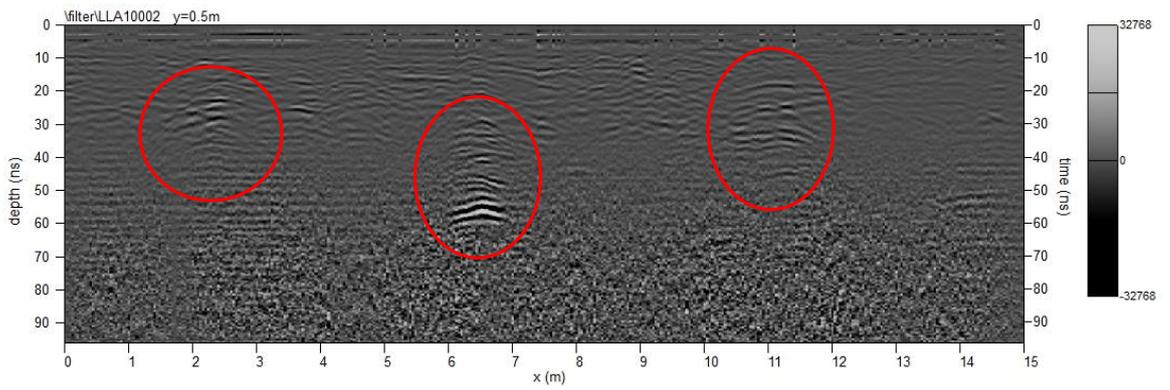


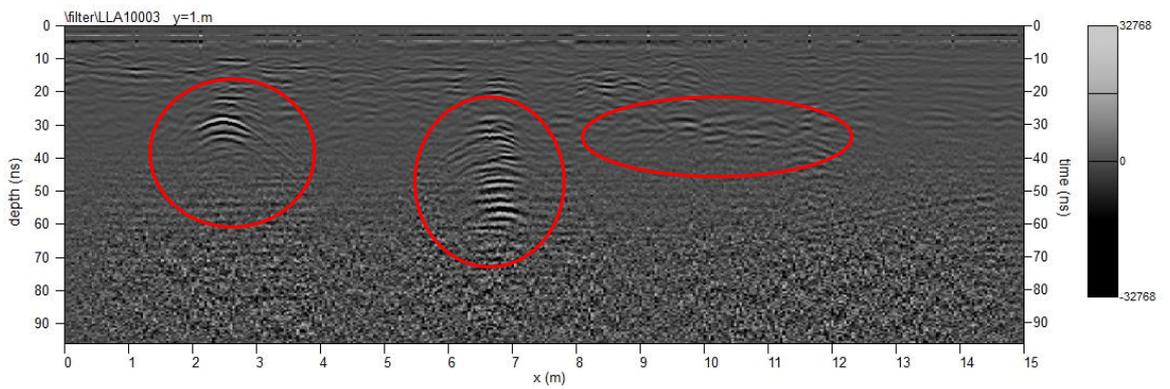
Figura 4.28. Griglia di acquisizione dell'area 1.



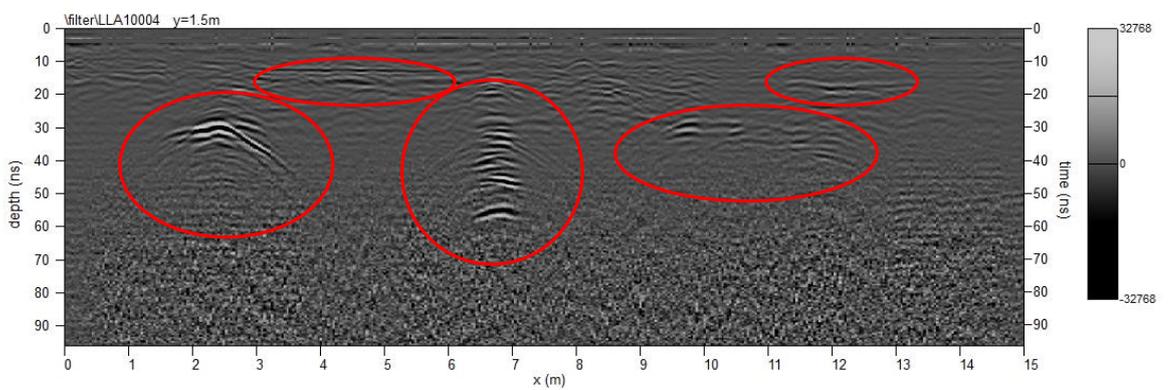
*Profilo LLA 1001.*



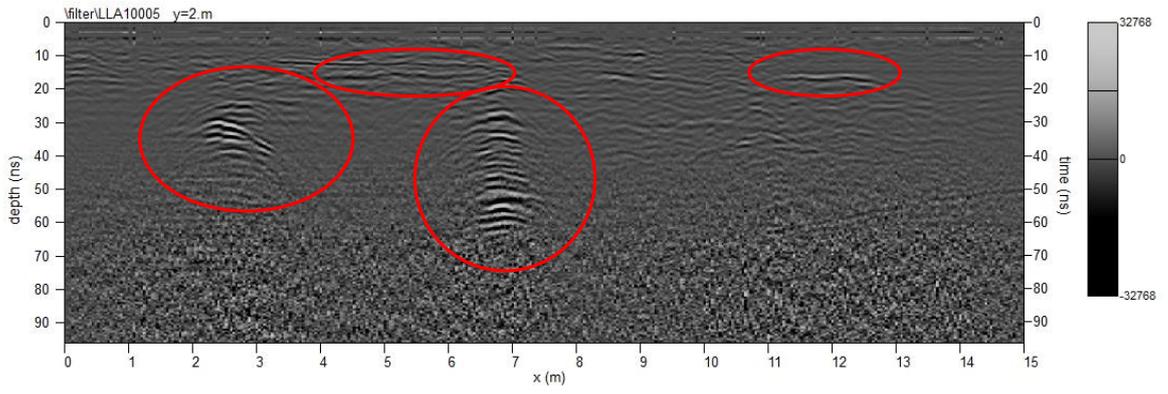
*Profilo LLA 1002.*



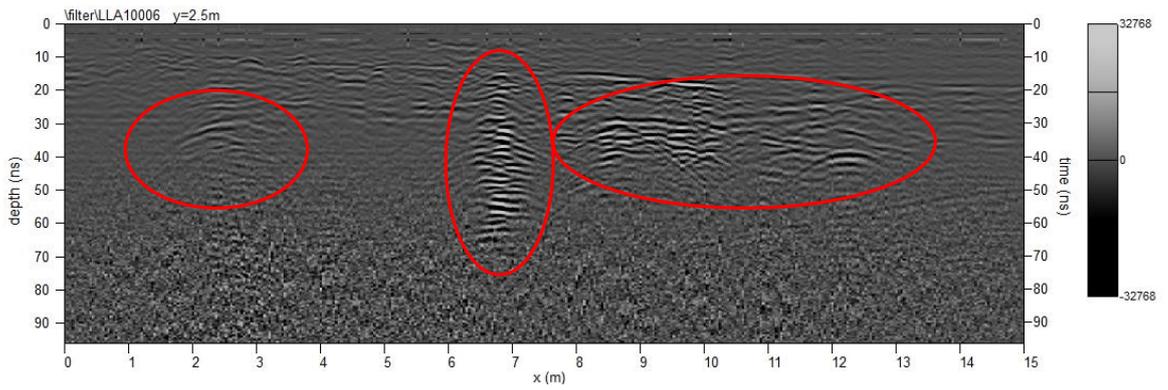
*Profilo LLA 1003.*



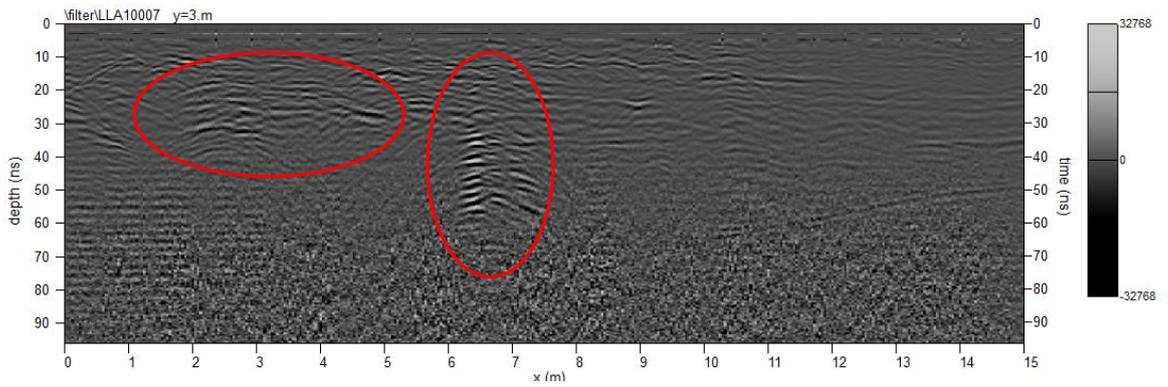
*Profilo LLA 1004.*



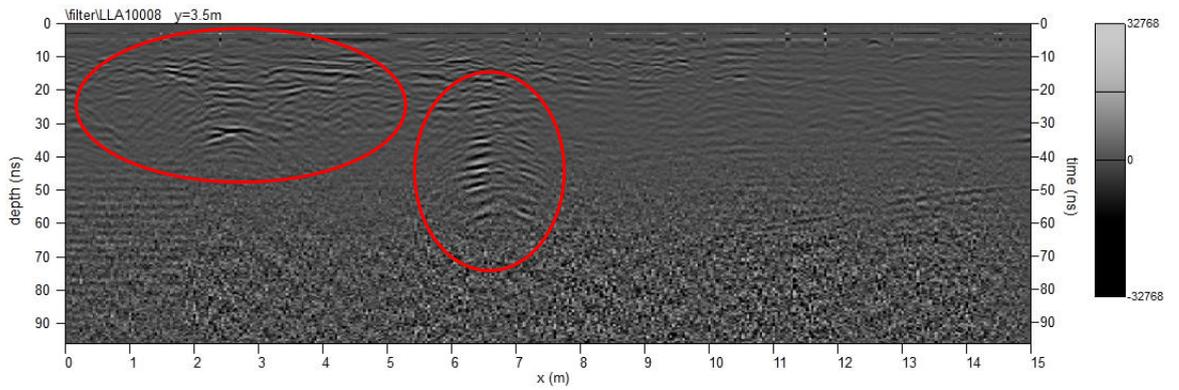
*Profilo LLA 1005.*



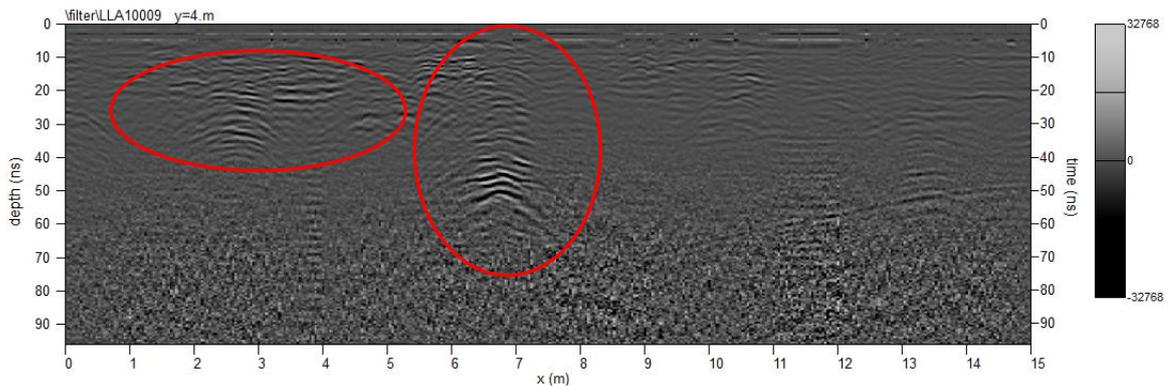
*Profilo LLA 1006.*



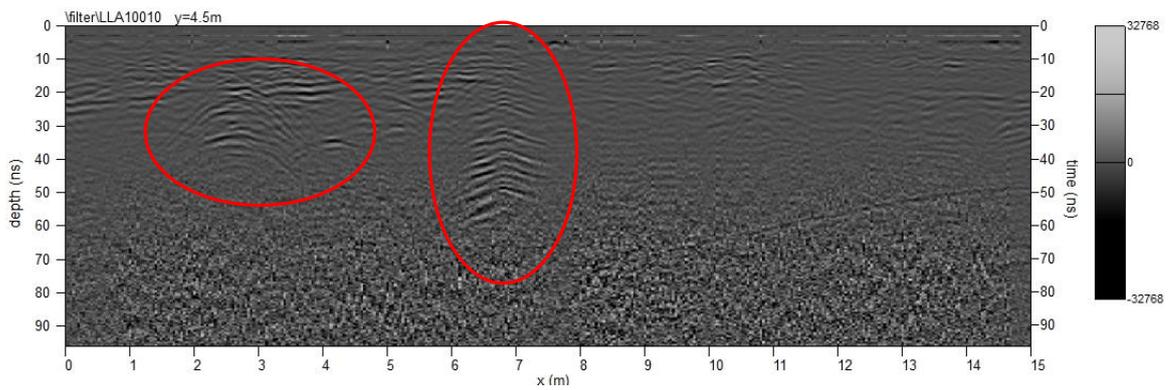
*Profilo LLA 1007.*



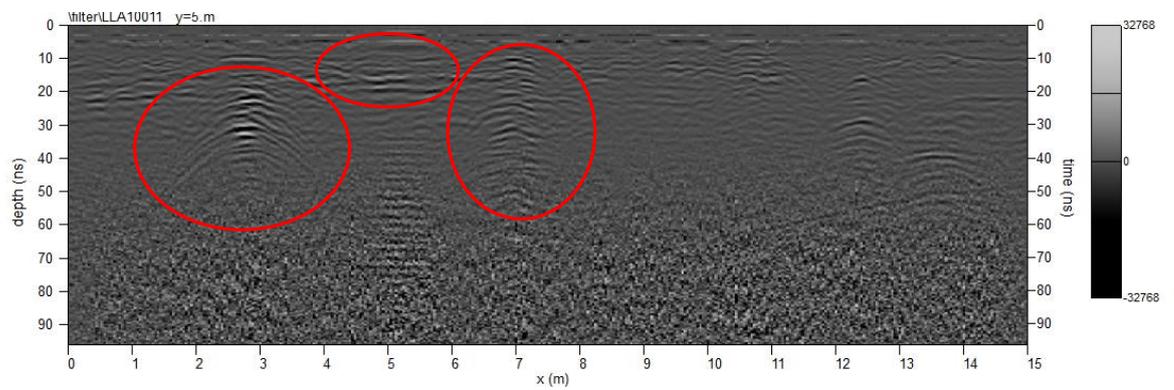
*Profilo LLA 1008.*



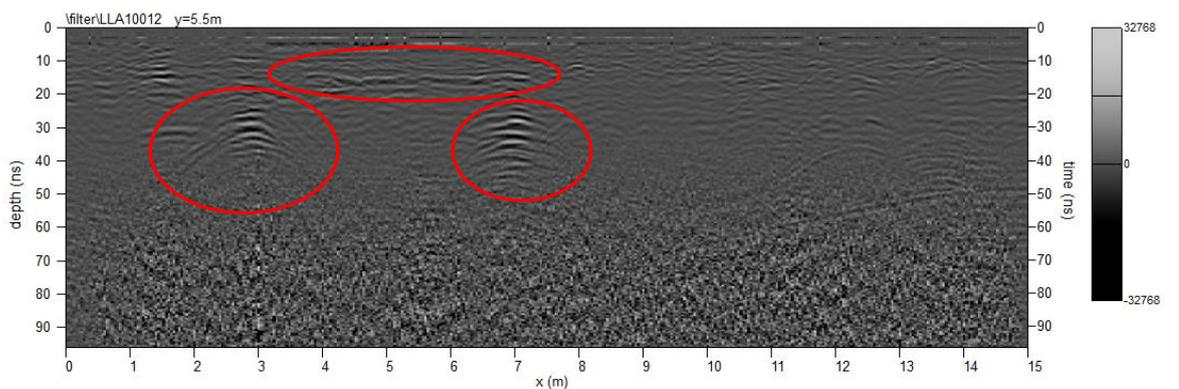
*Profilo LLA 1009.*



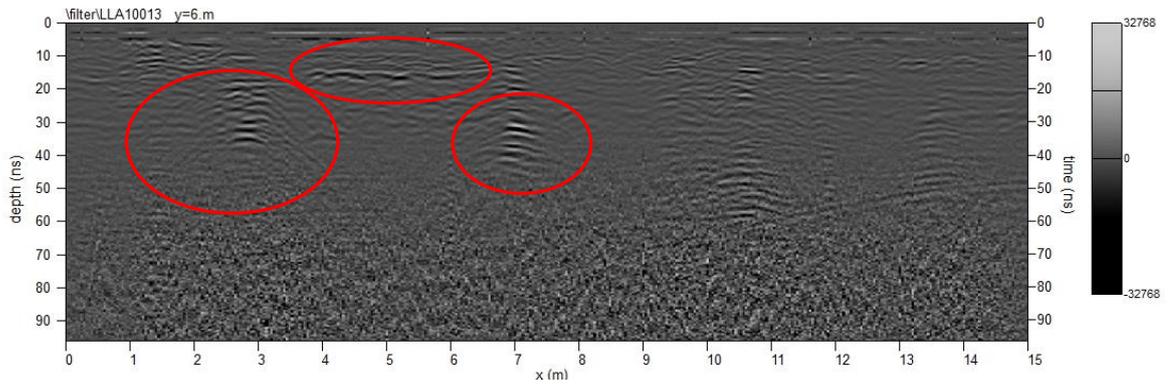
*Profilo LLA 1010.*



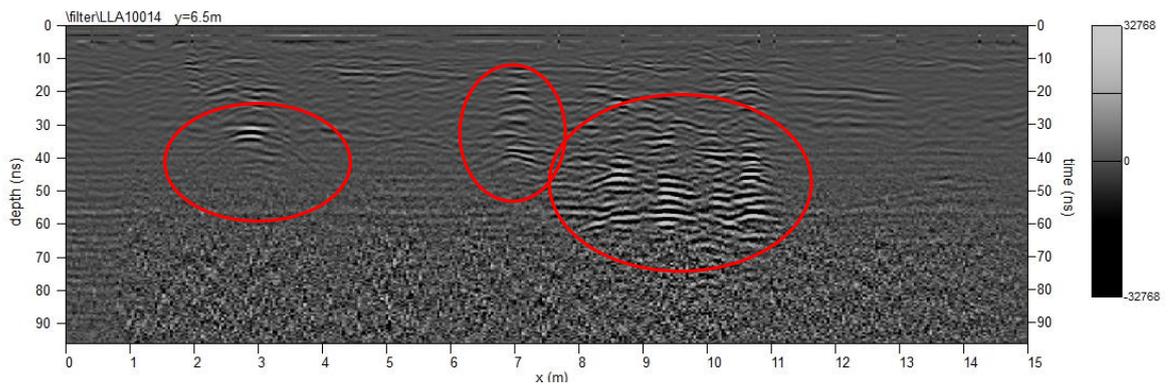
*Profilo LLA 1011.*



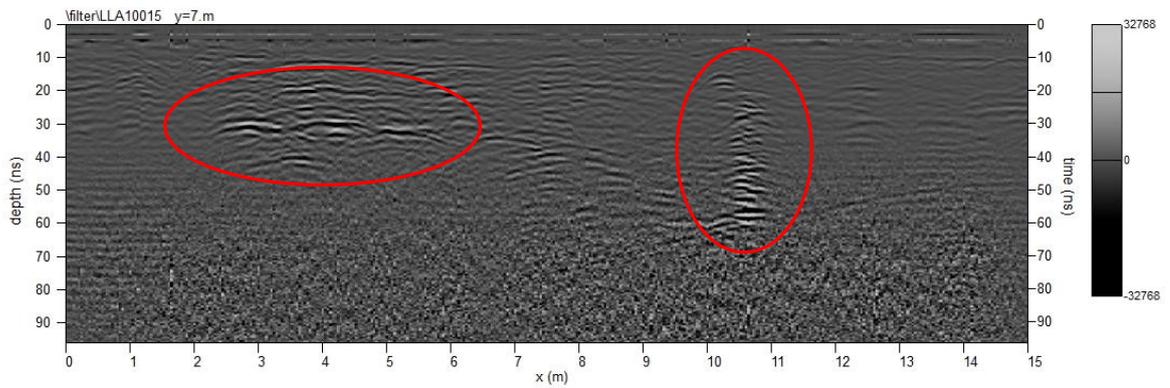
*Profilo LLA 1012.*



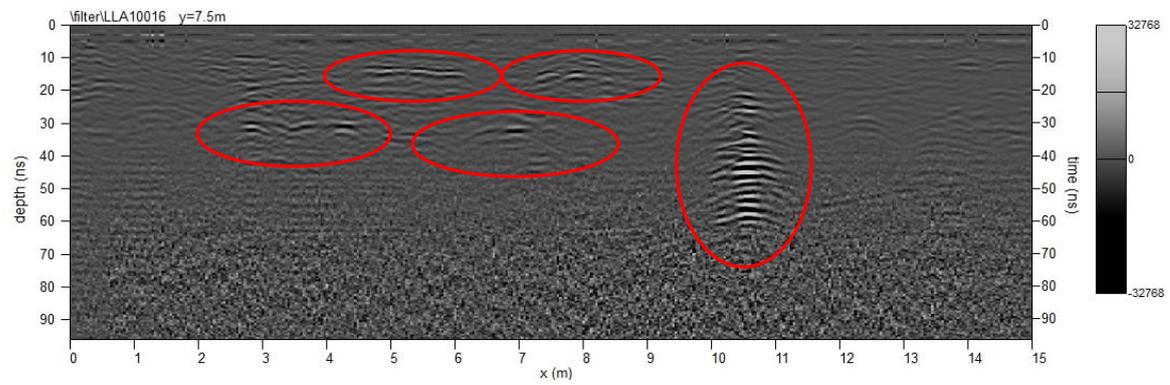
*Profilo LLA 1013.*



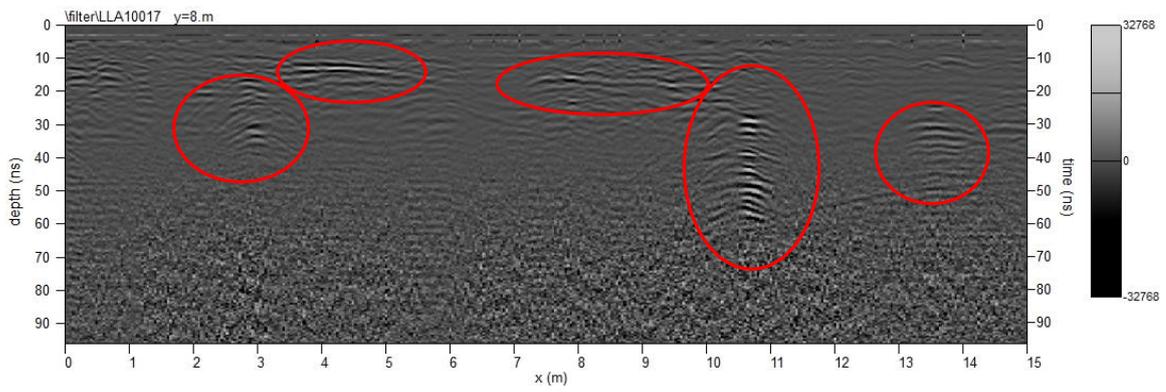
*Profilo LLA 1014.*



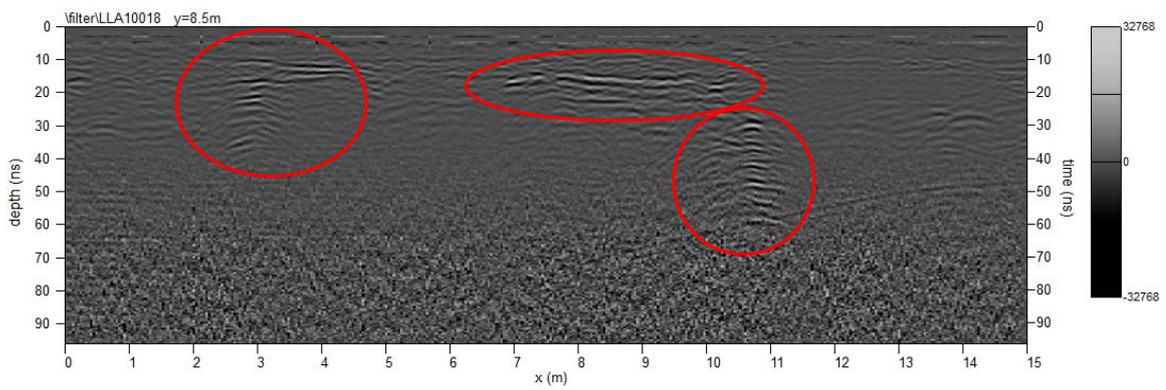
*Profilo LLA 1015.*



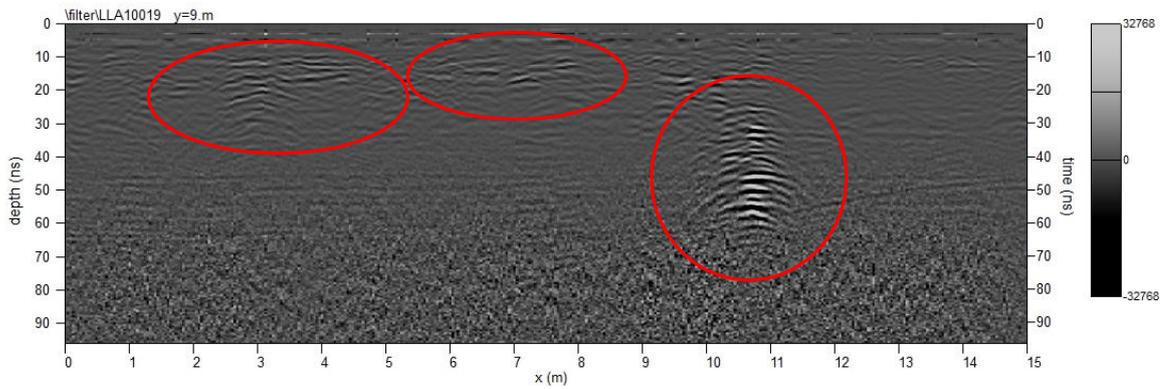
*Profilo LLA 1016.*



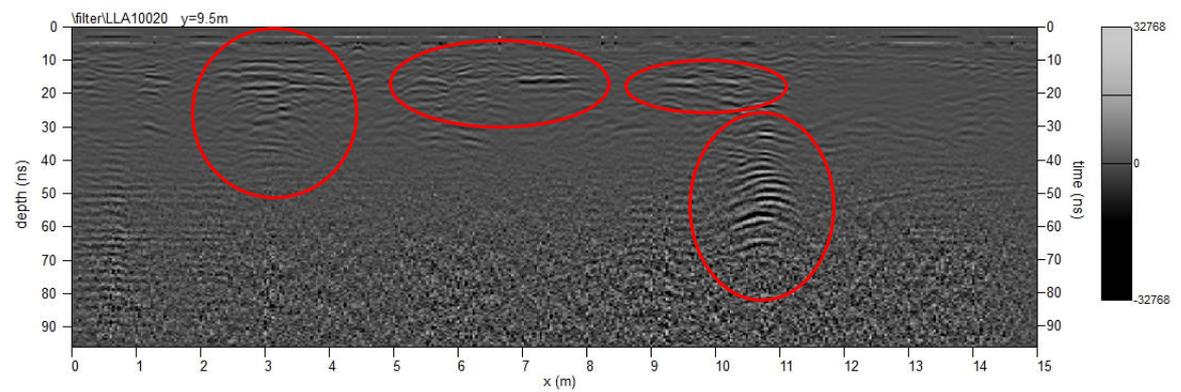
*Profilo LLA 1017.*



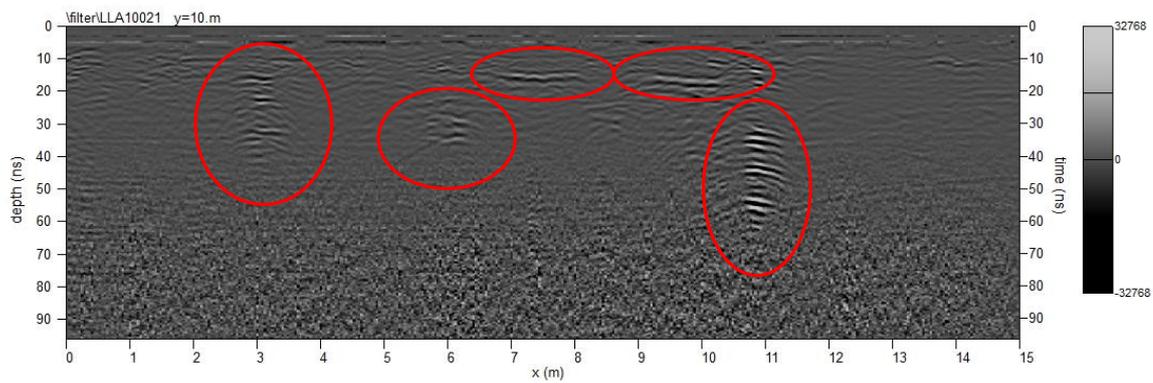
*Profilo LLA 1018.*



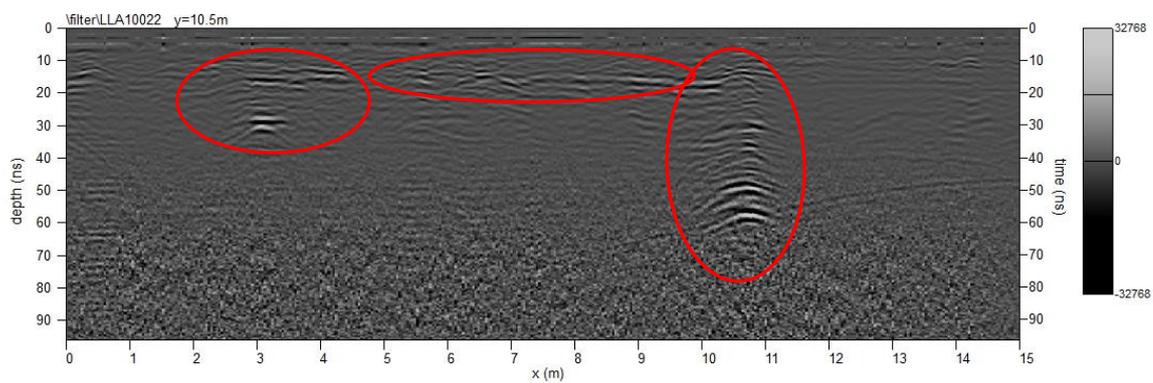
*Profilo LLA 1019.*



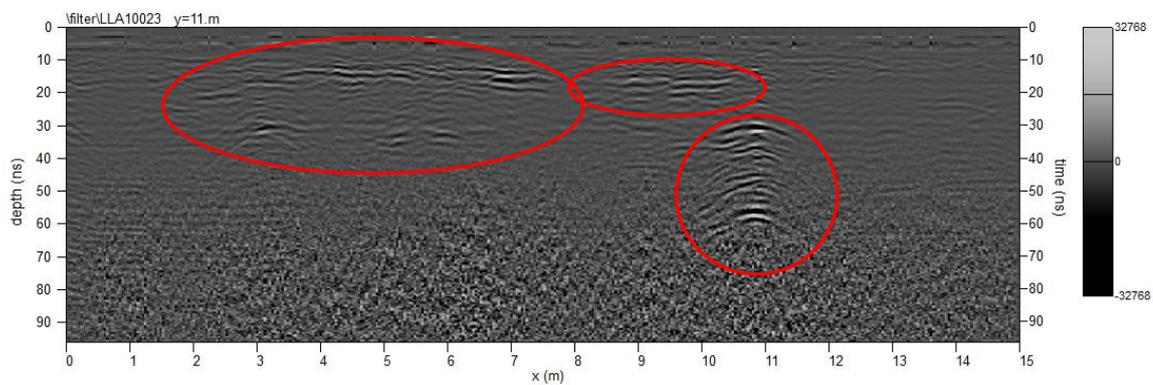
*Profilo LLA 1020.*



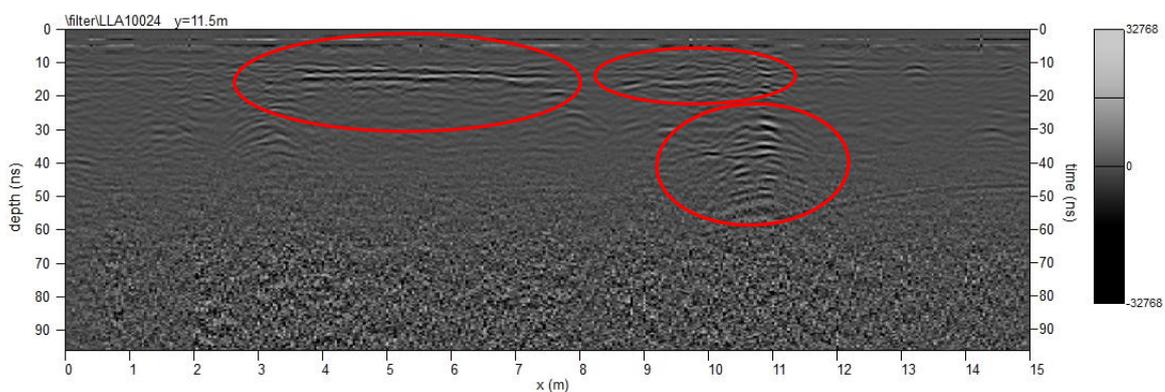
*Profilo LLA 1021.*



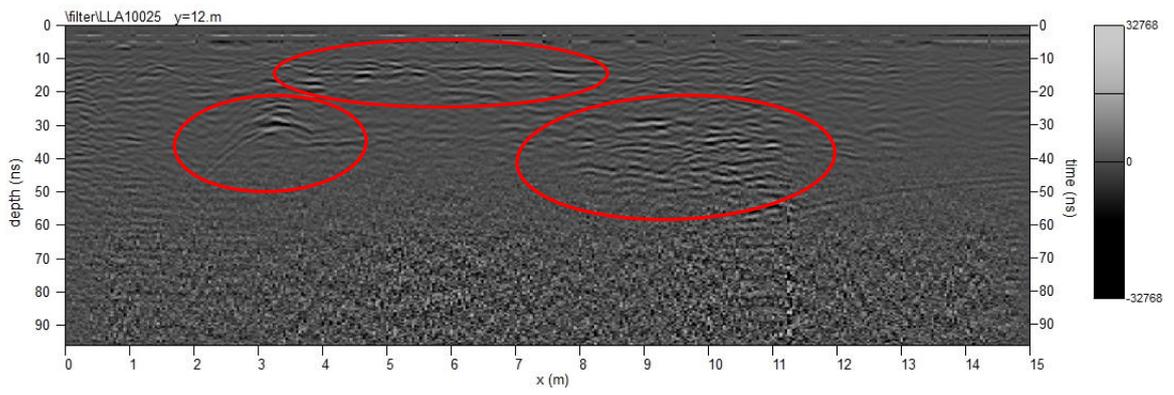
*Profilo LLA 1022.*



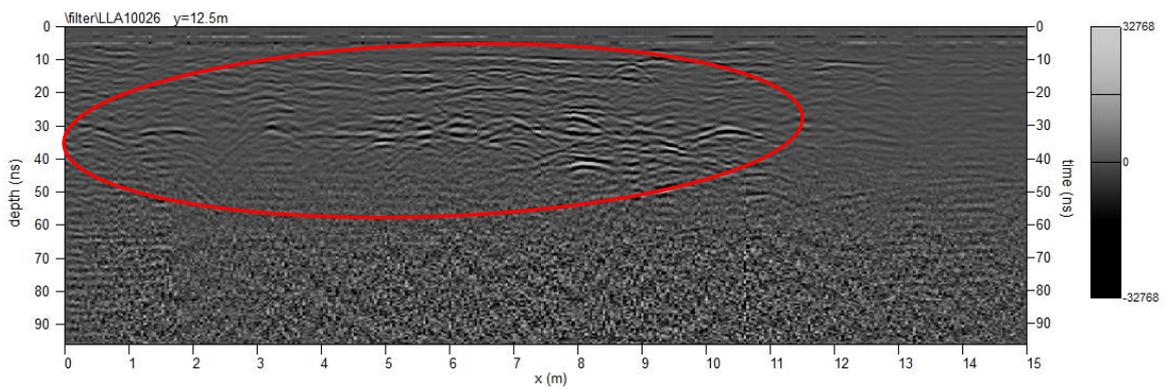
*Profilo LLA 1023.*



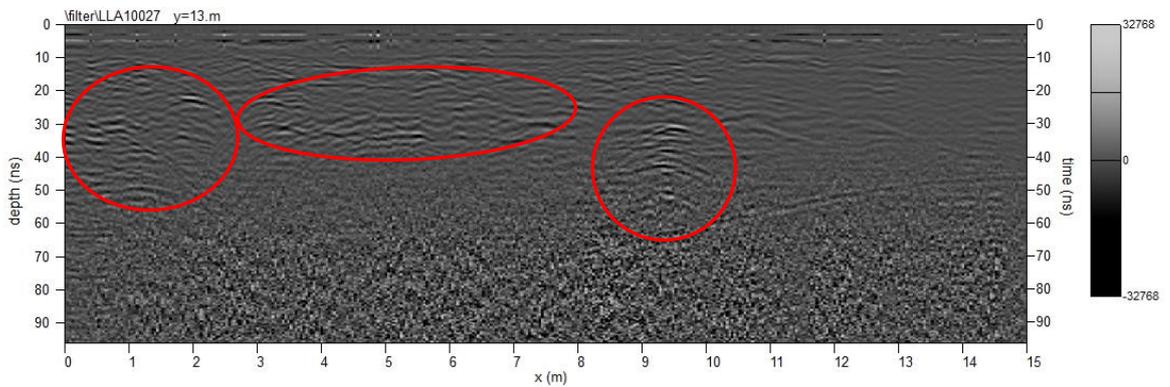
*Profilo LLA 1024.*



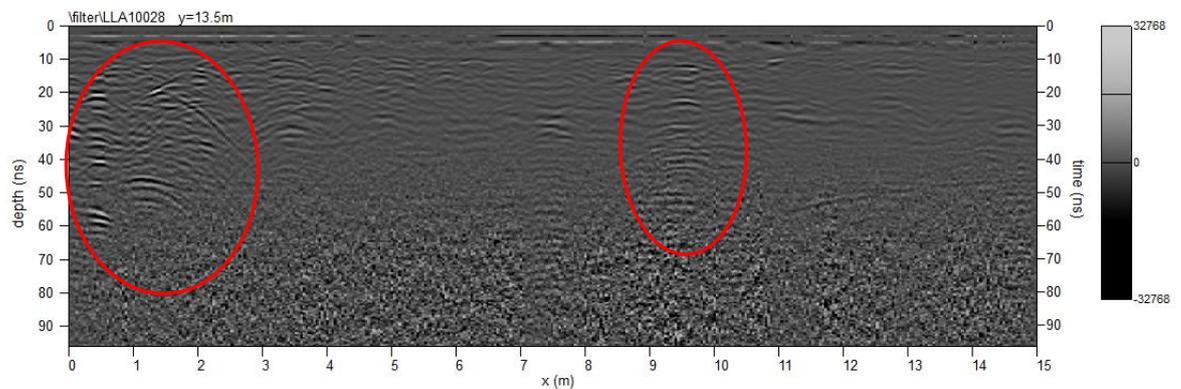
*Profilo LLA 1025.*



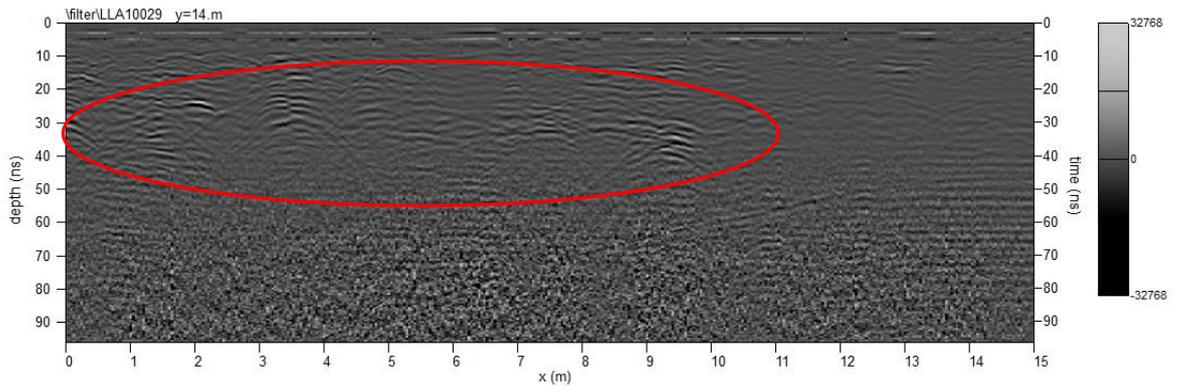
*Profilo LLA 1026.*



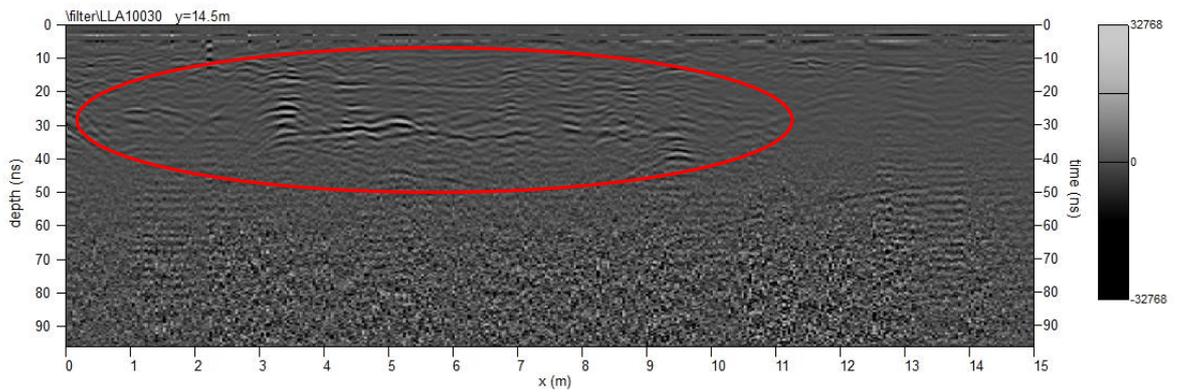
*Profilo LLA 1027.*



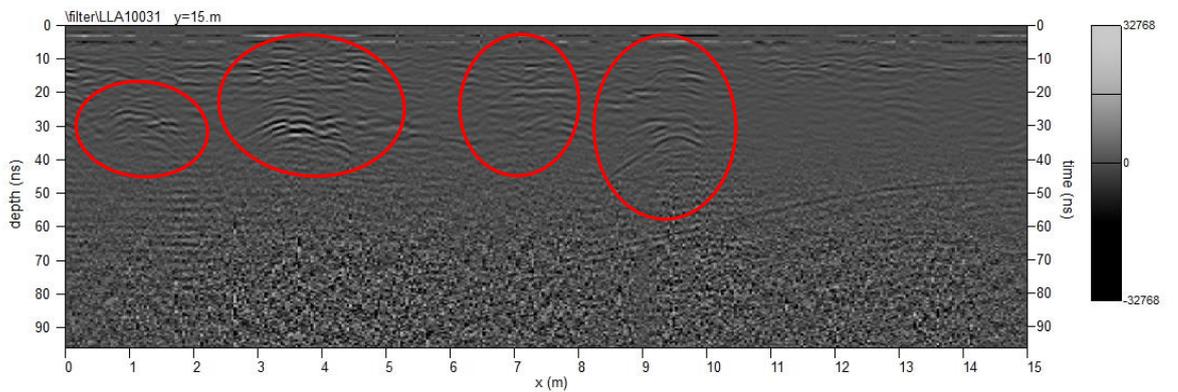
*Profilo LLA 1028.*



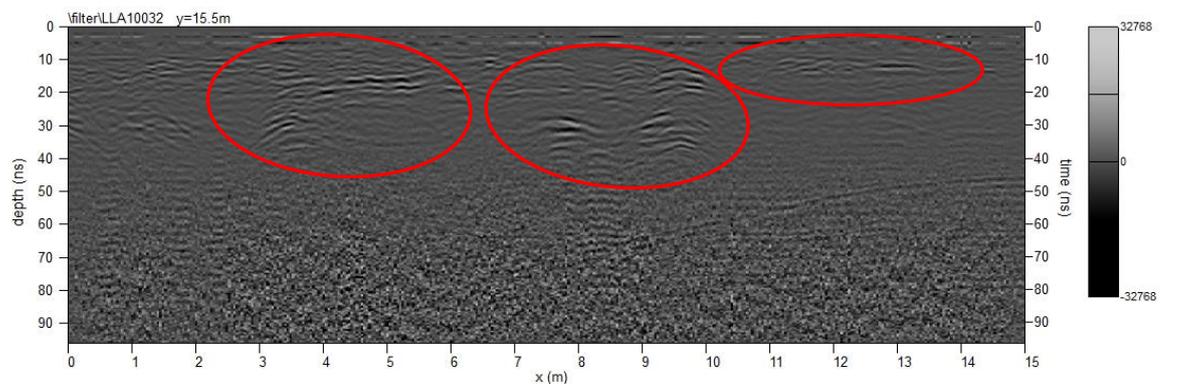
*Profilo LLA 1029.*



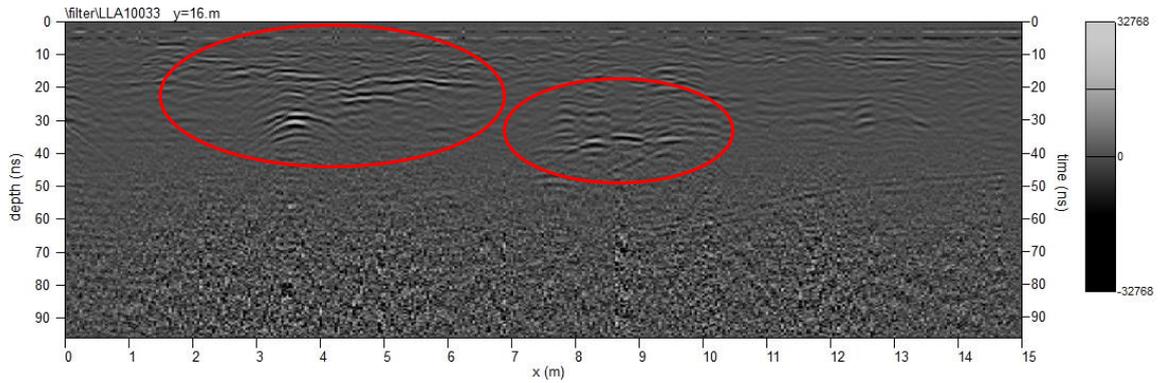
*Profilo LLA 1030.*



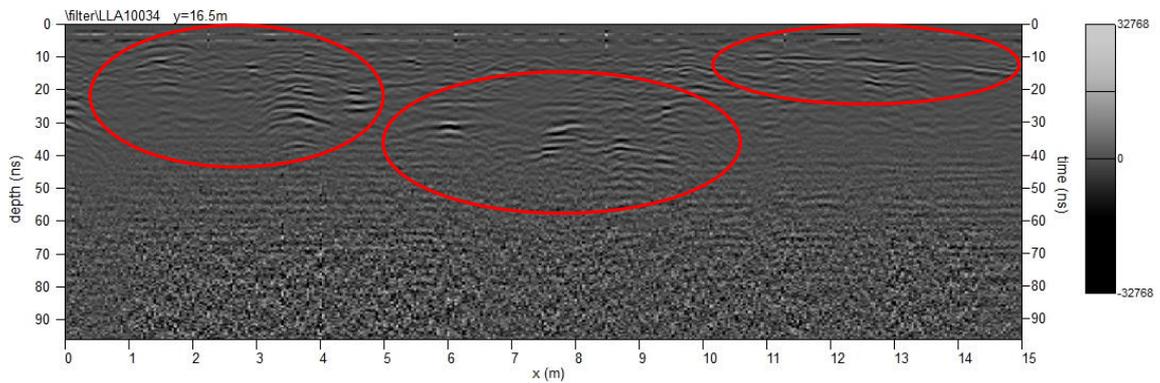
*Profilo LLA 1031.*



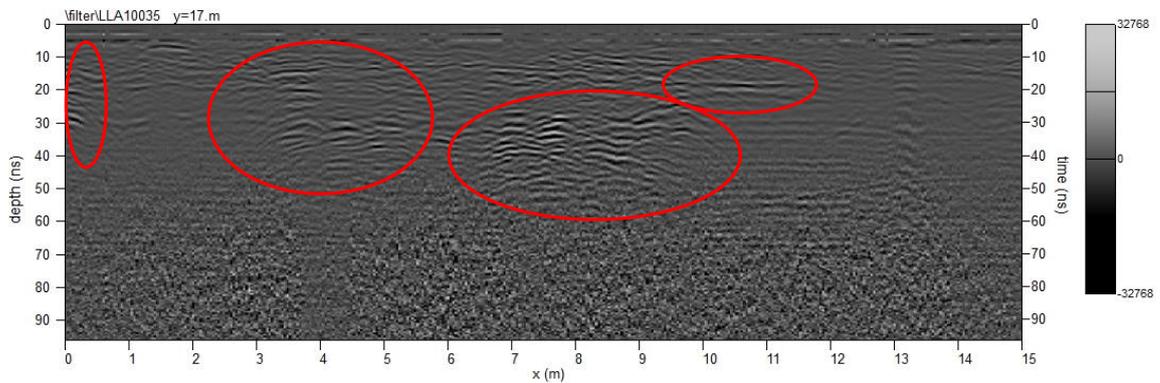
*Profilo LLA 1032.*



*Profilo LLA 1033.*



*Profilo LLA 1034.*



*Profilo LLA 1035.*

*Figura 4.29. Radargrammi dell'area 1.*

Le *slice* (delle trenta elaborate sono state scelte solo le più significative) visibili in figura 4.30 mostrano con un'elevata risoluzione diverse zone caratterizzate da forti riflessioni. Le più rilevanti da un punto di vista archeologico sono quelle che vanno dalla *slice* 05 alla *slice* 14. Analizzando queste dieci profondità l'attenzione si focalizza su un'anomalia avente andamento rettilineo che presenta una larghezza di circa 4 m e che tende a scomparire nelle profondità più elevate (*slice* dalla 12 alla 14). Essa è stata individuata sia dalle immagini da remoto che dalle indagini ad induzione elettromagnetica, considerata la

sua forma e la sua larghezza potrebbe confermare le ipotesi fatte precedentemente ed essere identificata come un asse stradale secondario della via Traiana.

A Nord di quest'ultima viene individuata una struttura quadrata (dimensioni di circa 20 x 20 m) suddivisa in più ambienti (visibile molto bene nelle *slice* 09-10-11-12) che tende a scomparire nelle profondità più elevate.

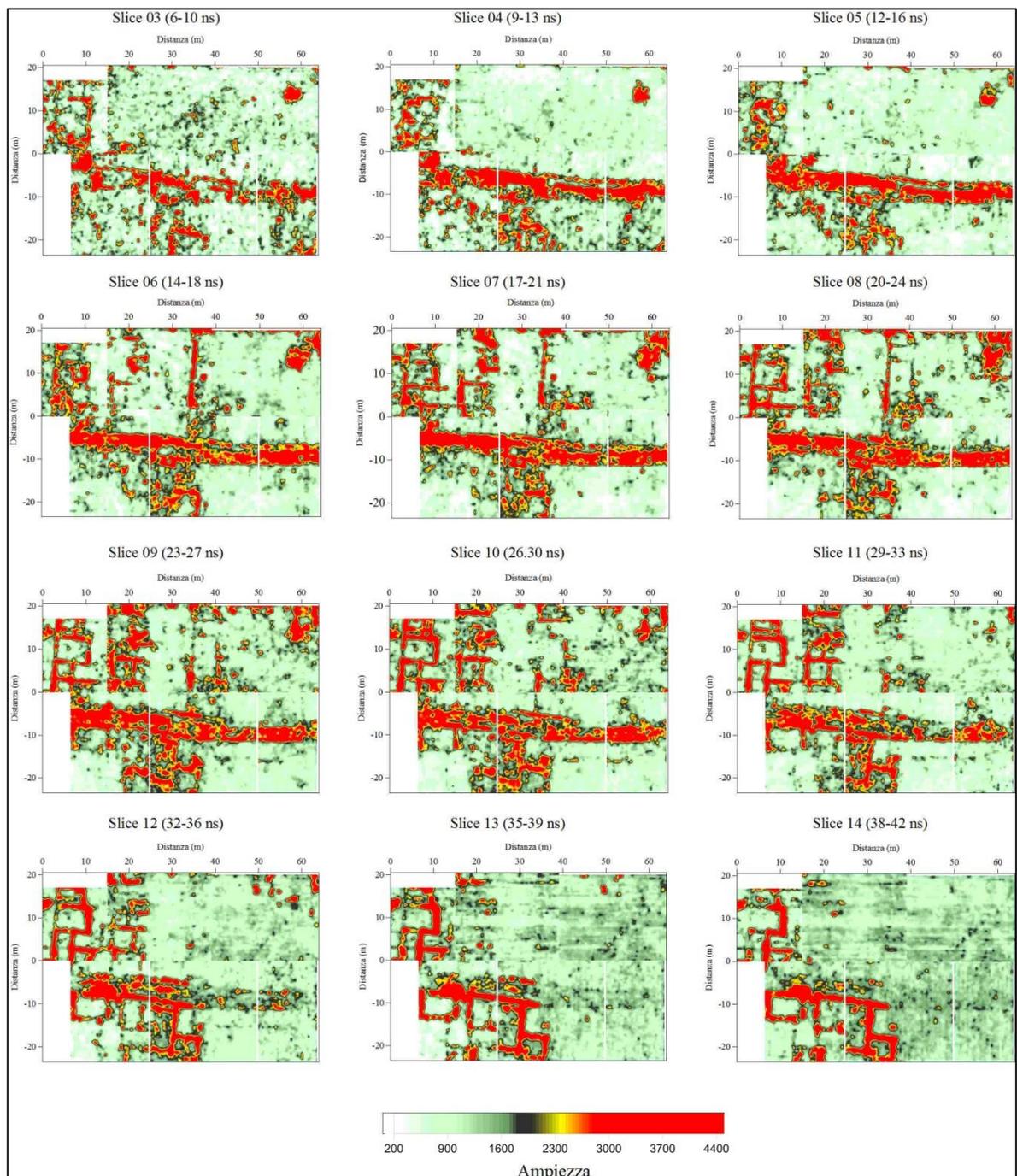


Figura 4.30. Slice relative alla frequenza di 600 MHz

Un'altra anomalia di rilievo è stata individuata nelle profondità più elevate. Essa che si

inizia a distinguere nelle *slice* 09-10-11 e risulta ben visibile nelle successive (*slice* 12-13-14) è identificabile come una struttura, suddivisa in cinque ambienti, avente dimensioni di circa 25 x 15 m.

Successivamente, per ottenere una visione più chiara delle anomalie e capire il loro sviluppo nelle diverse profondità, sono stati realizzati dei 3D delle *slice* più significative (07-10-12-14) (visualizzabili in due diversi modi: superfici 3D figure 4.31-4.34 e mappe di rilievi 3D figure 4.35-4.38) e un volume di profondità composto da più *slice* sovrapposte (06-08-09-11-14) (figura 4.39).

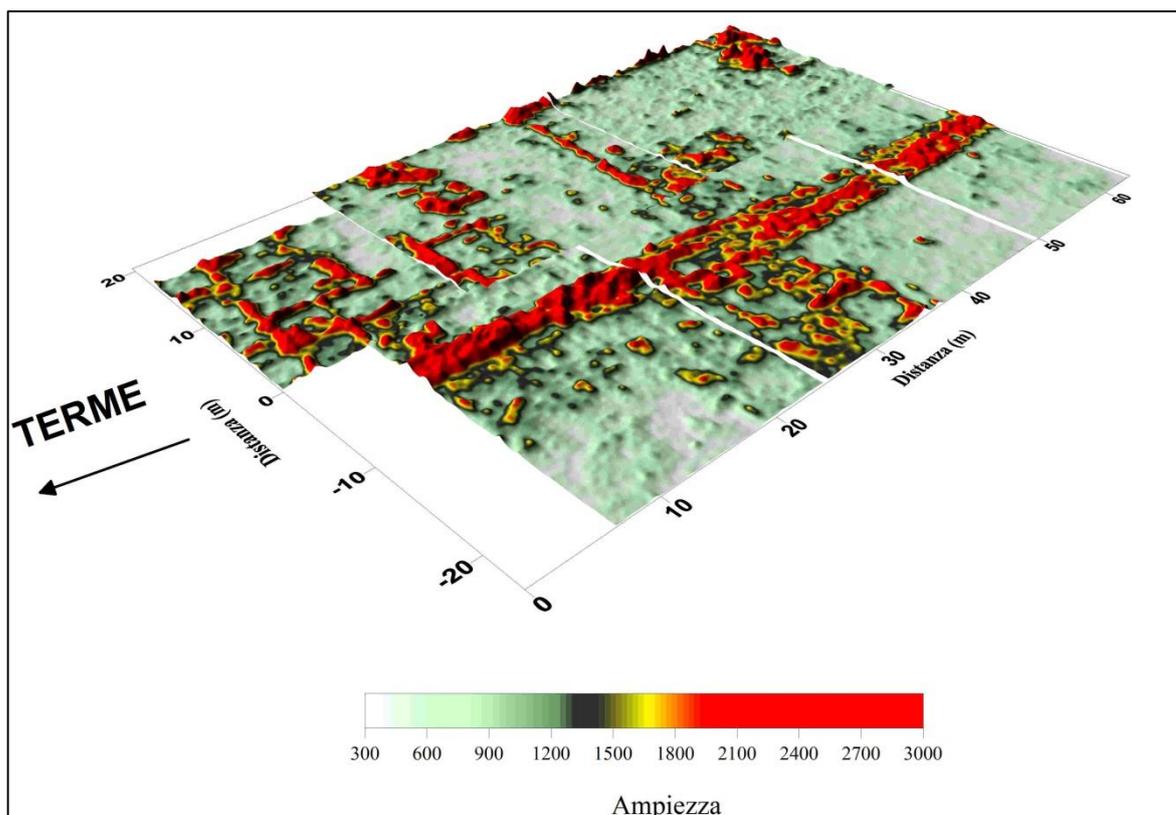


Figura 4.31. Mappa di superfici 3D relativa alla finestra temporale di 17-21 ns.

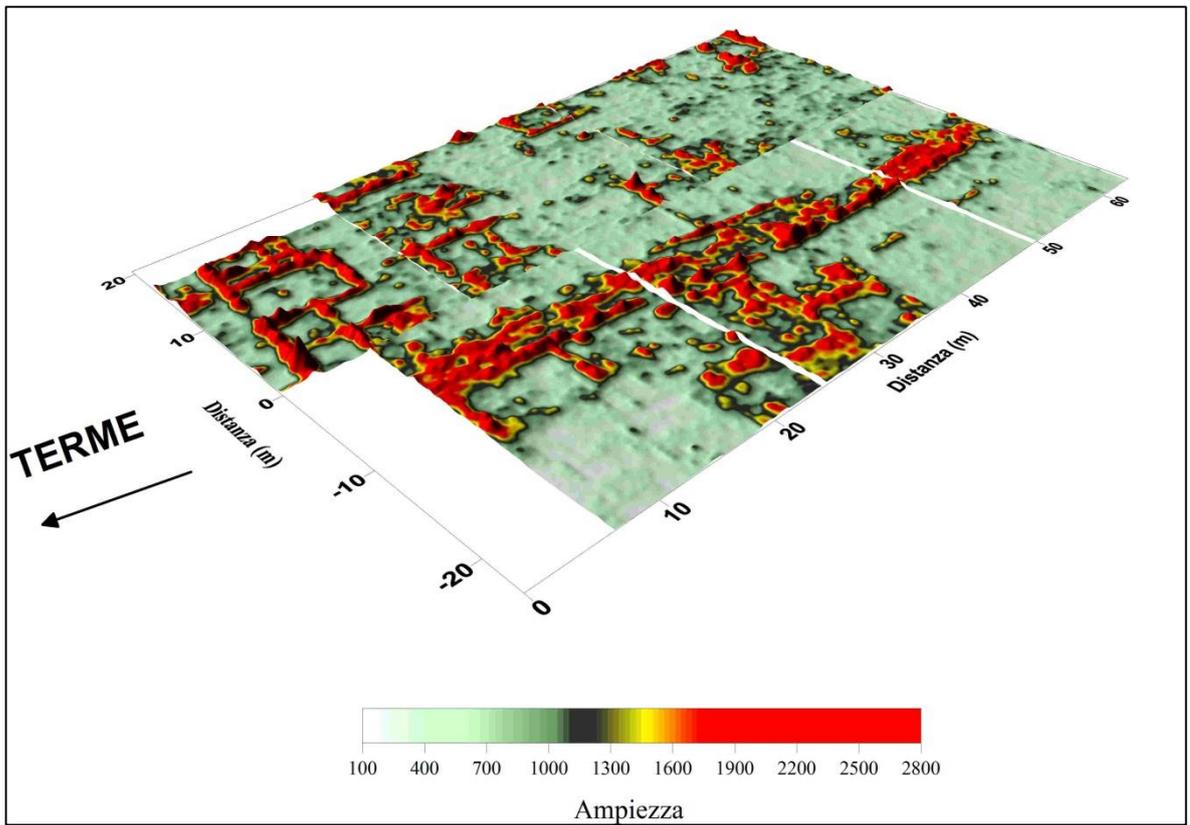


Figura 4.32. Mappa di superfici 3D relativa alla finestra temporale di 26-30 ns.

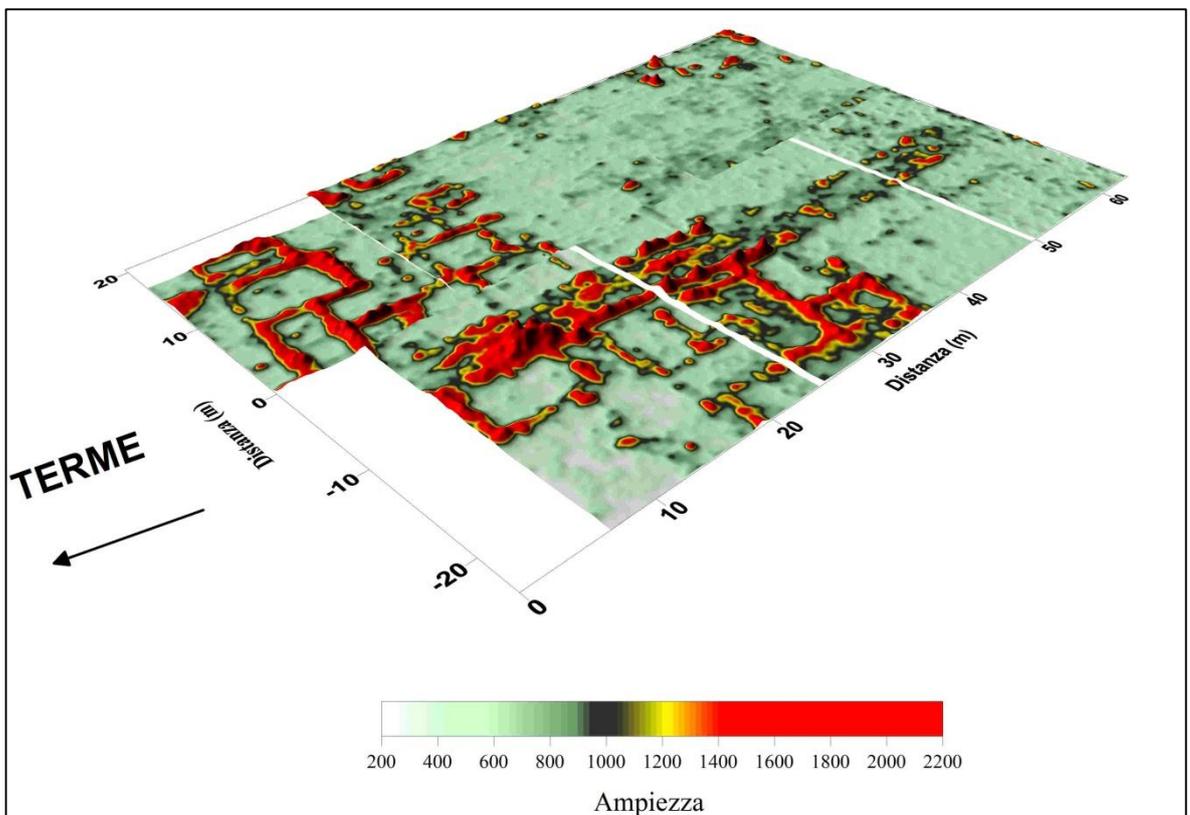


Figura 4.33. Mappa di superfici 3D relativa alla finestra temporale di 32-36 ns.

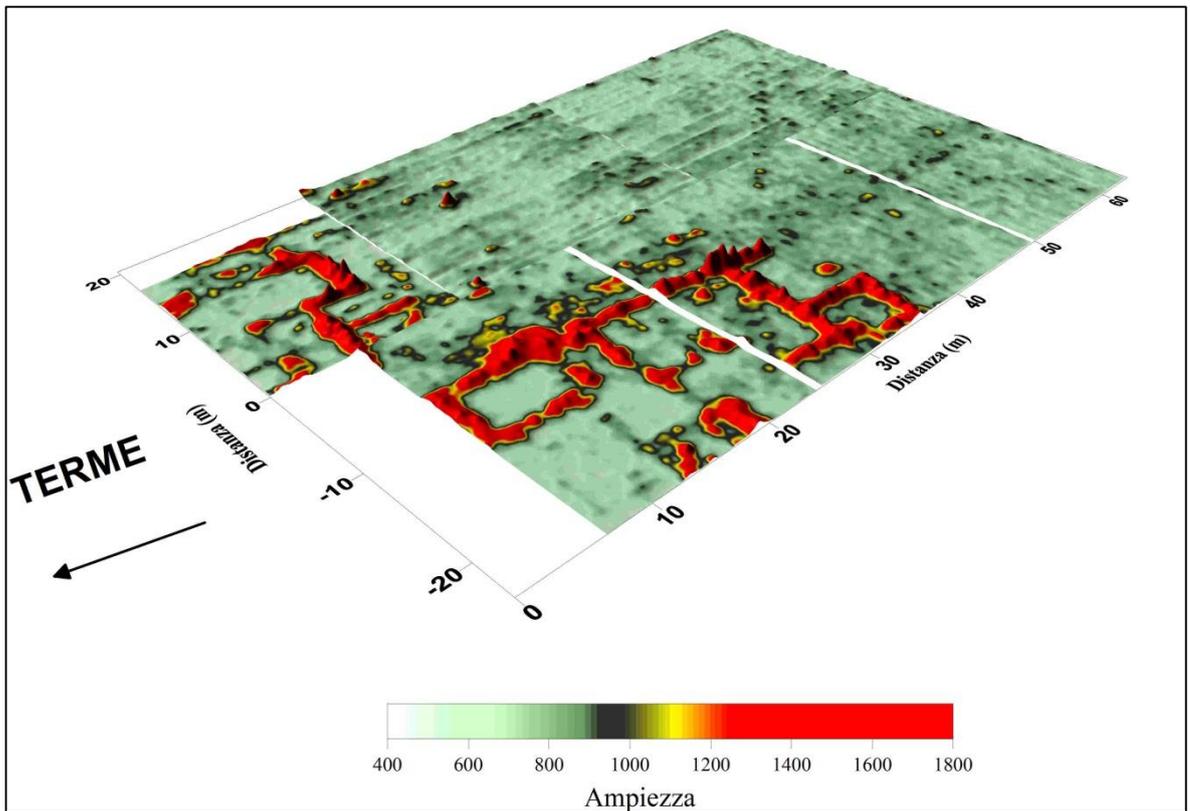


Figura 4.34. Mappa di superfici 3D relativa alla finestra temporale di 38-42 ns.

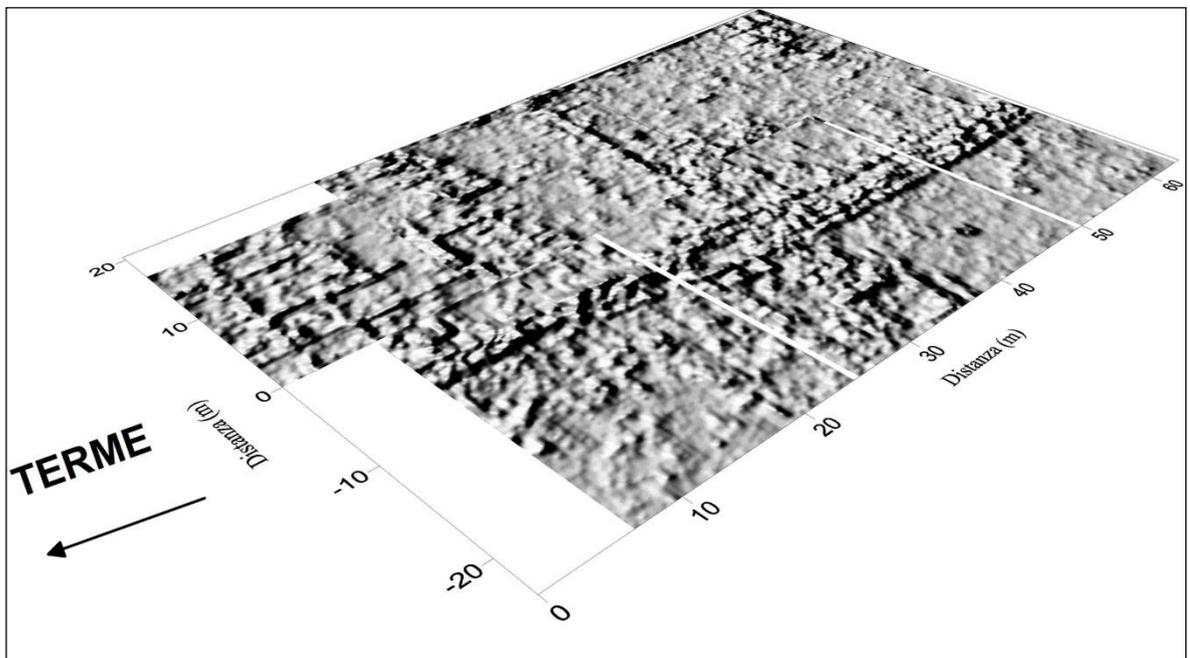


Figura 4.35. Mappa di rilievi 3D relativa alla finestra temporale di 17-21 ns.

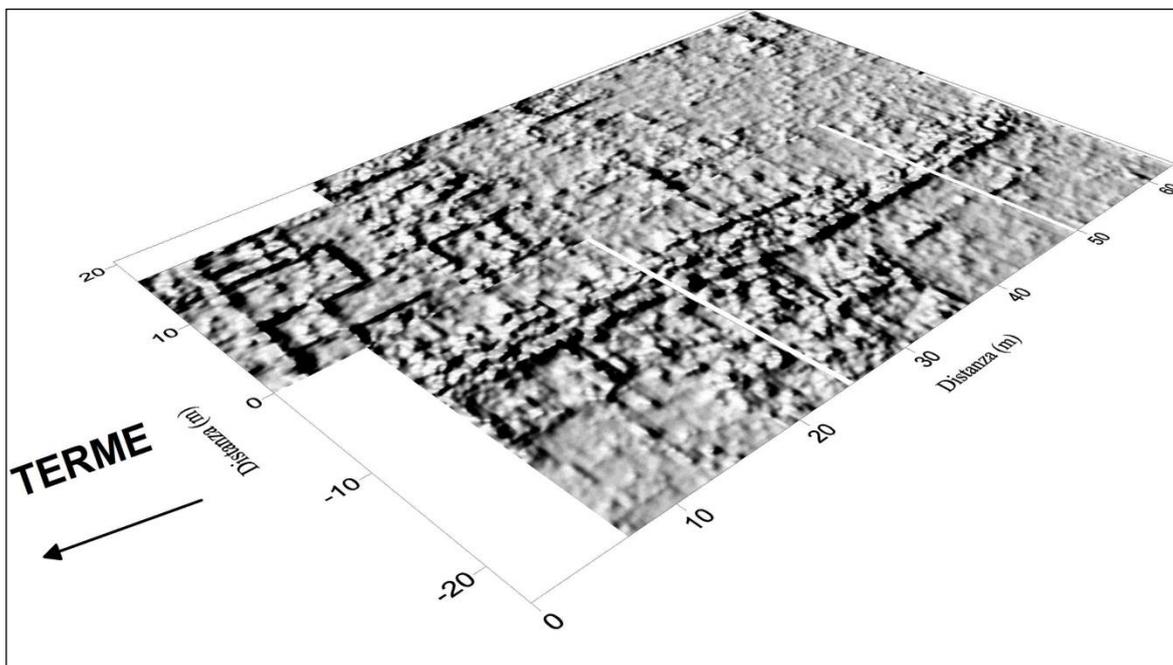


Figura 4.36. Mappa di rilievi 3D relativa alla finestra temporale di 26-30 ns.

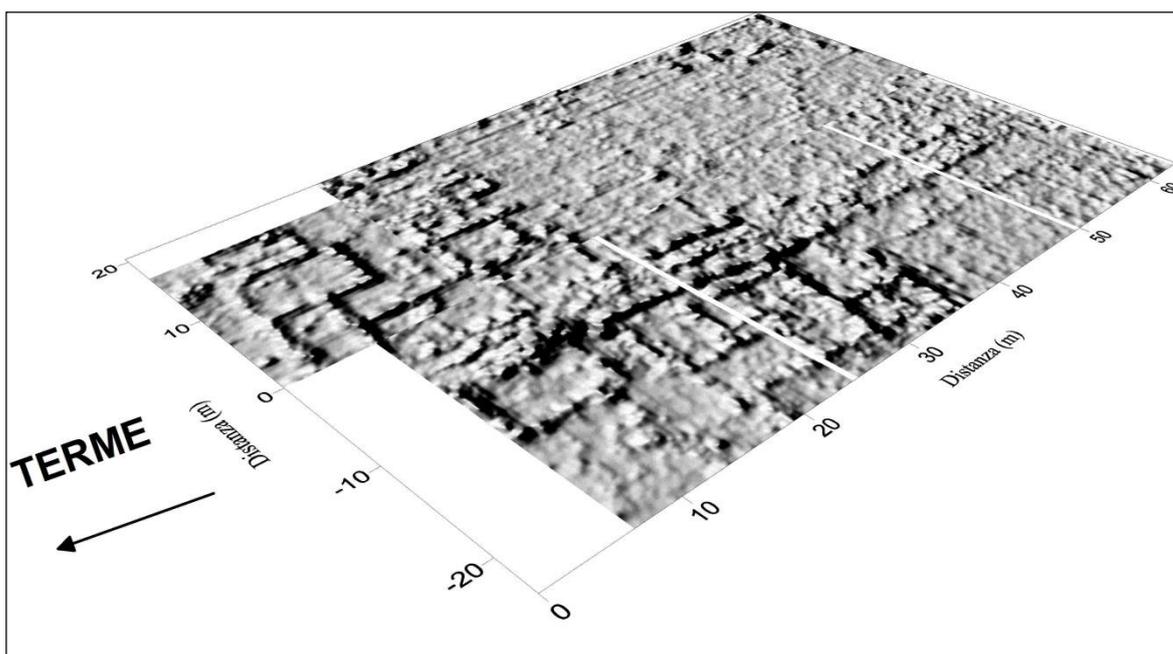
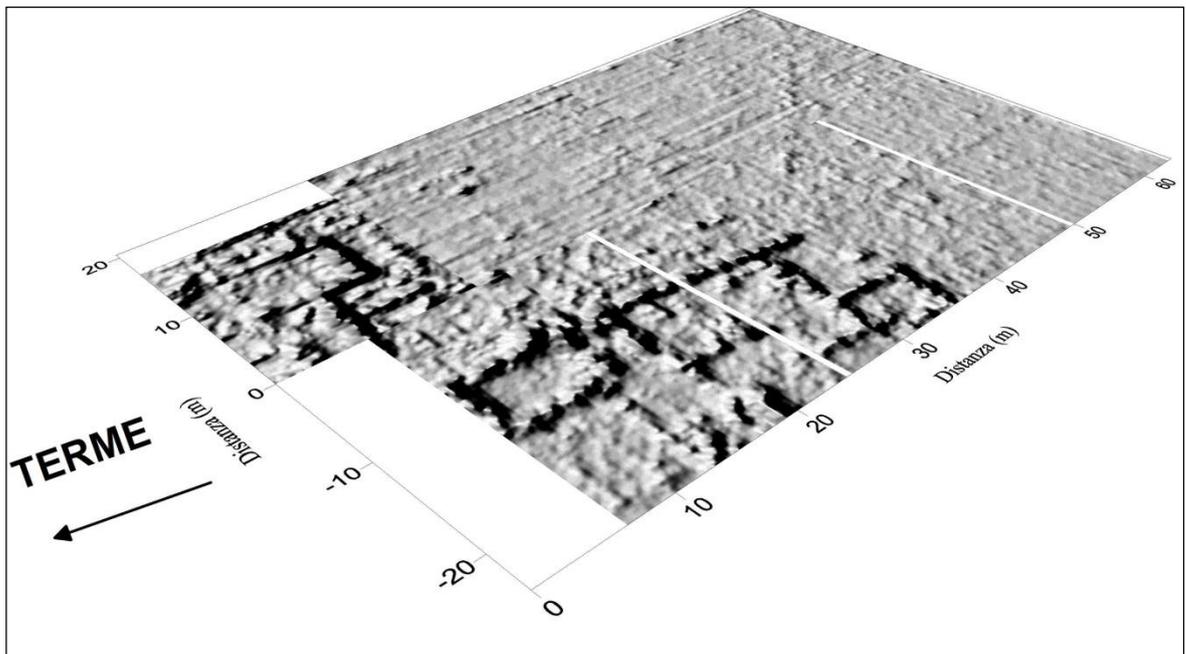


Figura 4.37. Mappa di rilievi 3D relativa alla finestra temporale di 32-36 ns.



*Figura 4.38. Mappa di rilievi 3D relativa alla finestra temporale di 38-42 ns.*

In figura 4.40 è visibile la mappa conclusiva delle tracce e delle anomalie individuate integrando i risultati ottenuti dall'analisi e dall'interpretazione delle immagini da remoto con quelli delle indagini geofisiche. I diversi tratteggi e tonalità di colore identificano la tipologia della traccia e la metodologia utilizzata per il loro riconoscimento.

Successivamente la mappa appena descritta è stata integrata con i risultati ottenuti dalla mia collega Claudia Giordano che ha svolto indagini geoelettriche nel settore localizzato tra le terme del foro ed il criptoportico e in altre aree al di fuori del circuito murario. Il risultato finale è stato la redazione di un'ulteriore tavola visibile in figura 4.41 che, grazie all'integrazione di più metodologie, ha permesso da un lato di comprendere l'articolata viabilità del sito, dall'altro di produrre una pianta molto dettagliata delle strutture archeologiche localizzate nel settore tra le terme ed il criptoportico. Grazie a questi risultati (precisi e puntuali) gli archeologi potranno compiere scavi mirati con un notevole risparmio di risorse economiche ed umane. Visto che il sito è molto vasto e lo scavo archeologico richiede tempi molto lunghi i ricercatori potranno capire lo sviluppo dell'insediamento grazie alla lettura del "visibile" e del "sommerso".

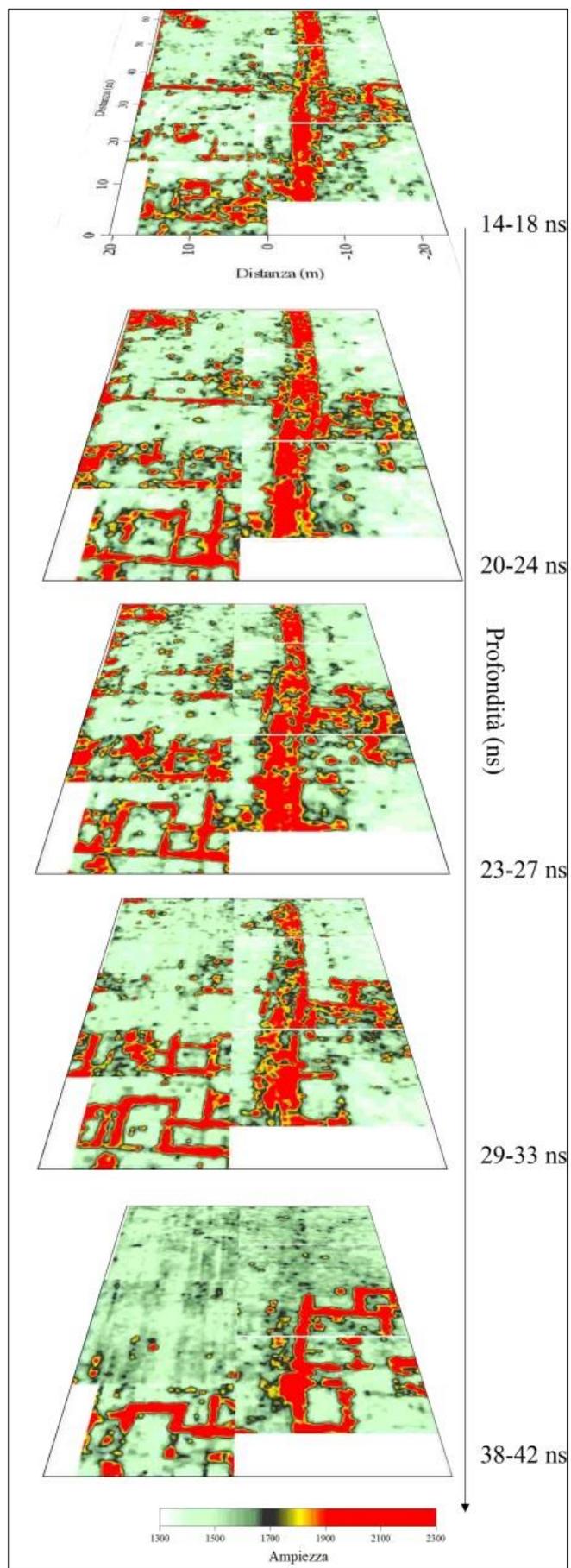


Figura 4.39. Vista tridimensionale delle slice relative a finestre temporali differenti.

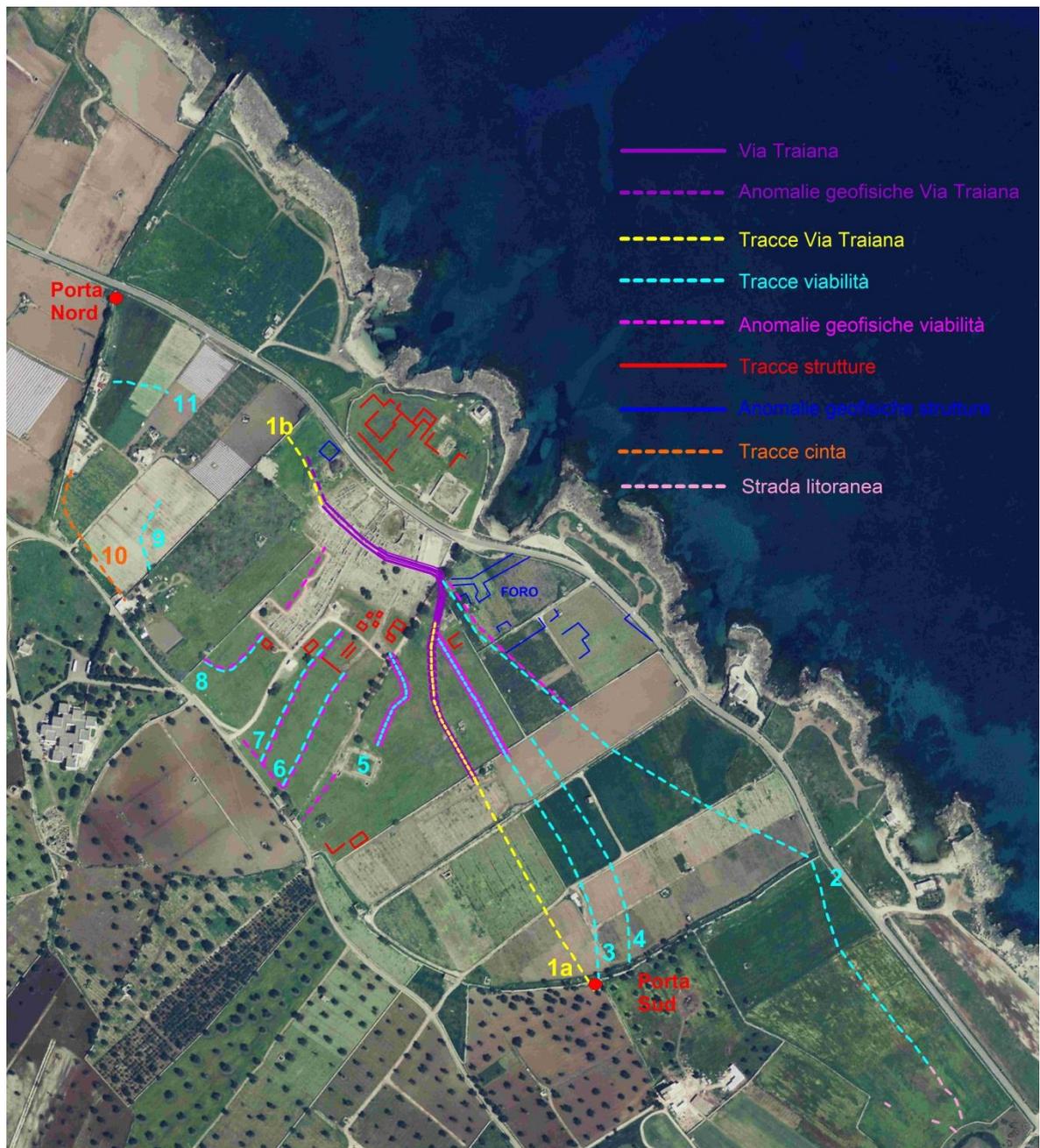


Figura 4.40. Mappa conclusiva con indicazione di tracce aeree/satellitari e anomalie geofisiche.

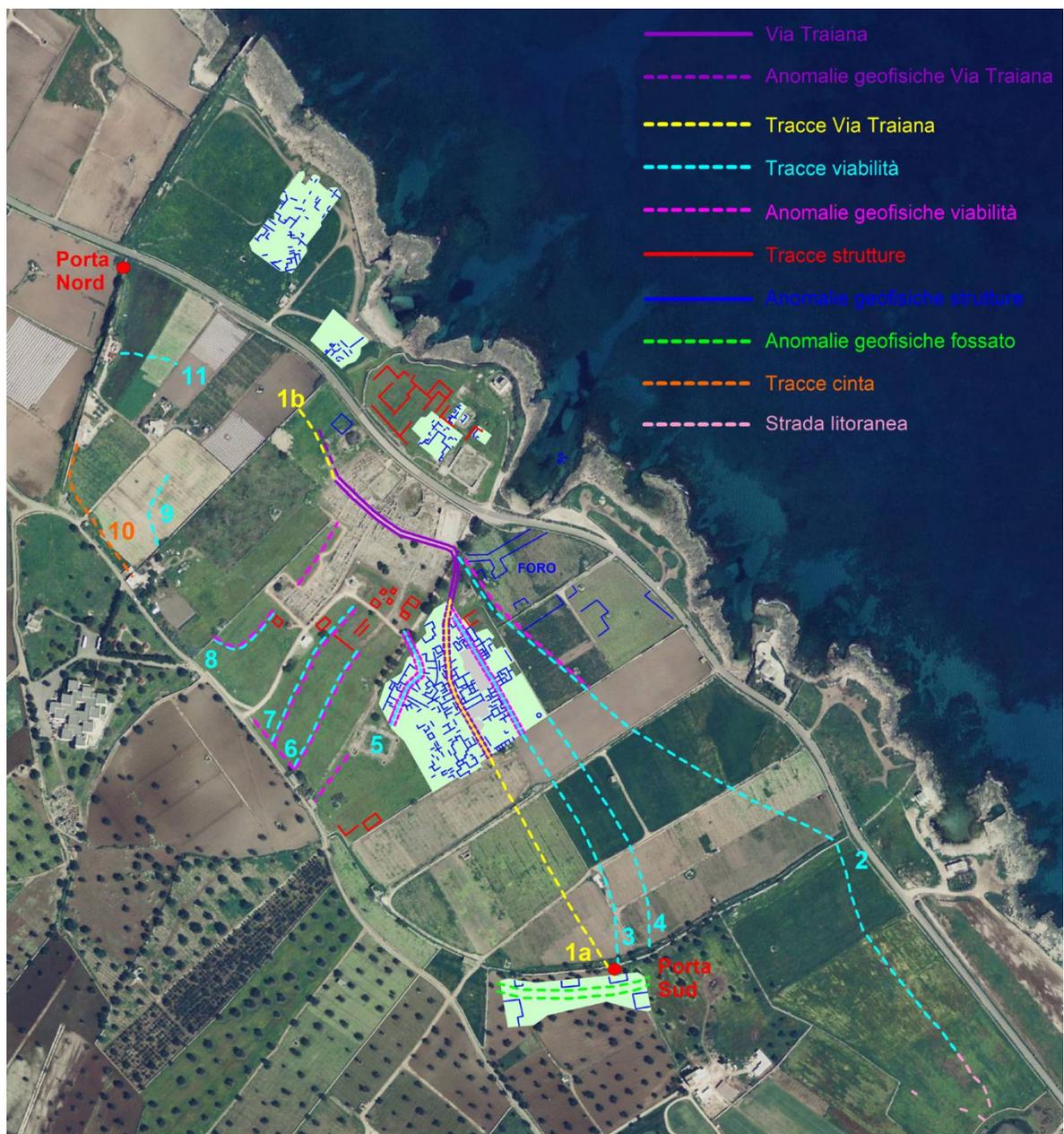


Figura 4.41. Mappa conclusiva relativa alla sovrapposizione dei risultati ottenuti integrando dati da remoto ed indagini geofisiche (elettromagnetiche e geoelettriche).

#### 4.5 Il rilievo laser scanner.

Il rilievo tridimensionale è stato effettuato utilizzando un laser scanner Focus 3D CAM MS120 della Faro (descritto nel capitolo 3.1.1). Per mezzo di questo strumento è stato rilevato il criptoportico, localizzato nel settore Sud-Est del sito (figura 4.42).



Figura 4.42. Localizzazione del criptoportico su immagine satellitare Google Earth del 2013.

Il monumento rappresenta una galleria ipogea che potrebbe avere problemi statici dovuti alla presenza di diverse crepe localizzate soprattutto lungo la volta dei quattro bracci.

Lo scopo principale del rilievo è stato quello di documentare (utilizzando una strumentazione avente precisione millimetrica) l'interno e l'esterno della struttura per estrarre informazioni utili ai fini della valutazione di stabilità dell'edificio tramite la produzione di piante, sezioni e sezioni prospettive.

Il lavoro è stato articolato in quattro fasi (progettazione delle scansioni, acquisizione, elaborazione del modello tridimensionale ed estrazione dei dati).

La fase di progettazione delle scansioni in questo lavoro è risultata molto importante in quanto si aveva la necessità di allineare l'ambiente ipogeo con la parte superiore. Per fare questo sono stati utilizzati *target* sferici posizionati in un'apertura che li rendesse visibili sia dall'interno del criptoportico sia dalla parte superiore (figura 4.43).

L'acquisizione è stata effettuata rilevando prima la galleria sotterranea e successivamente la parte superiore.



*Figura 4.43. Target sferici utilizzati per agganciare la parte superiore con l'ipogeo.*

Visto che l'interno della galleria era caratterizzata da poca luce lo strumento è stato settato in ambiente interno con una risoluzione di  $\frac{1}{4}$  (è stato battuto un punto ogni 6 mm ottenendo una fitta nuvola di punti e dunque un'alta risoluzione) creando 22 stazioni laser e utilizzando le sfere come punti di unione tra le varie scansioni (figura 4.44).

In figura 4.45 viene riportata la mappa relativa ai vari spostamenti del laser scanner all'interno della galleria.

Conclusa la fase di acquisizione del piano sotterraneo è stata rilevata la parte superiore del criptoportico allo scopo di documentare lo spessore di terreno che divide i due piani.

La seconda fase del lavoro ha visto l'elaborazione del modello secondo gli *step* descritti nel paragrafo 3.1.1.

Per costruire la geometria delle zone rilevate sono state registrate separatamente prima tutte le scansioni dell'ambiente ipogeo (figura 4.46) ed in seguito quelle della zona superiore (figura 4.47). Il risultato visibile in figura 4.48 è un modello tridimensionale costituito da 84.407.445 punti.



*Figura 4.44. Veduta interna del criptoportico con il posizionamento dei target e del laser scanner.*

L'ultimo *step* del lavoro è rappresentato dall'estrazione dei dati. In questa fase è importante avere ben chiaro quale è l'obiettivo del rilievo e quali dati andare ad estrarre dal modello.

Visto che in questa ricerca il laser scanner è stato utilizzato principalmente per documentare lo stato di salute del monumento si è ritenuto opportuno estrarre dal modello tridimensionale piante, sezioni, ortofoto e sezioni prospettive.

In figura 4.49 viene riportata l'ortofoto metrica della zona sovrastante il criptoportico estrapolata dal modello.

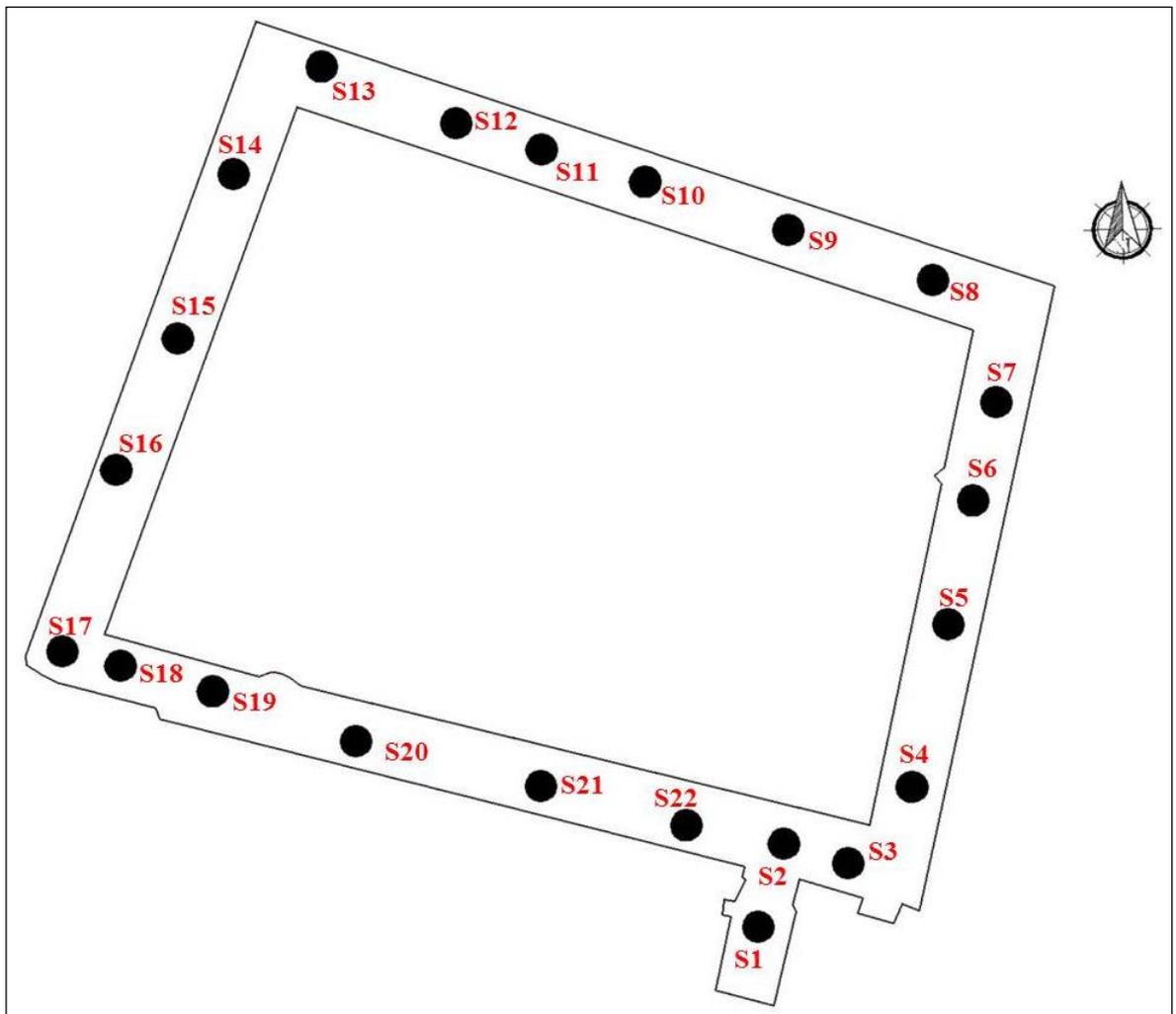


Figura 4.45. Stazioni laser scanner dell'ambiente ipogeo.

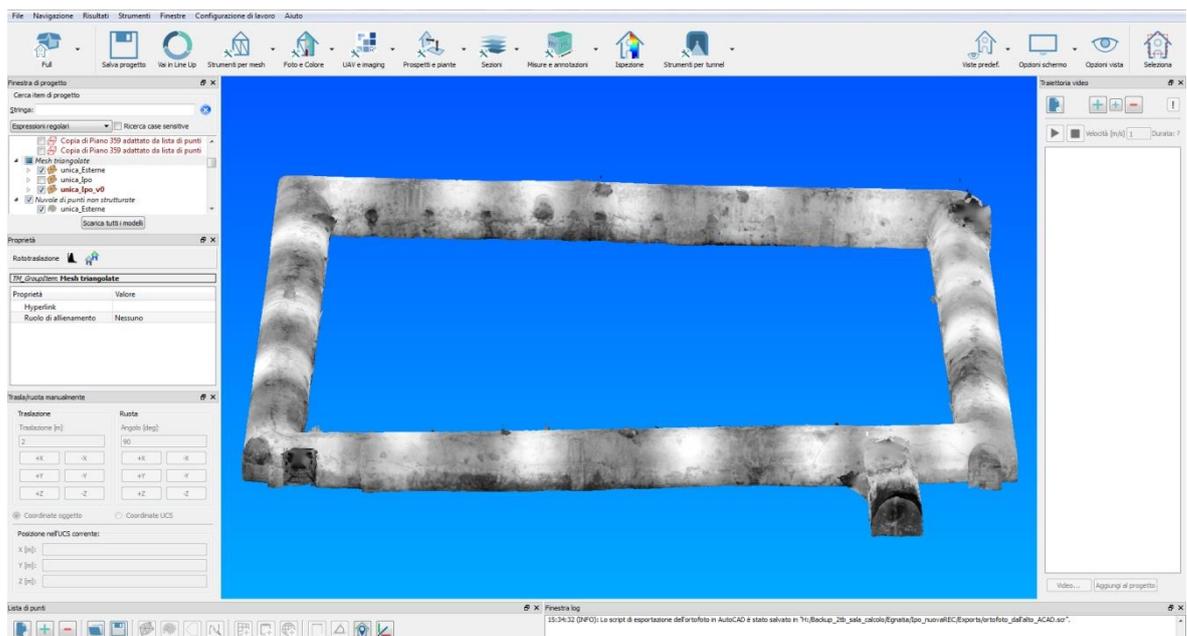


Figura 4.46. Modello tridimensionale dell'ambiente ipogeo.

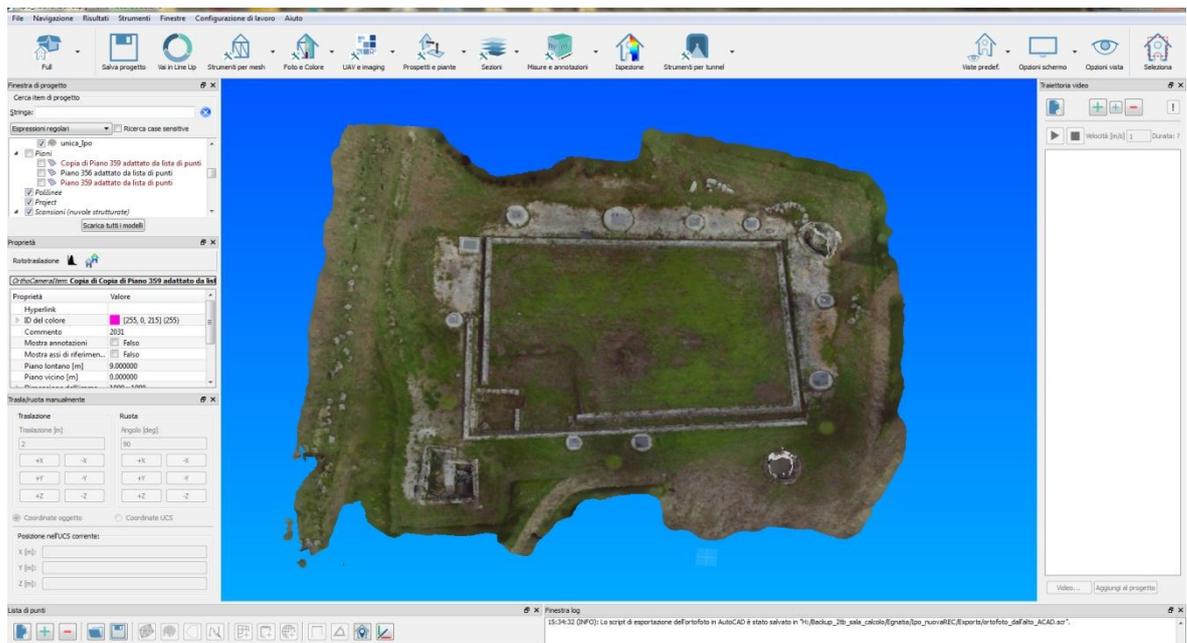


Figura 4.47. Modello tridimensionale della zona superiore del criptoportico.

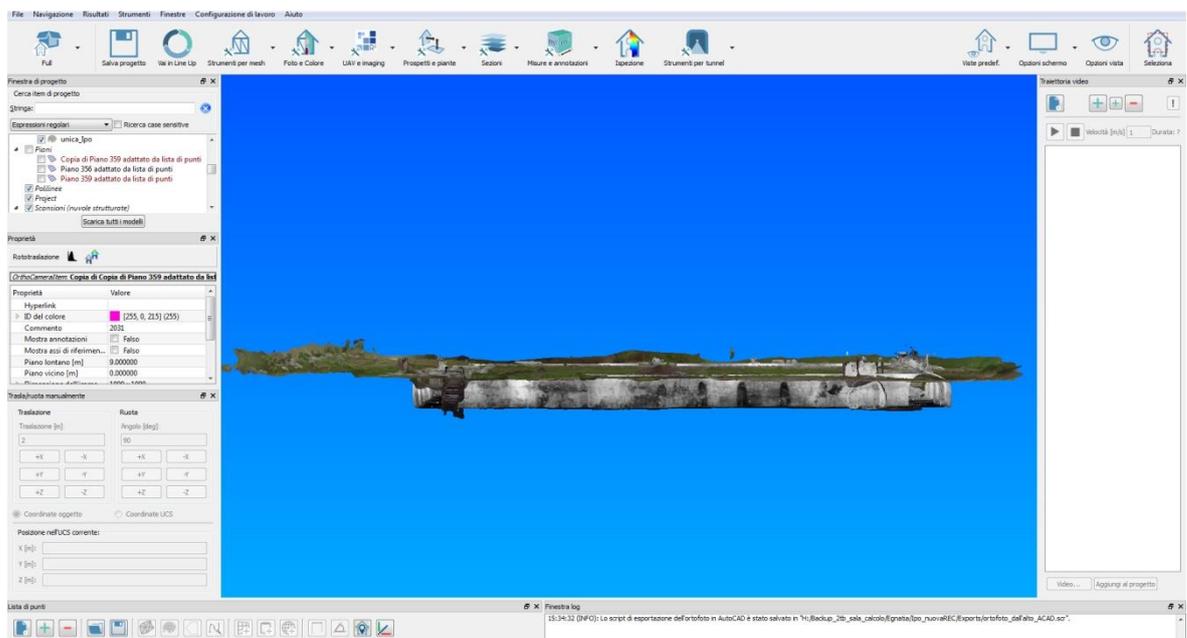


Figura 4.48. Creazione di un unico modello relativo alla registrazione dell'ambiente ipogeo con la zona superiore.

Successivamente sezionando orizzontalmente il modello alla quota di 1 m dal piano di calpestio è stato possibile estrapolarvi la pianta. La sezione è stata esportata e lavorata con un software CAD e il risultato finale è stato la creazione di due differenti mappe. Nella prima (figura 4.50) con il marrone più scuro viene indicato il terreno all'interno del quale è inserita la struttura e con quello più chiaro la pavimentazione in terra battuta del monumento (in un punto segnalato nell'immagine è visibile una pavimentazione circolare

in pietrisco). Le linee tratteggiate, invece, indicano lo spessore supposto delle murature ipotizzato di 0.60 m dopo aver misurato lo spessore di un muro del criptoportico visibile in una sezione.

Nella seconda pianta visibile in figura 4.51 vengono riportate le dimensioni dell'ambiente ipogeo. Analizzando la planimetria e prendendo in considerazione oltre che lunghezze anche gli angoli dei quattro bracci ( $84^\circ$  Sud-Ovest,  $88^\circ$  Sud-Est,  $92^\circ$  Nord-Ovest e  $97^\circ$  Nord-Est), emerge che la galleria non rappresenta un parallelogramma isoscele ma presenta una forma irregolare caratterizzata da lati non paralleli e di lunghezze differenti.

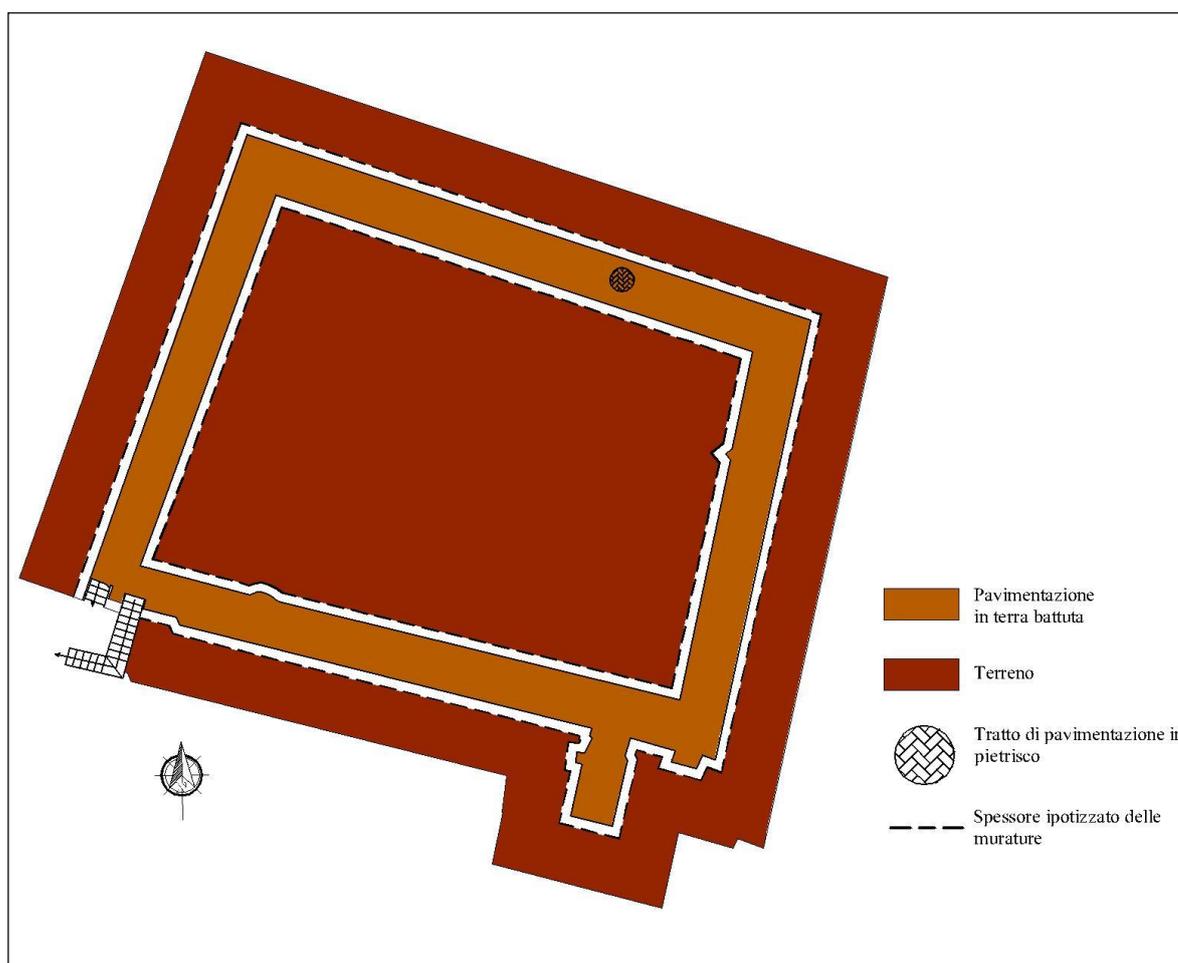


*Figura 4.49. Ortofoto della zona superiore del criptoportico rilevata tramite laser scanner.*

Per creare una documentazione completa oltre le due piante sopra citate sono state create sezioni e sezioni prospetto. Le prime divise per tipologia in base all'orientamento e alla posizione sulla pianta sono identificate da lettere e numeri. Con la lettera A (figura 4.52) vengono indicate quelle trasversali, con la B (figura 4.53) quelle longitudinali e con la lettera C (figura 4.54) quelle longitudinali ottenute sezionando la galleria del braccio Est ad

una distanza costante di 1.30 m. Per ogni sezione vengono riportate le dimensioni delle gallerie e lo spessore massimo di terreno che separa i due livelli. Con il colore marrone viene indicato il terreno in cui risulta inserito il monumento, con il verde invece è segnalato l'andamento del terreno sovrastante l'ipogeo e con la linea tratteggiata viene indicato l'ipotetico spessore delle murature.

Le sezioni prospettive, invece, sono state estrapolate dal modello per avere una documentazione a colori reali della struttura con lo scopo di segnalarne lo stato di conservazione (nelle immagini i colori più scuri indicano zone caratterizzata da elevata umidità dovuta all'infiltrazione d'acqua) (figura 4.55).



*Figura 4.50. Pianta del criptoportico.*

Dalle sezioni trasversali (A) è emerso che lo spessore massimo di terreno che separa i due livelli varia da 0.40 m (sezione A1) a 0.49 m (sezione A3). Nella sezione A3 inoltre è visibile una deformazione della pavimentazione (con andamento convesso) localizzata all'altezza della scala di ingresso. Nelle sezioni longitudinali (B) lo spessore massimo di terreno è maggiore nella zona Est variando tra 0.97 e 1.21 m. Nella sezione B1, all'altezza

dell'ingresso, si nota un avvallamento concavo della pavimentazione individuato precedentemente dalla sezione A3. Dall'analisi delle sezioni longitudinali del braccio Est (C) emergono due dati principali. Il primo riguarda l'altezza della galleria. Essa, costante nelle sezioni iniziali (circa 2.50 m da C1 a C6), aumenta verso Nord raggiungendo l'altezza massima di 2.67 nella sezione C8 e mantenendo pressoché costante questa altezza fino alla sezione C12. Il secondo riguarda la forma della galleria. Essa presenta pareti che non sono perfettamente a piombo ma risultano abbastanza deformate (visibile principalmente nelle sezioni C1-C3-C6-C8-C9-C11).

Nelle sezioni prospetto (D) si evidenziano diverse zone caratterizzate da alta umidità localizzate soprattutto nella parte inferiore della galleria.

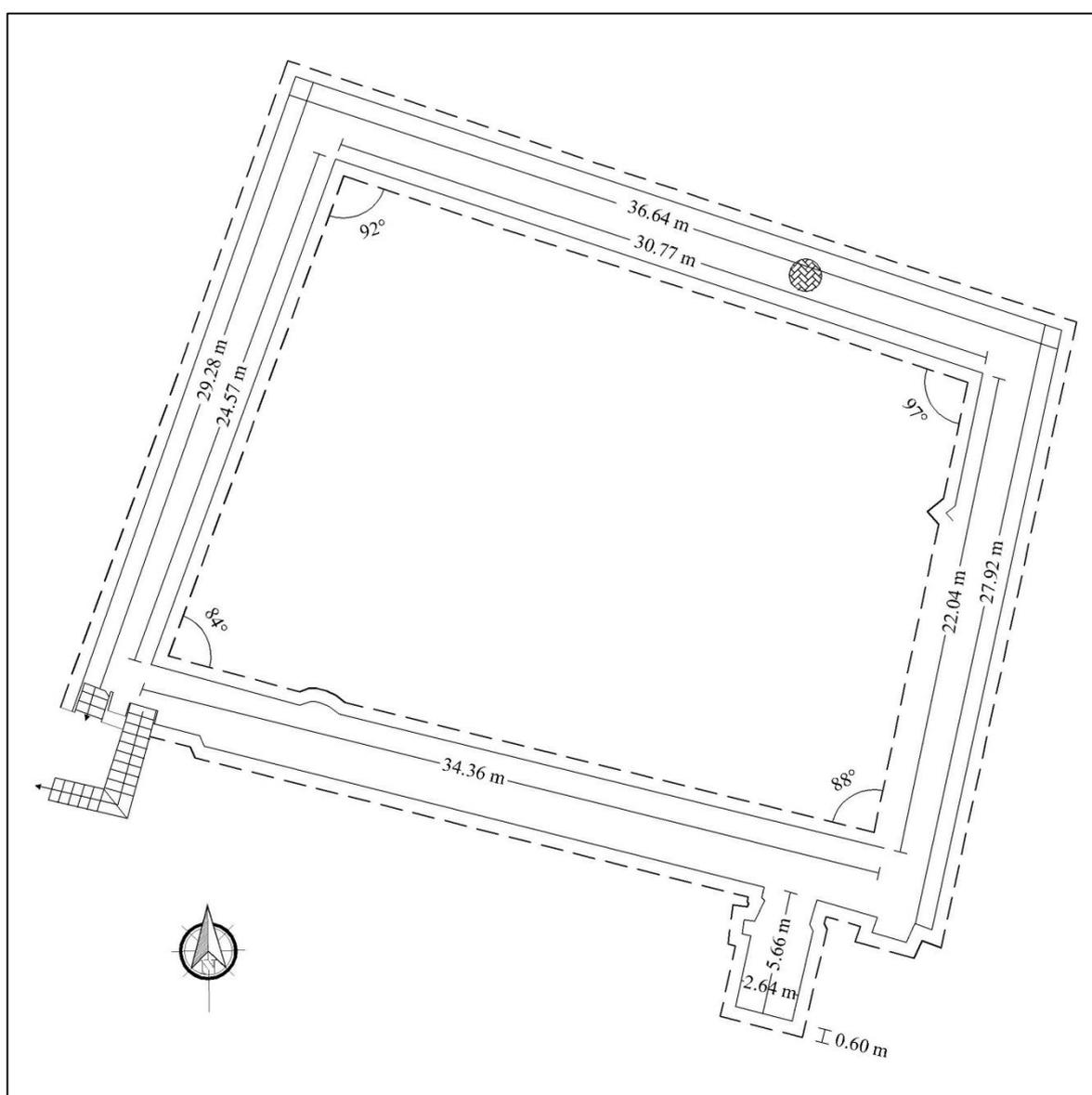
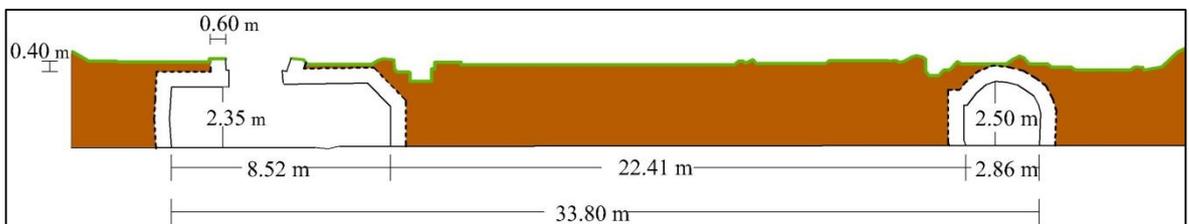
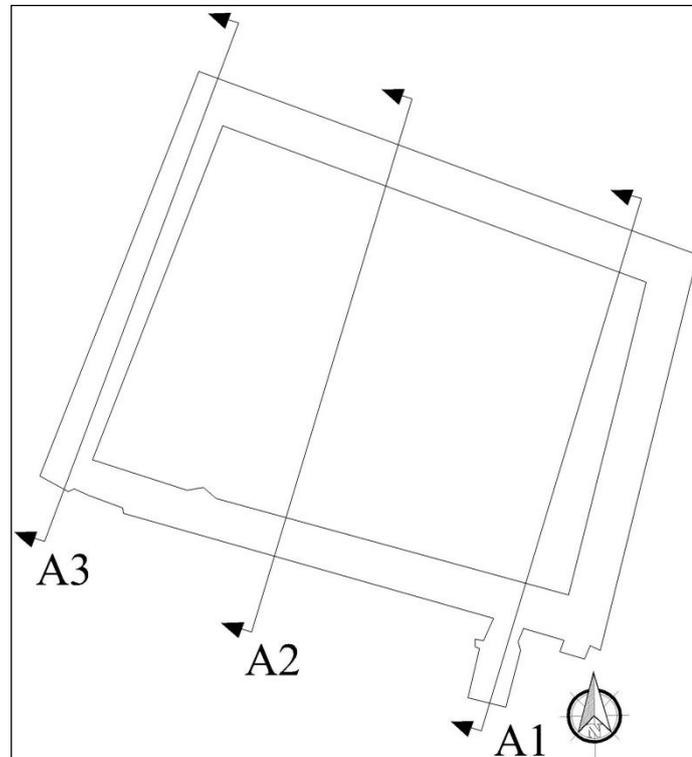
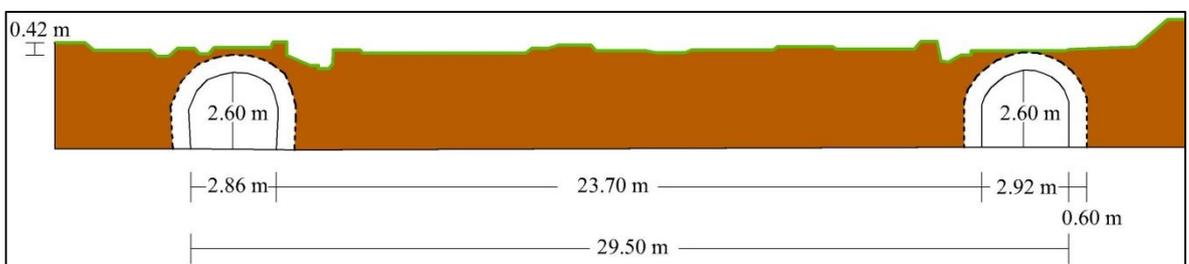


Figura 4.51. Pianta del criptoportico con le relative dimensioni.

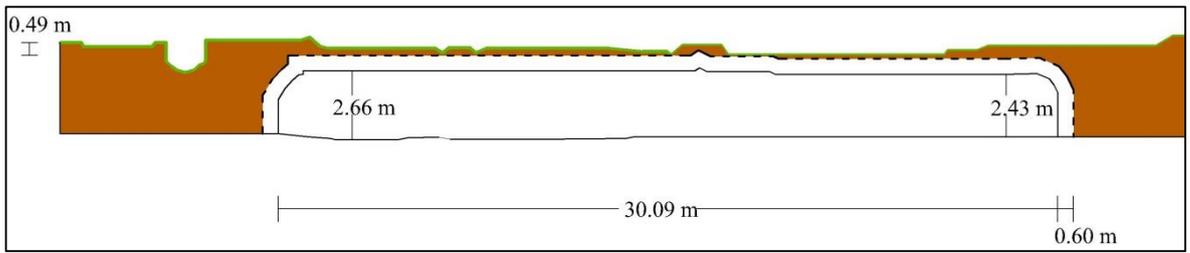
In seguito per fornire un'accurata documentazione in grado di descrivere lo stato di salute del monumento è stata elaborata un'ulteriore pianta relativa alla localizzazione delle crepe più rilevanti presenti sulla volta dell'ambiente ipogeo visibile in figura 4.56.



*Sezione A1*

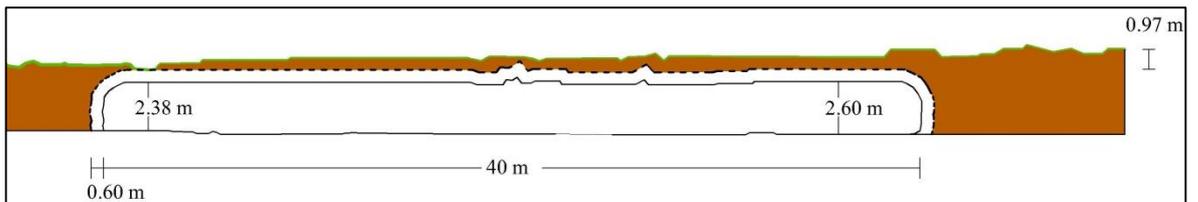
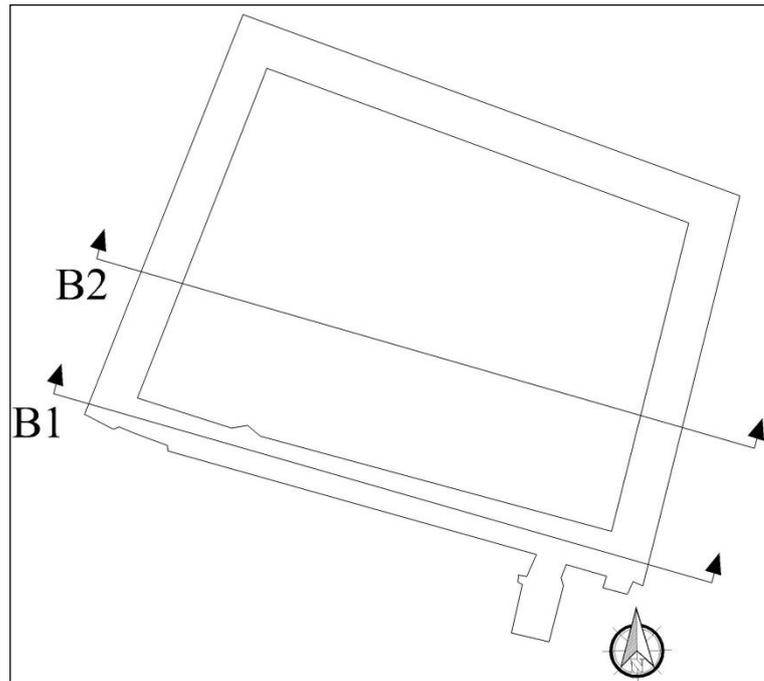


*Sezione A2*

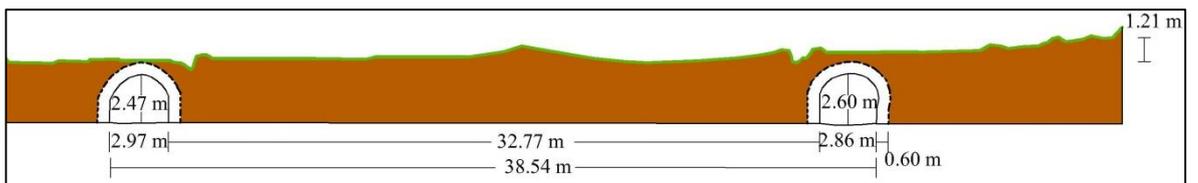


Sezione A3

Figura 4.52. Sezioni trasversali del criptoportico.



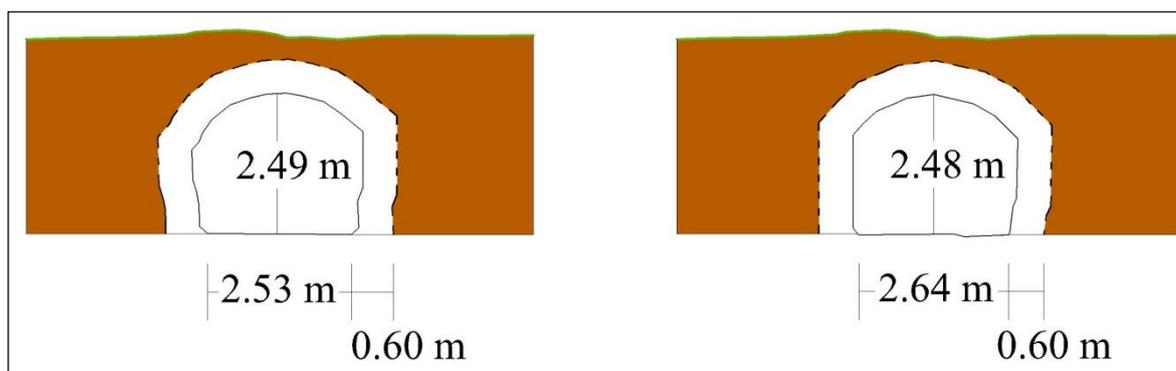
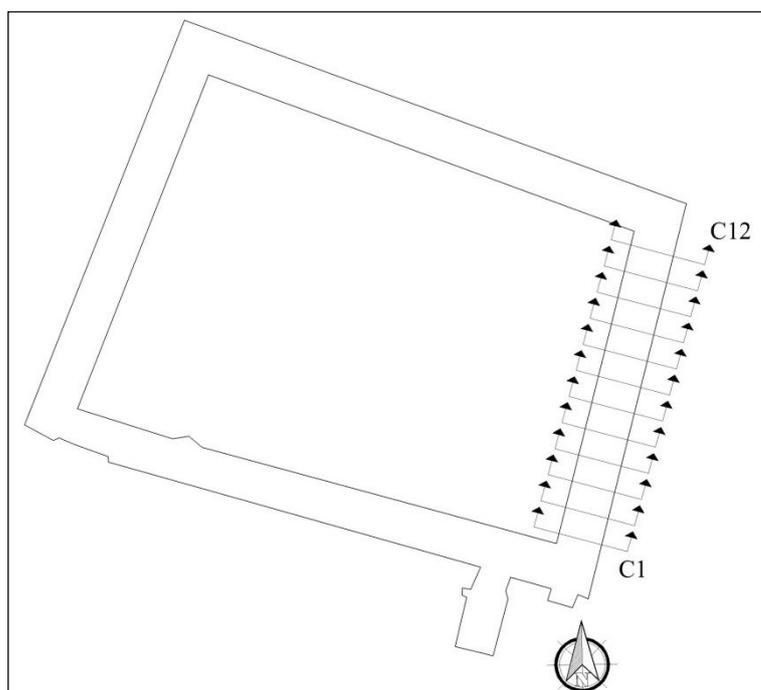
Sezione B1



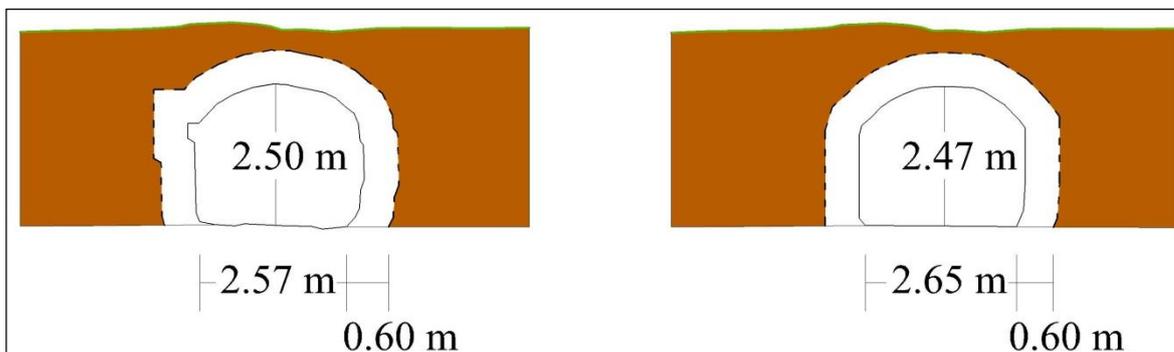
Sezione B2

Figura 4.53. Sezioni longitudinali del criptoportico.

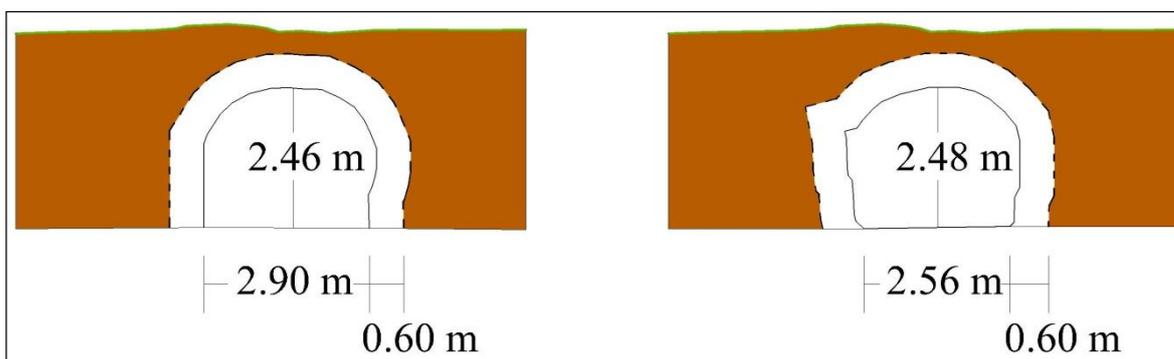
Essa mostra che il settore dove sono presenti più lesioni, anche di dimensioni consistenti, risulta essere il braccio Ovest, ossia quello di fronte le scale di accesso all'ambiente. La lesione più rilevante è localizzata al centro del citato braccio, visibile nel dettaglio in figura 4.57, che presenta una lunghezza di circa 6.30 m. Inoltre la mappa indica in modo chiaro che i bracci Nord e Sud (nella loro parte iniziale) sono interessati da lesioni che terminano circa alla stessa altezza (circa 9.5 m dall'inizio dei bracci). Nell'angolo Sud-Est sono presenti, anche se di minor dimensione rispetto alle altre, ulteriori lesioni. Le considerazioni fatte finora hanno permesso di elaborare un'ulteriore tavola, visibile in figura 4.58, dove con una colorazione rossa, vengono segnalate le zone dove si concentrano maggiormente le crepe.



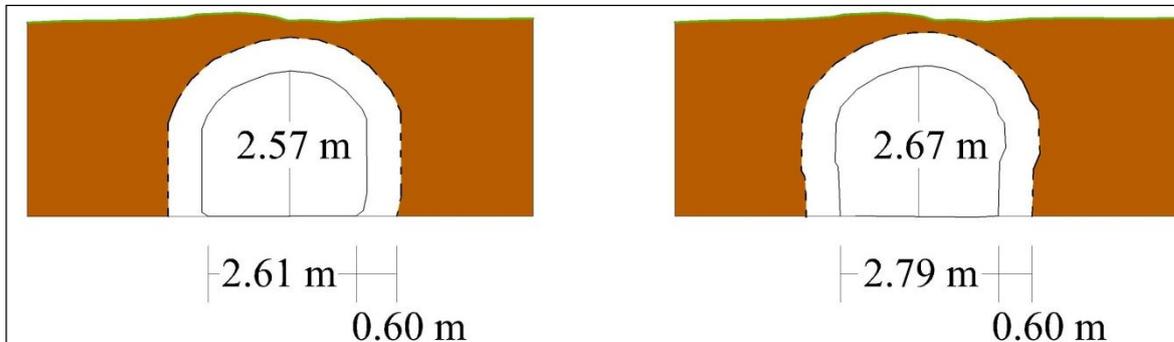
*Sezioni C1 (sinistra) C2 (destra).*



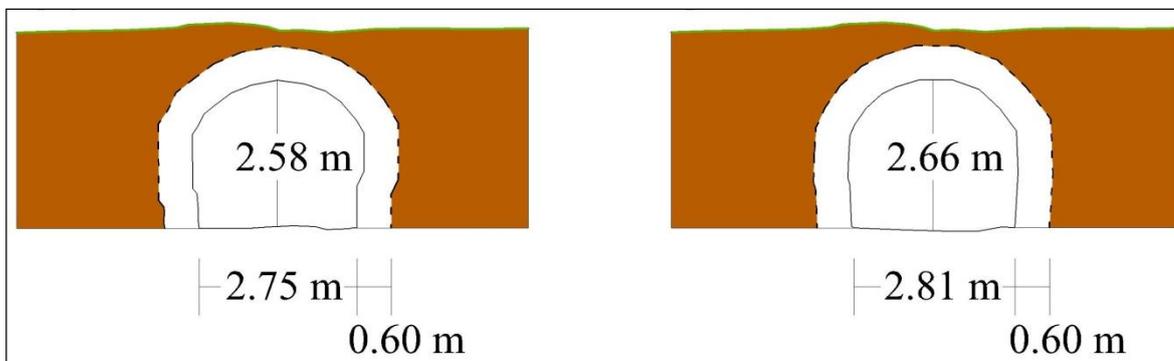
*Sezioni C3 (sinistra) C4 (destra).*



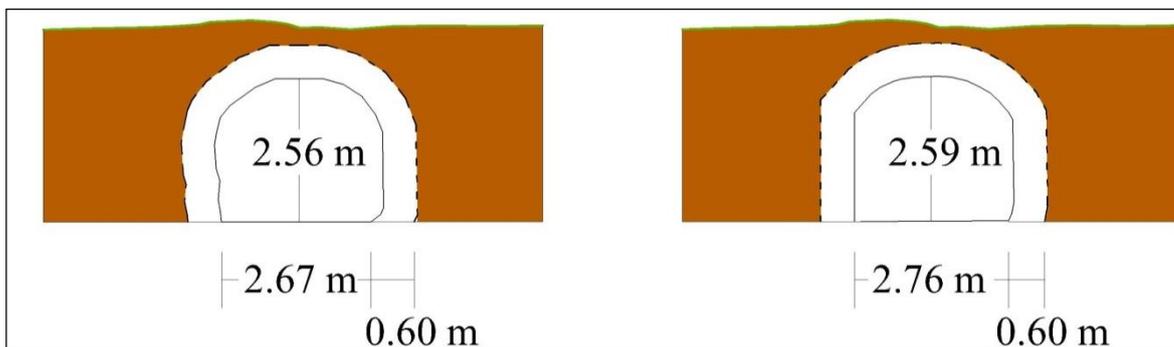
*Sezioni C5 (sinistra) C6 (destra).*



*Sezioni C7 (sinistra) C8 (destra).*

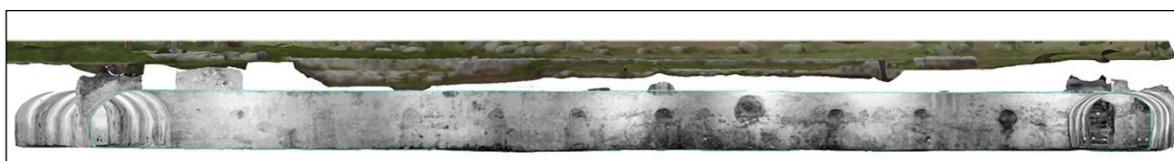
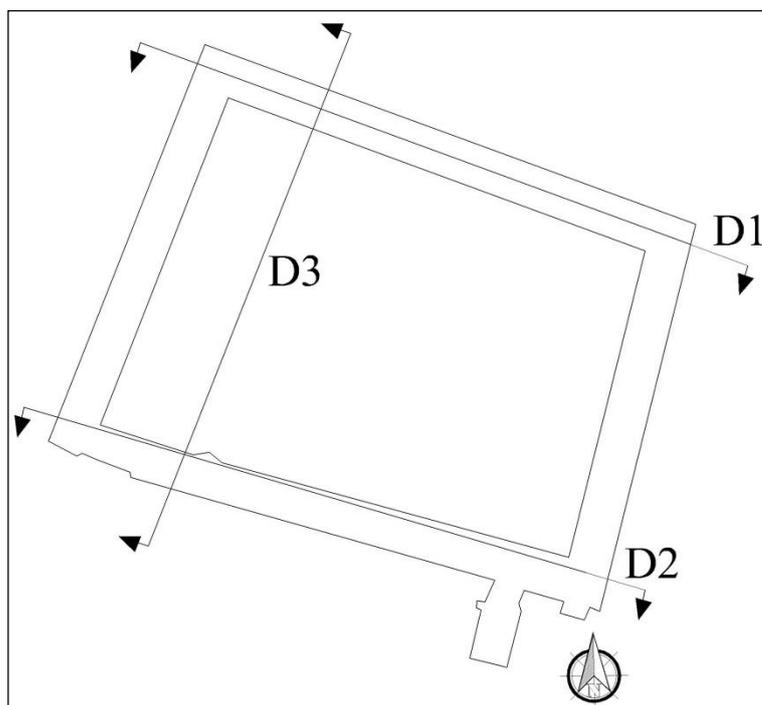


*Sezioni C9 (sinistra) C10 (destra).*

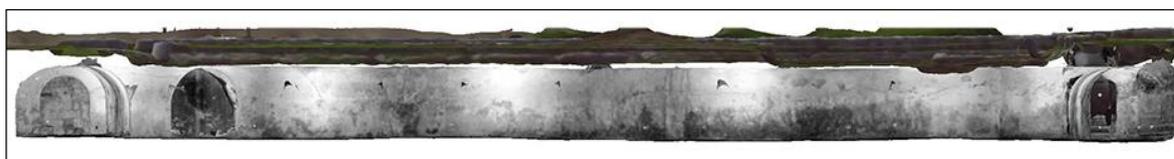


*Sezioni C11 (sinistra) C12 (destra).*

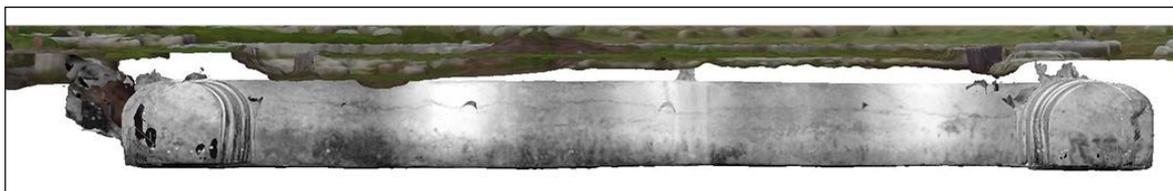
*Figura 4.54. Sezioni galleria braccio Est.*



*Sezione prospetto D1.*

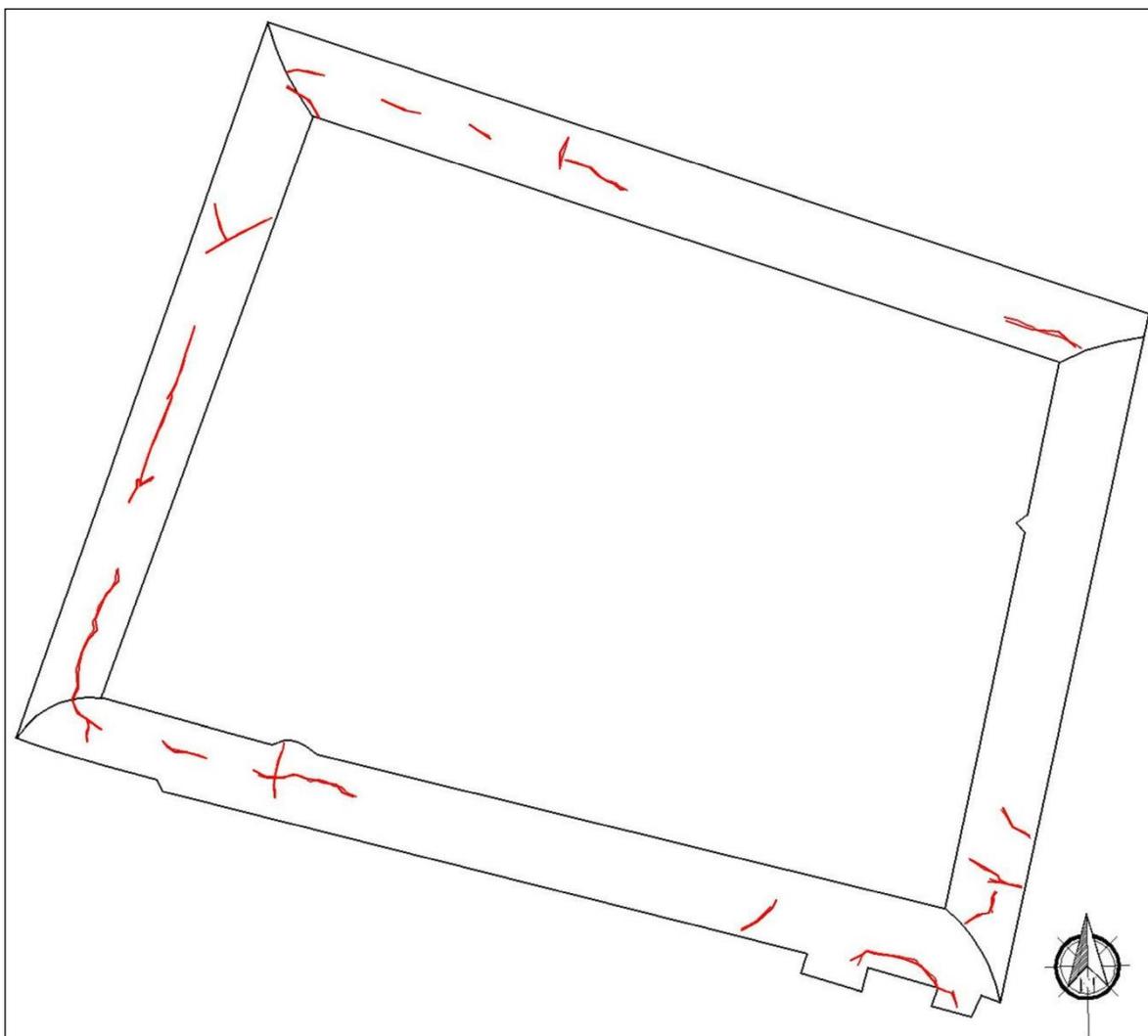


*Sezione prospetto D2.*



*Sezione prospetto D3.*

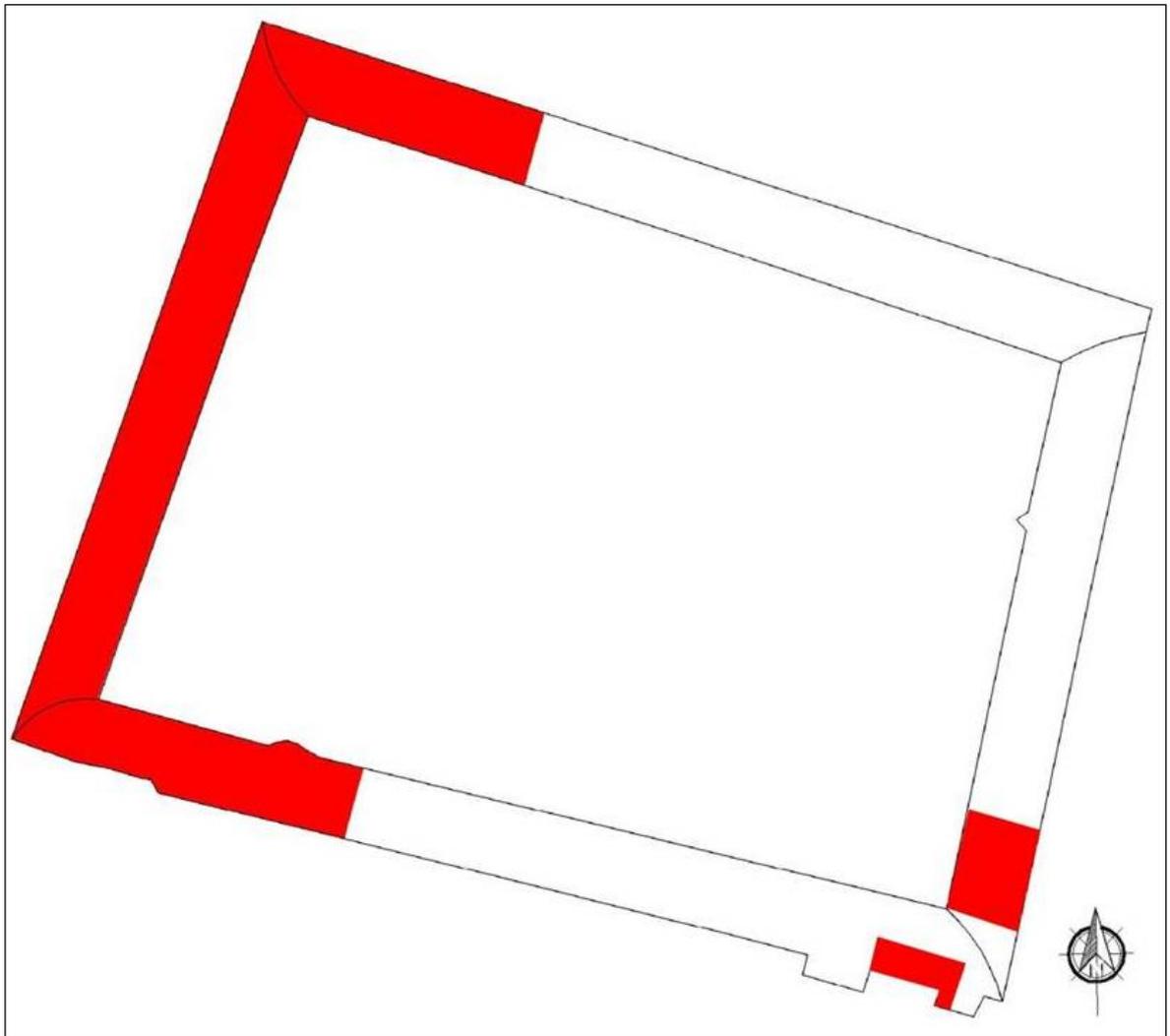
*Figura 4.55. Sezioni prospetto del criptoportico.*



*Figura 4.56. Mappa con la localizzazione delle crepe sulla volta dell'ambiente ipogeo.*



*Figura 4.57. Dettaglio della lesione individuata nel braccio Ovest.*



*Figura 4.58. Zona in cui si concentrano maggiormente le lesioni.*

## ***CAPITOLO 5 – APPLICAZIONE DELLE METODOLOGIE DI STUDIO AD ALTRI CONTESTI ARCHEOLOGICI.***

Di seguito vengono presentati diversi casi studio rappresentanti siti archeologici localizzati in territorio internazionale. Le ricerche sono state effettuate grazie alla collaborazione con diversi istituti di ricerca nazionali e internazionali. Per ciascun sito, in base ai risultati prefissati, sono stati effettuati rilievi tridimensionali (laser scanner e fotogrammetrici) e indagini geofisiche (ad induzione elettromagnetica e GPR).

I siti oggetto di studio sono stati:

- La città romana di Doclea (Montenegro).
- La Fortezza di Ighram Aousser (Marocco);
- Sito archeologico di Tell El Maskhuta (Egitto);
- Sito di Umm ar-Rasas (Giordania);
- Sito di Gur (Iran).

### ***5.1 La città romana di Doclea (Montenegro).***

La città romana di Doclea (Duklja) è localizzata in Montenegro a pochi chilometri dalla capitale Podgorica (figura 5.1). L'area archeologica si trova su un altopiano delimitato ad Ovest e a Sud-Est dalla confluenza dei fiumi Moraca e Zeta. La città venne conquistata da Ottaviano nel 35 a.C. e successivamente i suoi abitanti fecero parte del *conventus* di Naron. Sotto il dominio di Vespasiano essa venne fondata come fortezza e divenne successivamente municipio. L'intera città era cinta da mura che si sono conservate in buona parte e in alcuni punti nella loro originale altezza di 6 m circa (figura 5.2, sinistra). Danneggiata prima dai terremoti e successivamente dai barbari Doclea fu definitivamente distrutta al principio del VII secolo da parte degli Avari e degli Slavi<sup>90</sup>.

Le prime campagne di scavo furono realizzate dal russo P. Rowinsky<sup>91</sup> nel 1890; successivamente, campagne sistematiche furono realizzate nel 1892 grazie a P. Sticotti<sup>92</sup> e nel 1969 con Wilkes.

Grazie a queste ricerche che negli anni hanno portato alla luce diverse strutture pubbliche e private di epoca romana e tardo romana (quali il foro (figura 5.2, destra), un impianto termale (figura 5.3, sinistra), templi, due basiliche (figura 5.3, destra), una serie di edifici

---

<sup>90</sup> MUNRO *et al.* 1896.

<sup>91</sup> ROWINSKY 1890.

<sup>92</sup> STICOTTI 1913.

abitativi e una necropoli al di fuori delle mura), oggi Doclea è una delle città romane dei Balcani meglio conosciute.



*Figura 5.1. Localizzazione del sito di Duklja su immagine di Google Earth*

In figura 5.4 tutte le evidenze note ad oggi sono state ubicate su un'immagine di Google Earth. In essa si evidenziano il tracciato del circuito murario (in rosso), i fossati individuati ad est della città (in azzurro), il cardo e il decumano che la attraversavano (in giallo). Emerge chiaramente che solo una piccola percentuale degli edifici appartenenti al nucleo urbano è stata portata alla luce dagli scavi archeologici e dunque molto è ancora sepolto nel sottosuolo, da scoprire, documentare e valorizzare. Nel 2016 è stata condotta una campagna di prospezione geofisica in collaborazione con l'Istituto per le Tecnologie Applicate ai Beni Culturali (ITABC, CNR) di Roma, il Ministero della Cultura e l'istituto di Storia del Montenegro con l'obiettivo di individuare i lineamenti di strutture ancora interrate e dunque aumentare lo stato delle conoscenze sul sito.



Figura 5.2. Tratto delle mura settentrionali (sinistra) e il foro della città (destra).

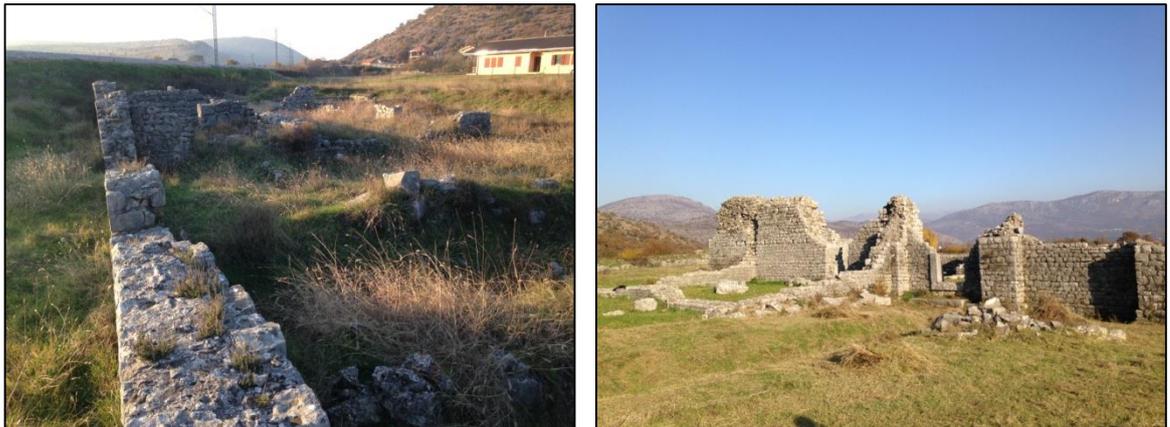


Figura 5.3 Porzione dell'impianto termale (sinistra) e la basilica (destra).

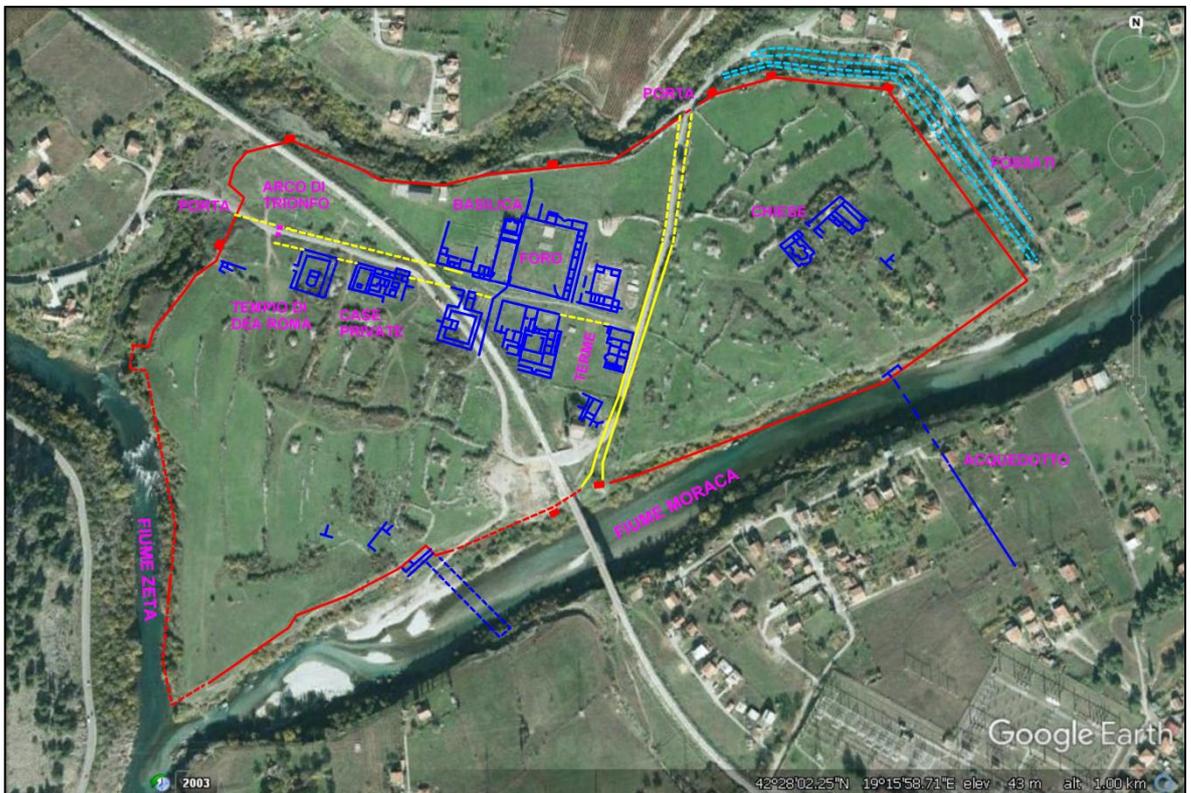
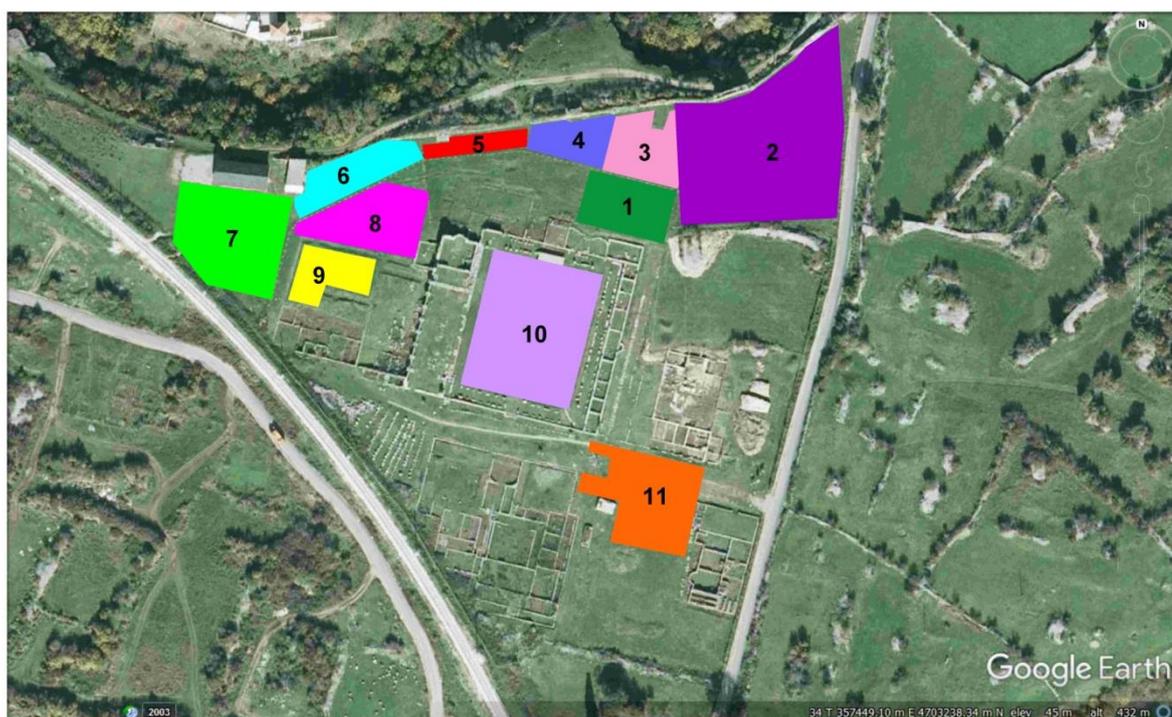


Figura 5.4. Ubicazione delle strutture note su immagine di Google Earth.

Le indagini, condotte con un georadar della IDS equipaggiato con un'antenna cross-combinata da 200 e 600 Mhz (figura 5.5), ha interessato 11 aree la cui ubicazione è riportata in figura 5.6.



*Figura 5.5. Acquisizione dati con georadar IDS*



*Figura 5.6. Ubicazione delle aree di indagine su immagine di Google Earth.*

Per ogni area di indagine è stata preparata una griglia di acquisizione adattata agli spazi a disposizione e sono stati acquisiti profili di lunghezza variabile distanziati reciprocamente di 1 m. In figura 5.7 si riporta a titolo di esempio lo schema di acquisizione dell'area 1. In fase di elaborazione ogni singolo profilo è stato processato singolarmente (producendo per ognuno di essi un radargramma) e le anomalie più significative sono state analizzate.

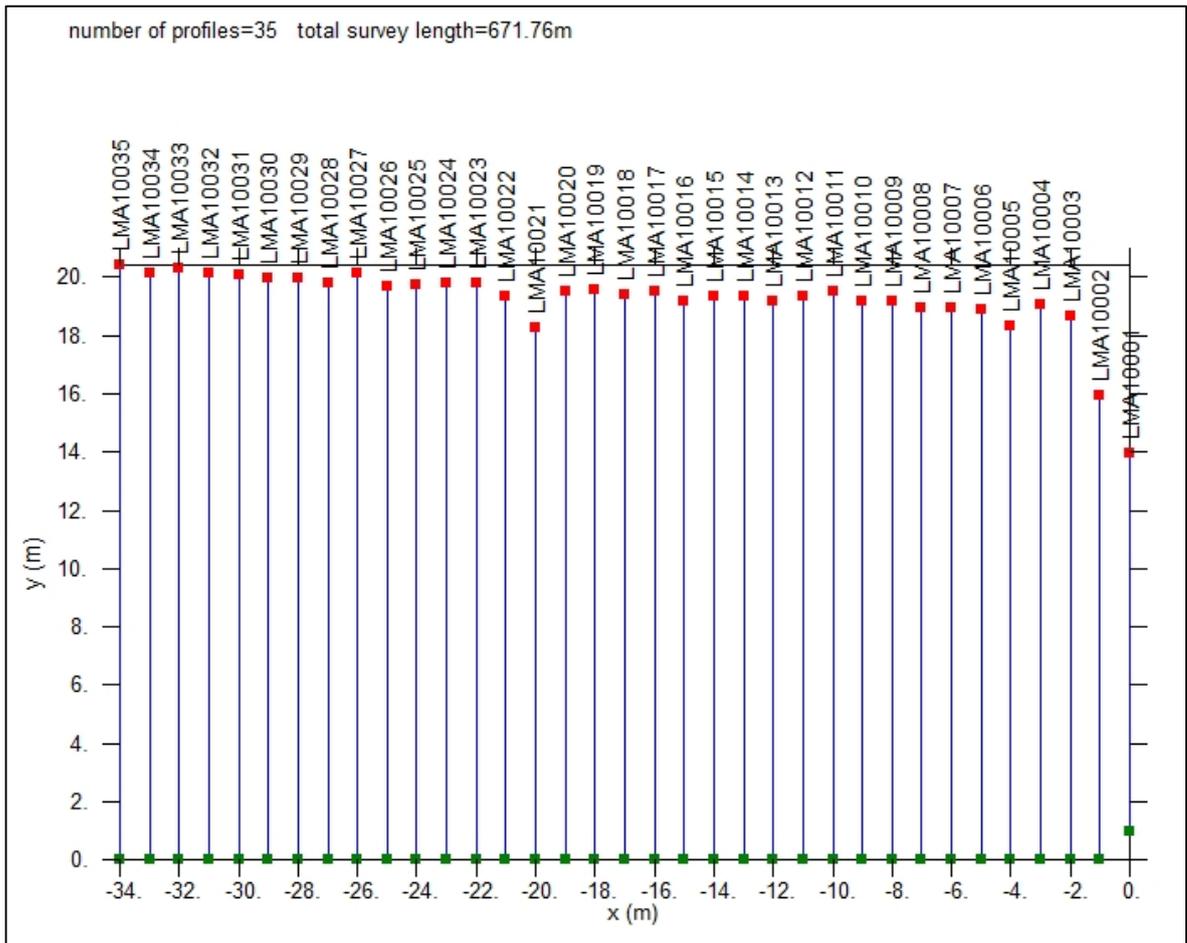


Figura 5.7. Schema di acquisizione relativa all'area 1.

Ad esempio si riportano nelle figure 5.8, 5.9, 5.10 e 5.11 rispettivamente i radargrammi dei profili 4, 6, 7 e 8: le anomalie evidenziate con dei cerchi rossi rappresentano delle possibili murature intercettate trasversalmente (iperboli) o longitudinalmente (anomalie lineari nel profilo 4 e 6) nel sottosuolo. Per meglio comprendere la distribuzione spaziale delle anomalie, per ogni area, l'intero set di dati è stato assemblato in un volume tridimensionale dal quale sono estratte varie slice a profondità differenti. Nelle figure 5.12-5.22 vengono riportate per ogni area tutte le sezioni orizzontali ottenute: i tagli, compresi in una finestra temporale di 4 ns, evidenziano chiaramente la presenza di

numerose anomalie dalla forma geometrica ben definita la cui natura è quasi certamente di natura antropica.

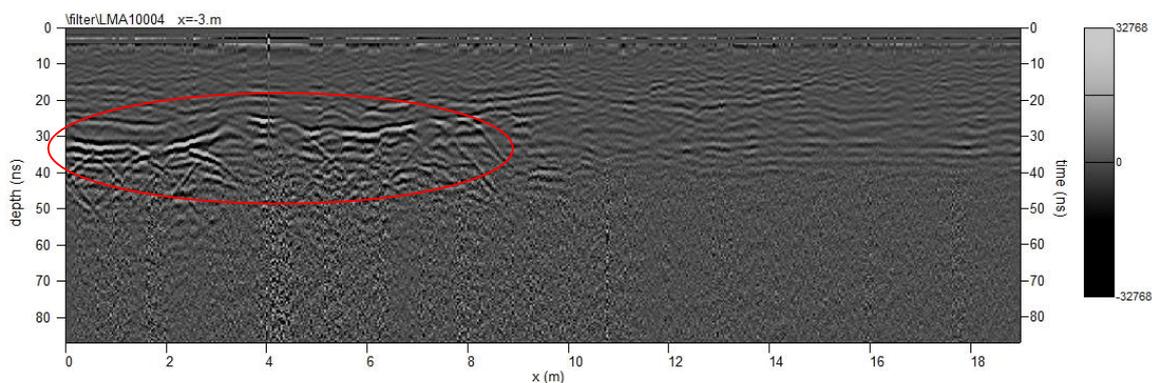


Figura 5.8. Radargramma profilo 4.

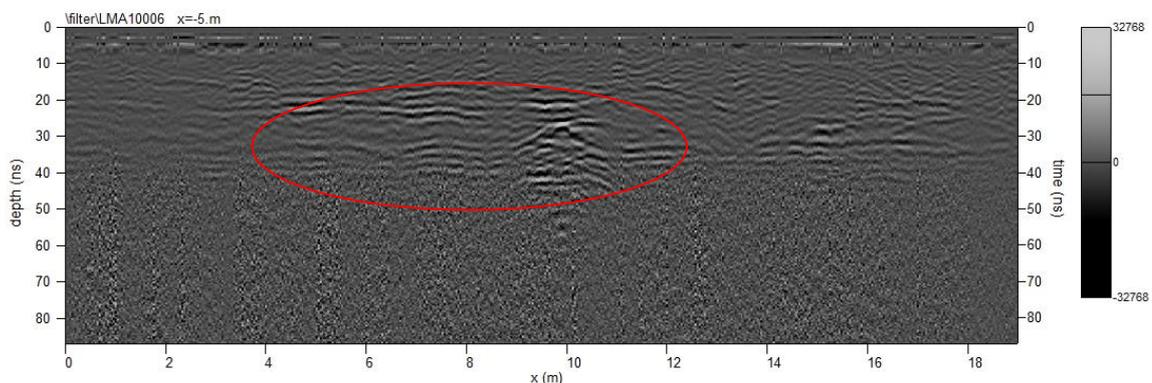


Figura 5.9. Radargramma profilo 6.

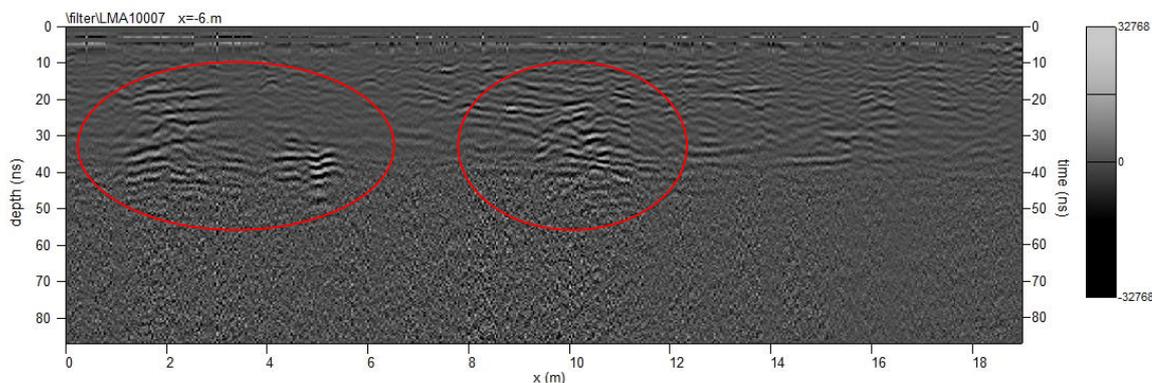


Figura 5.10. Radargramma profilo 7.

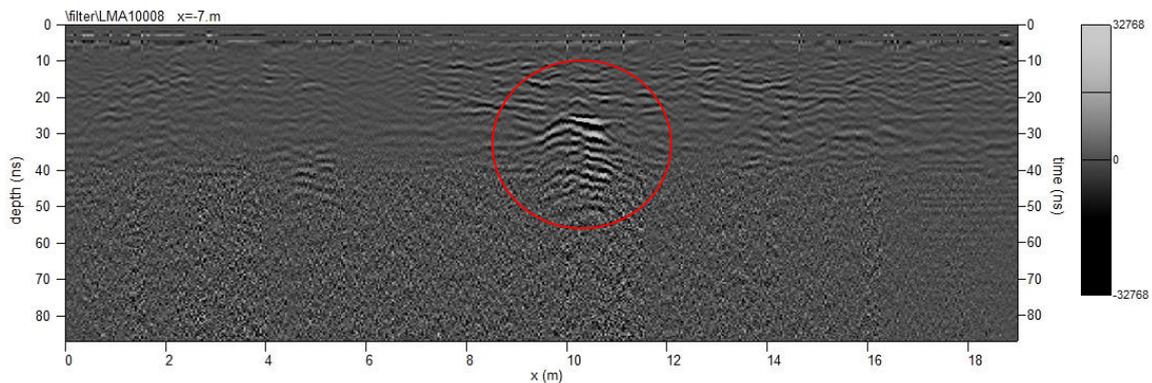


Figura 5.11. Radargramma profilo 8.

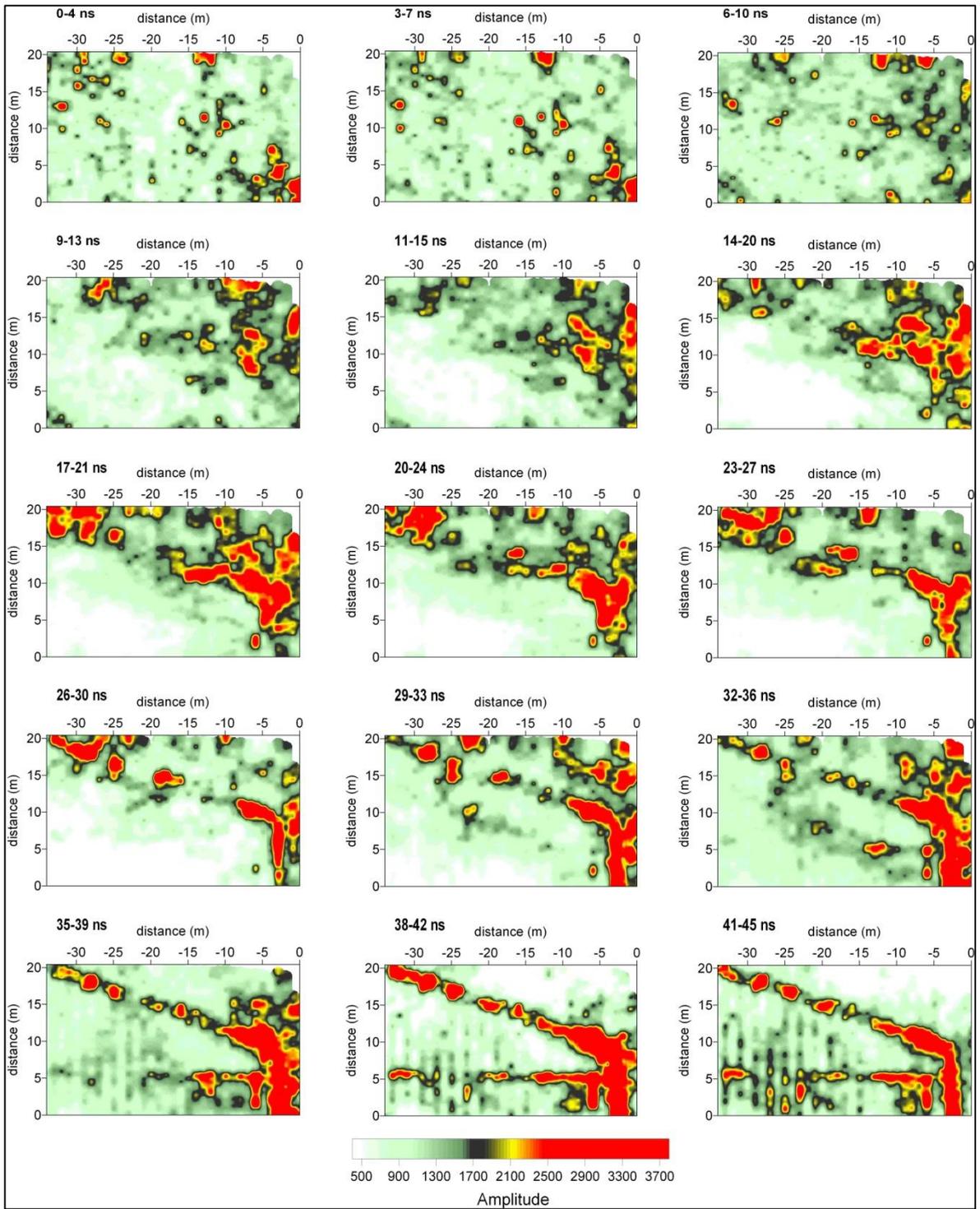


Figura 5.12. Area 1: slice orizzontali.

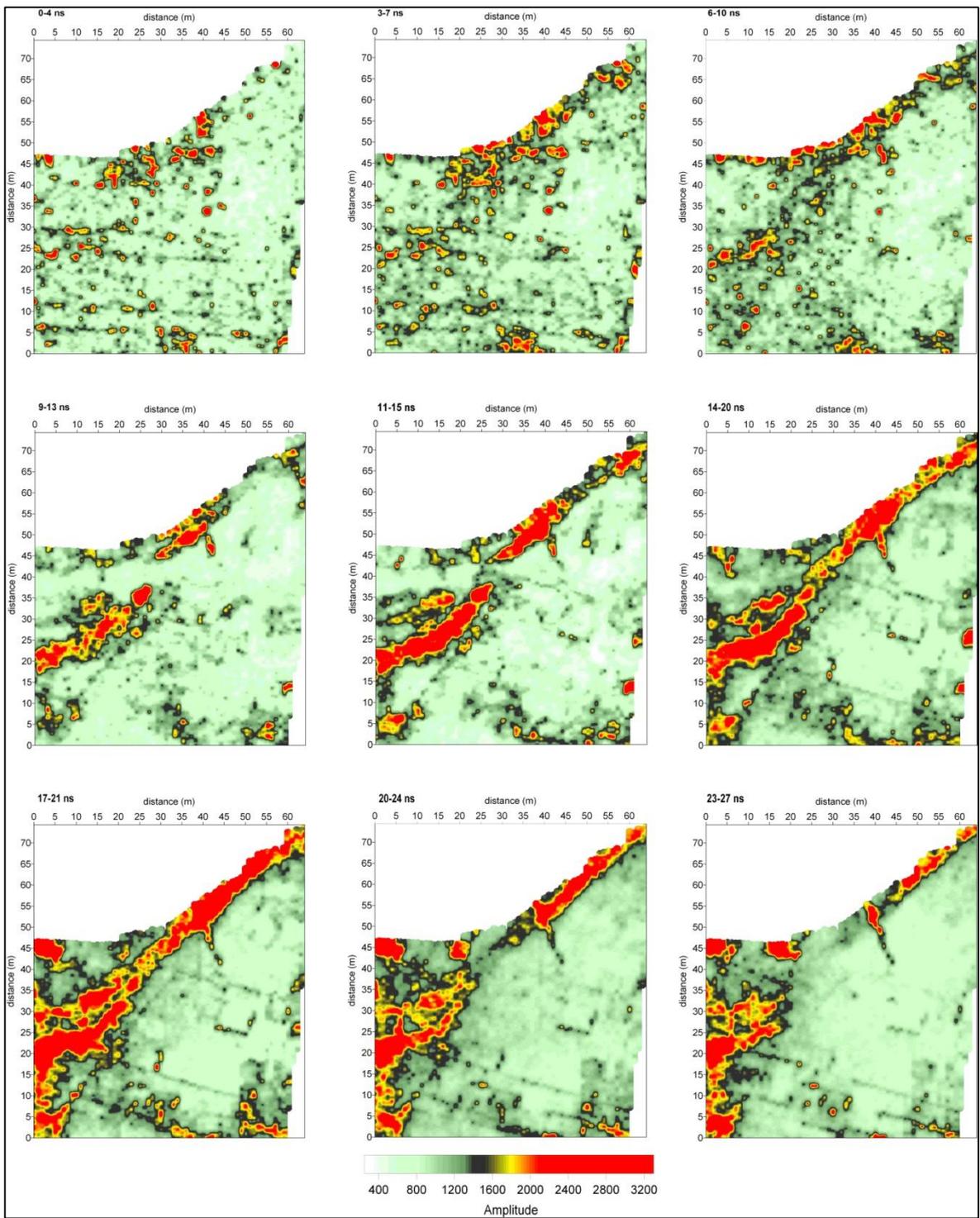


Figura 5.13. Area 2: slice orizzontali.

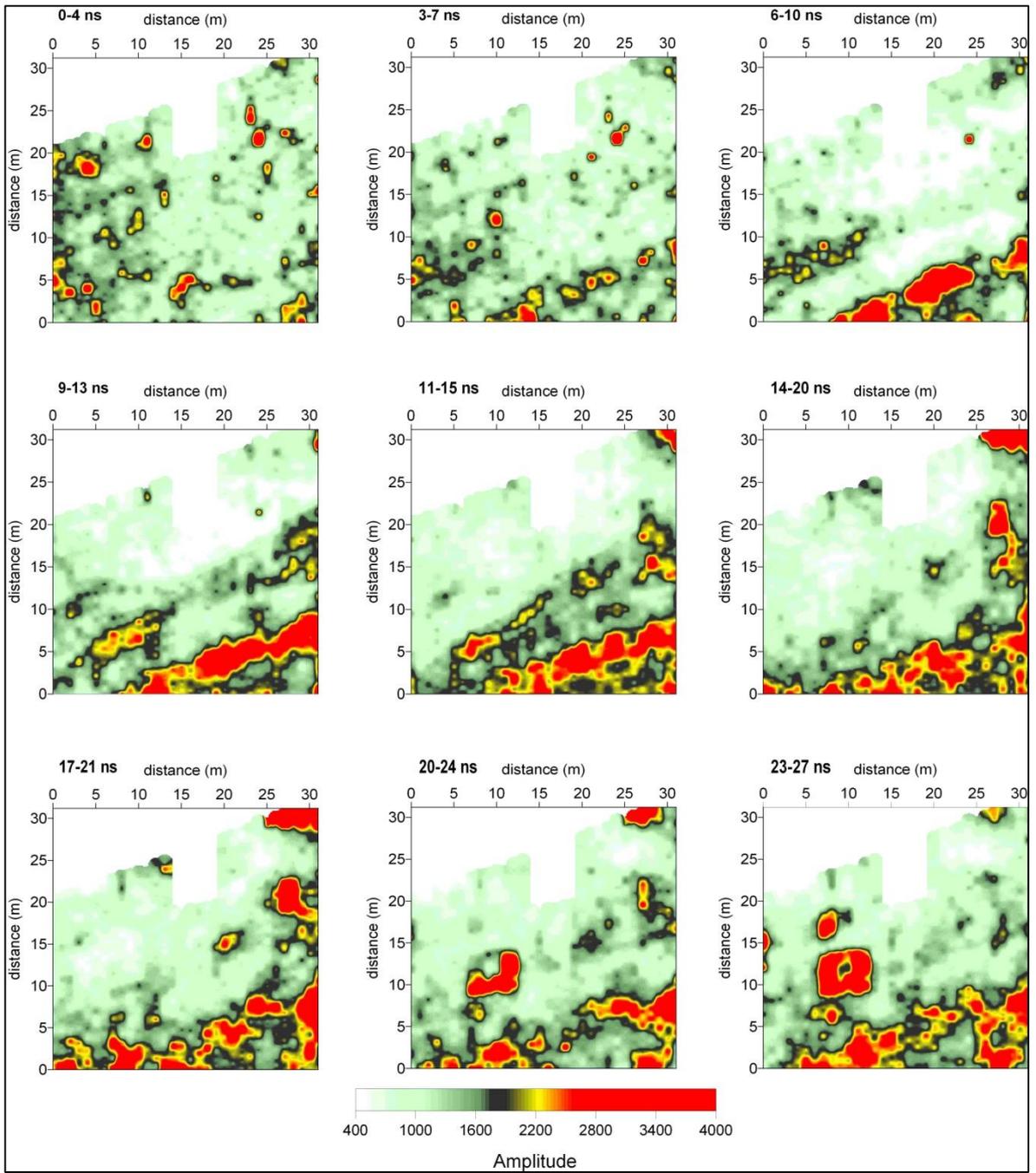


Figura 5.14. Area 3: slice orizzontali.

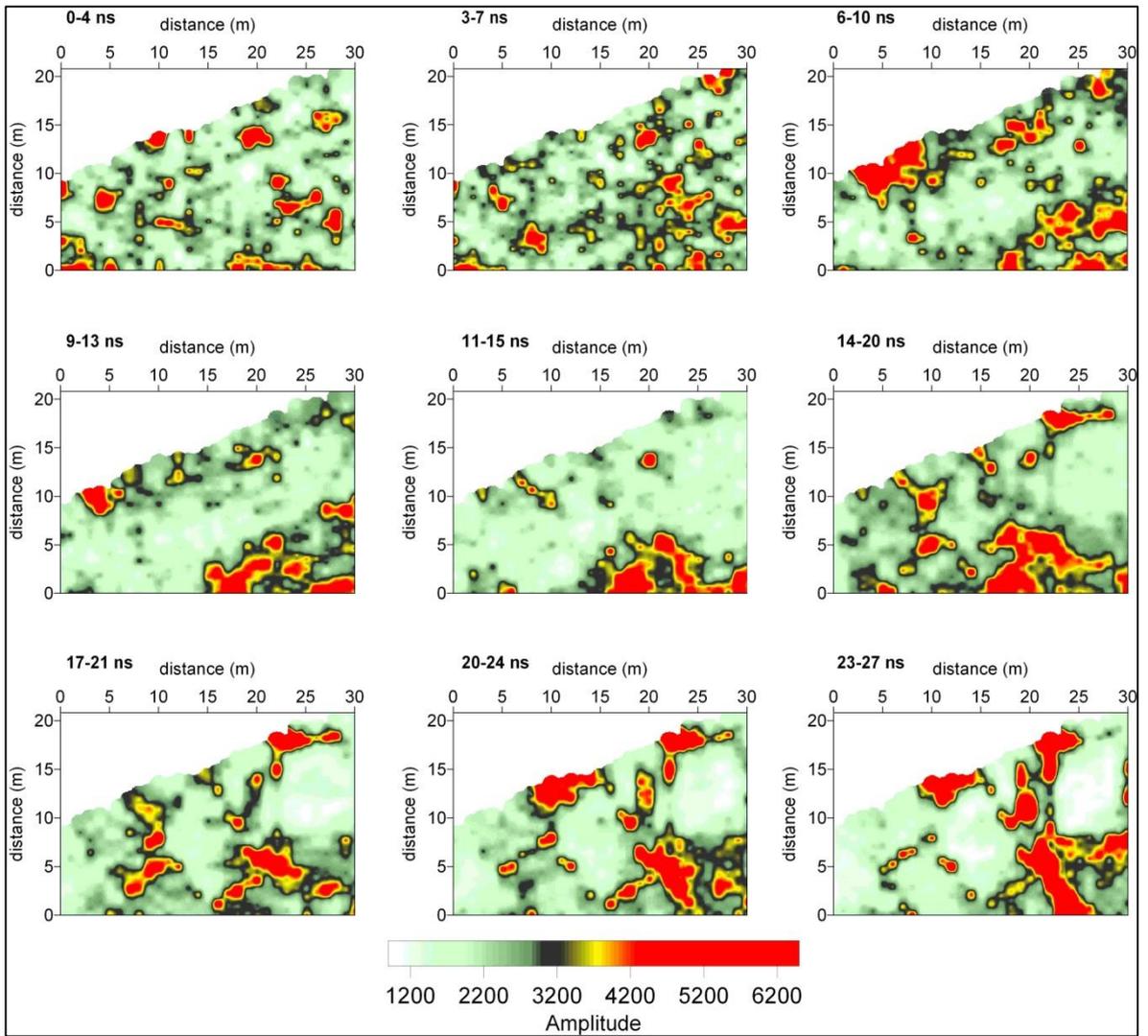


Figura 5.15. Area 4: slice orizzontali.

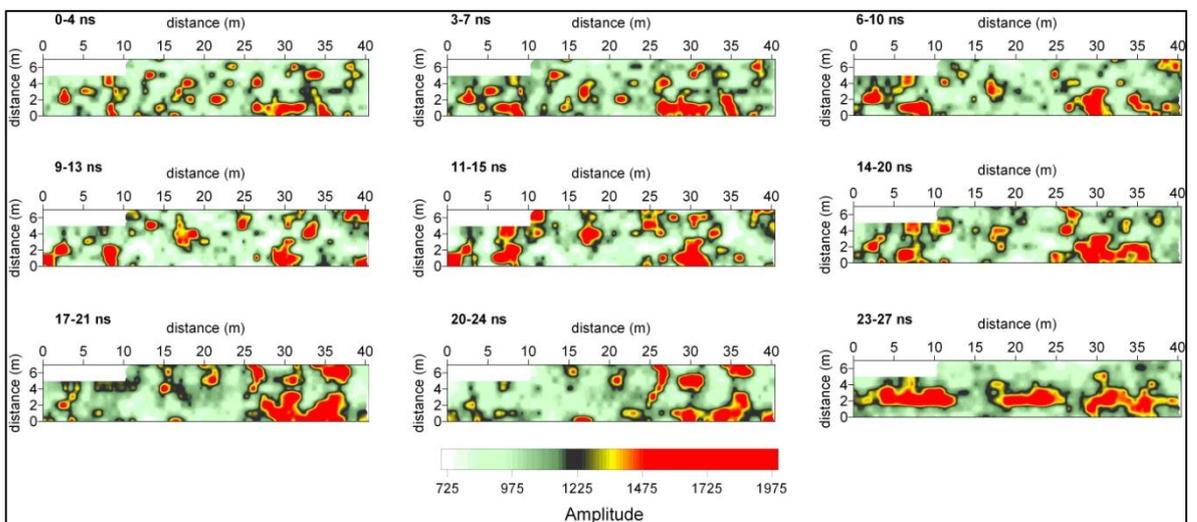


Figura 5.16. Area 5: slice orizzontali.

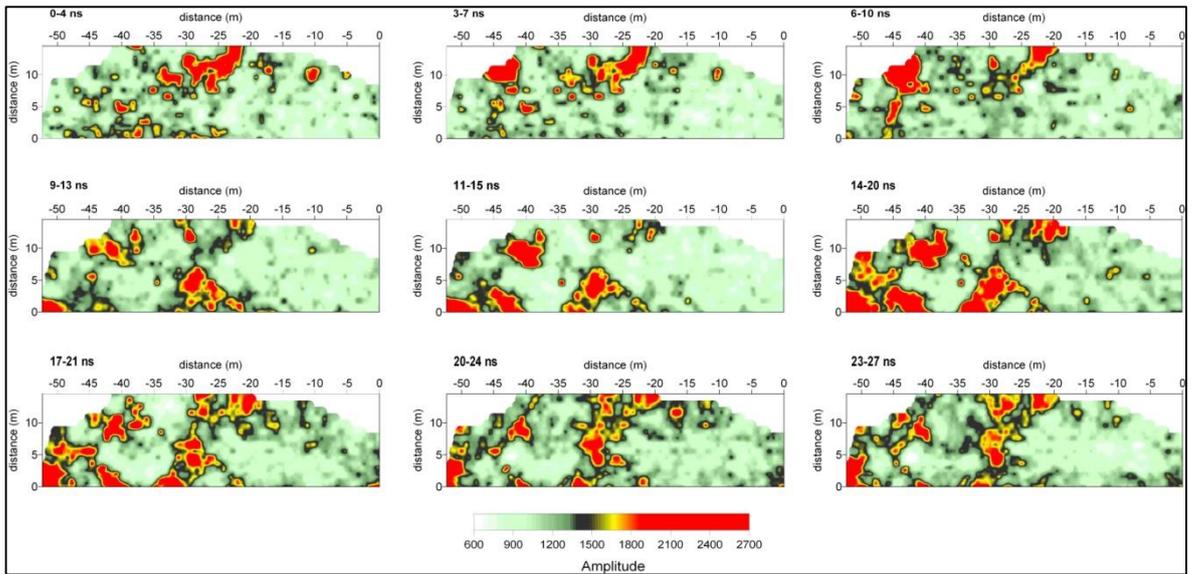


Figura 5.17. Area 6: slice orizzontali.

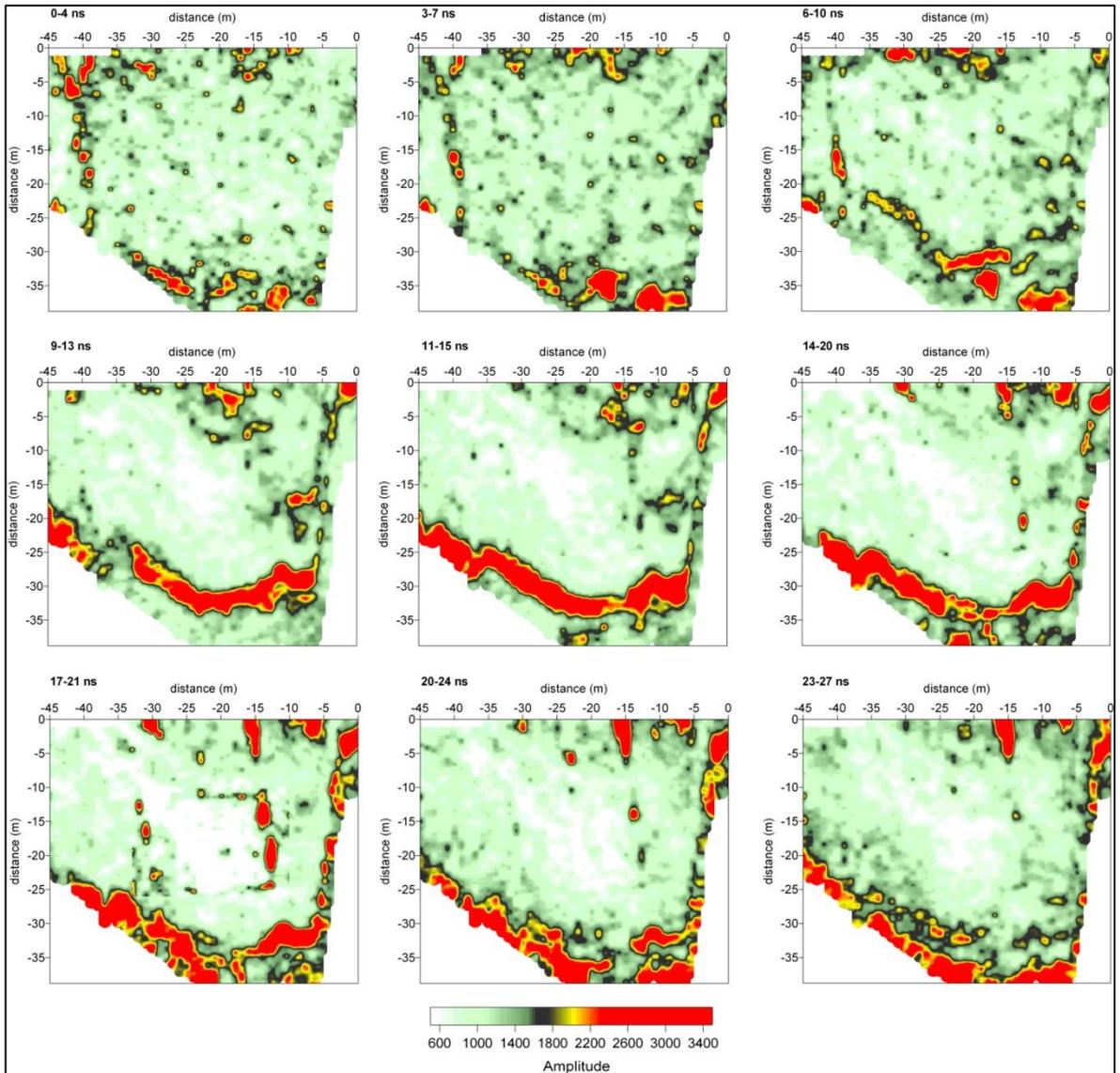


Figura 5.18. Area 7: slice orizzontali.

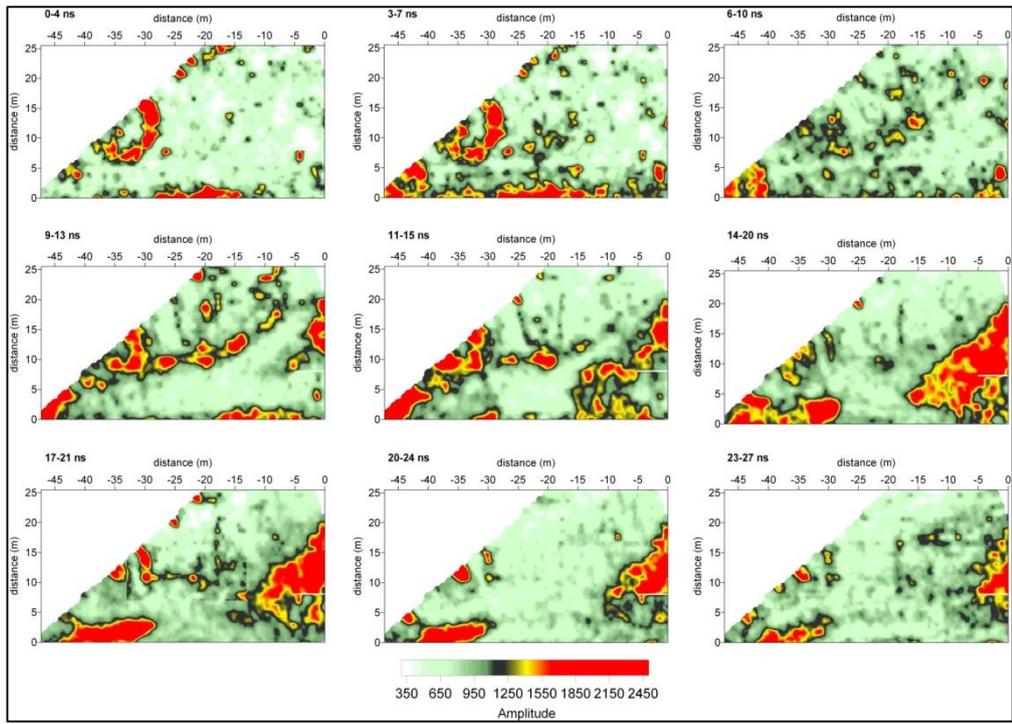


Figura 5.19. Area 8: slice orizzontali.

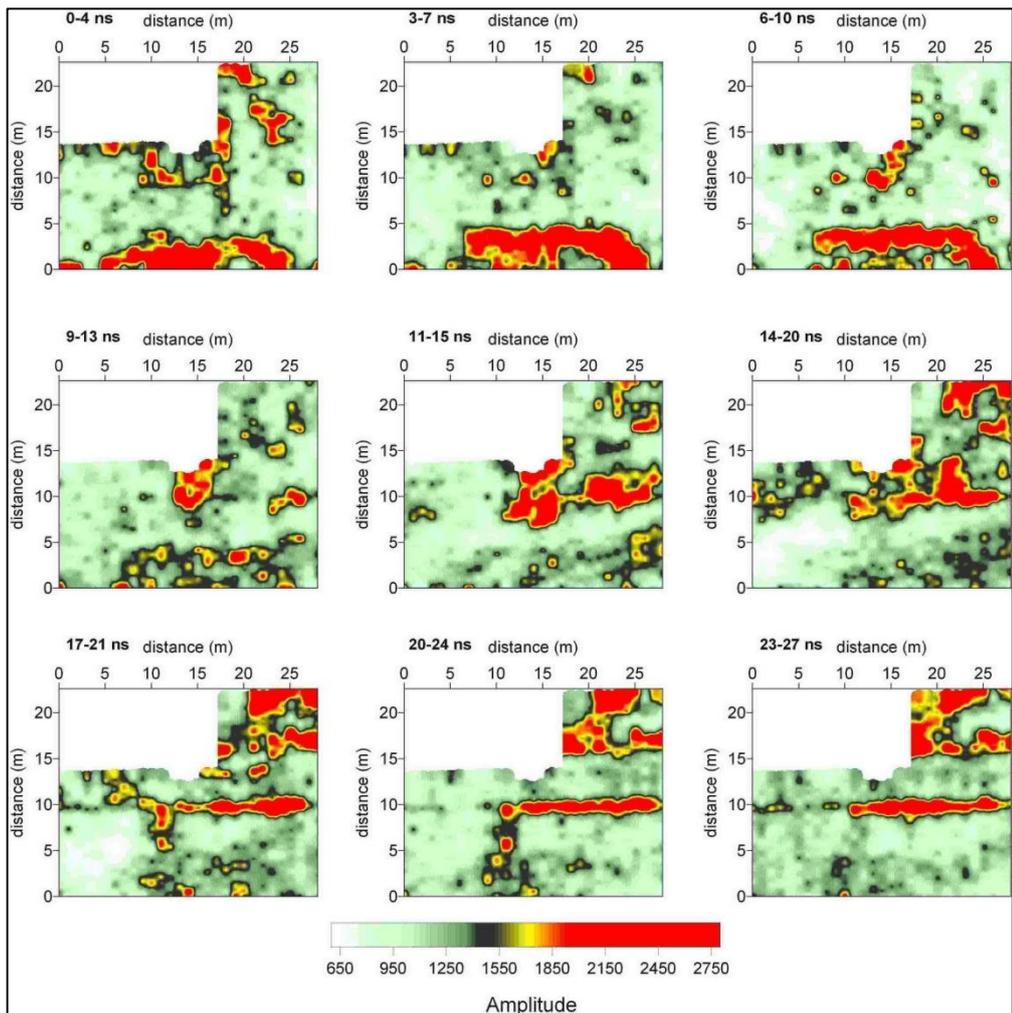


Figura 5.20. Area 9: slice orizzontali.

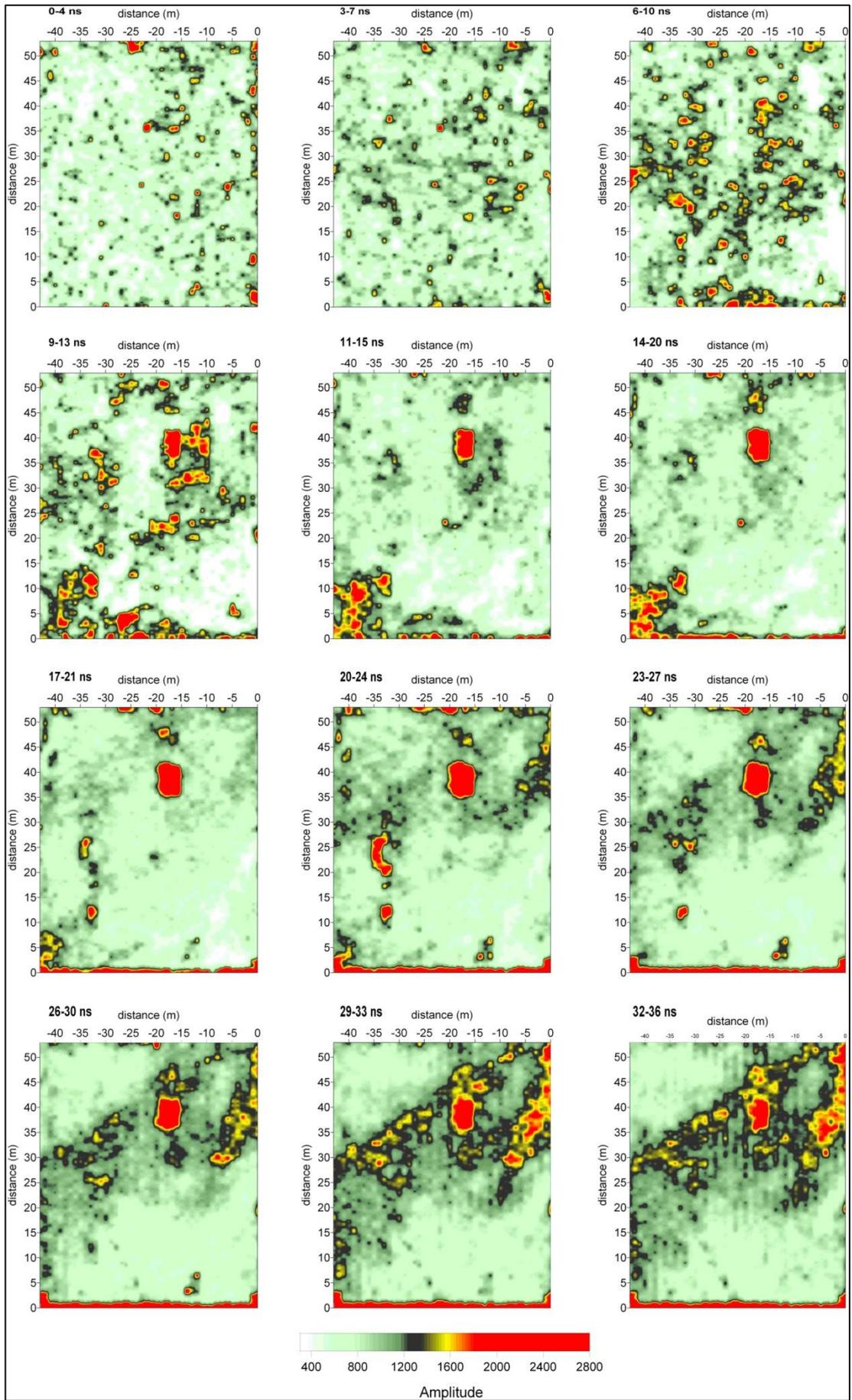


Figura 5.21. Area 10: slice orizzontali.

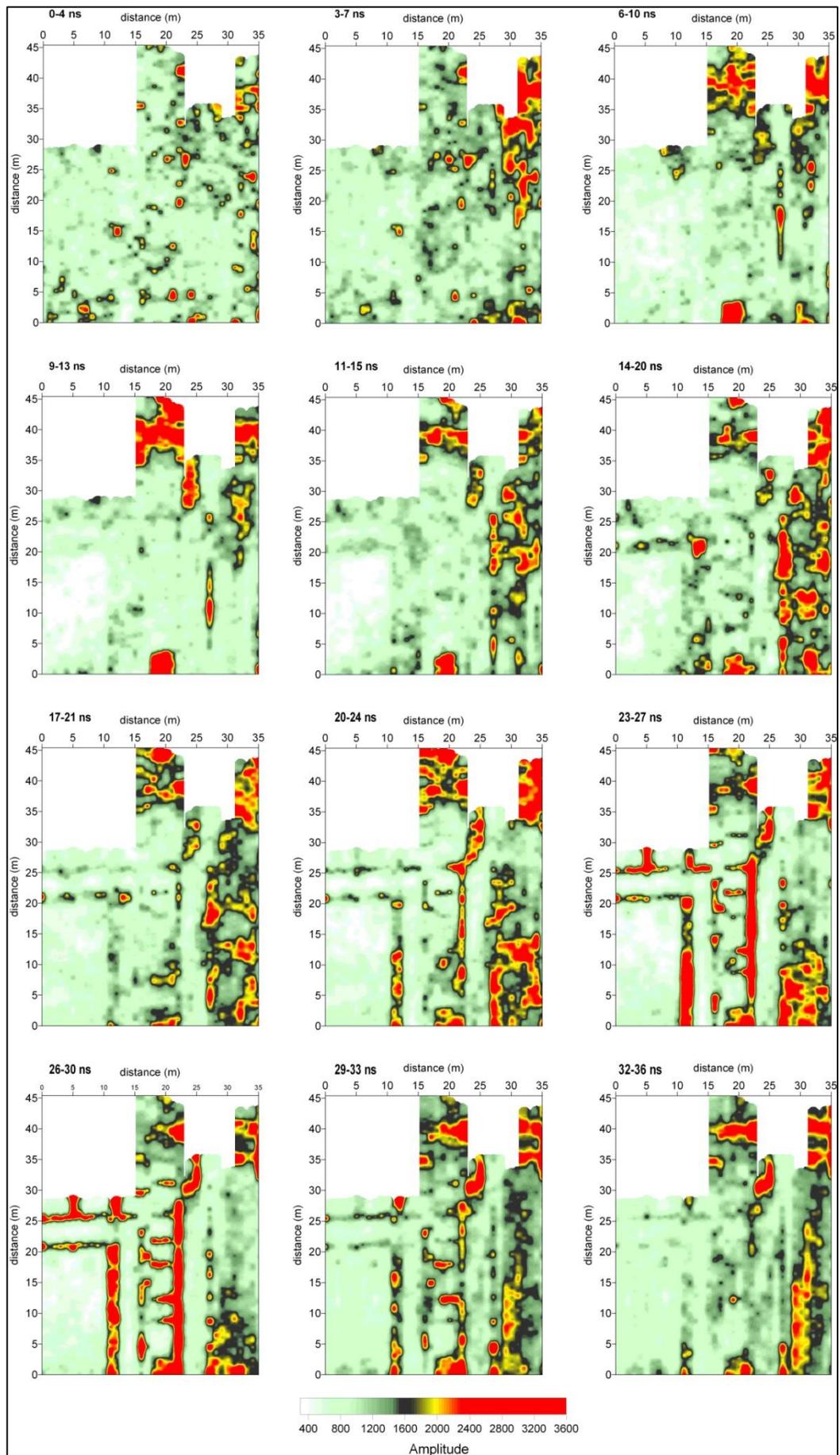
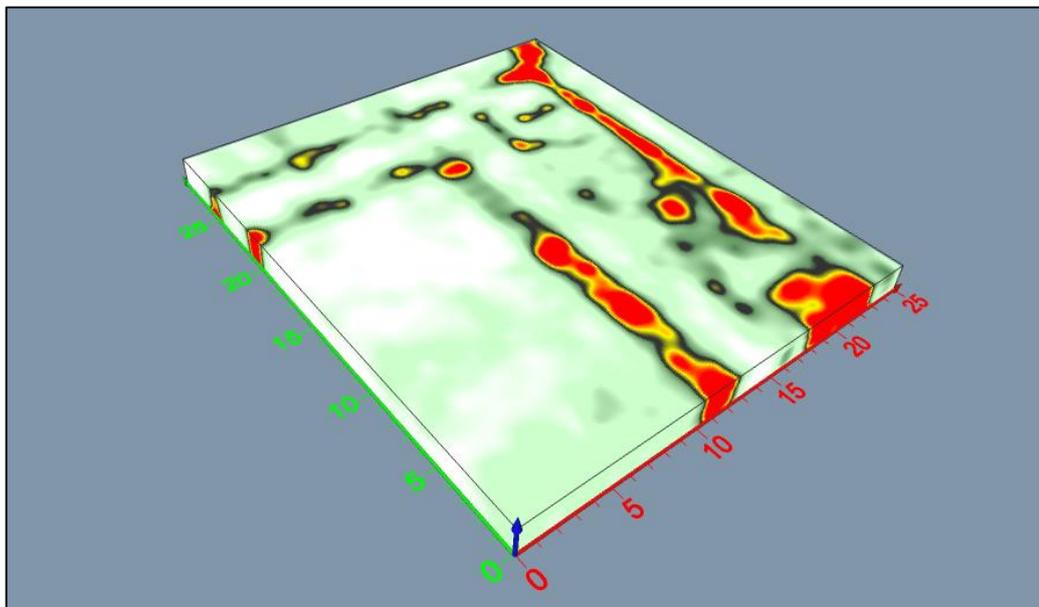
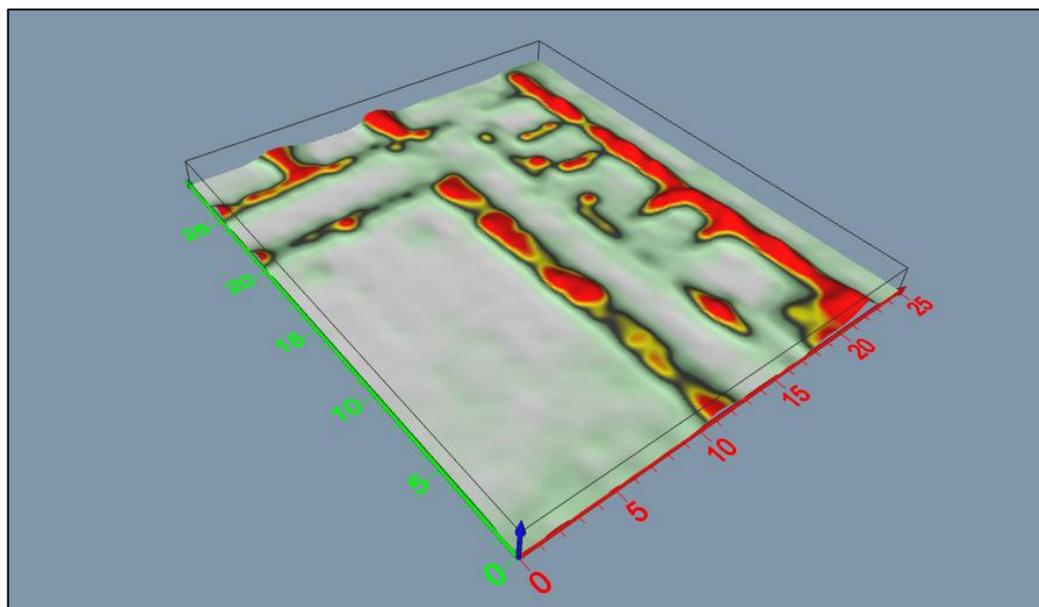


Figura 5.22. Area 11: slice orizzontali.

Risultati molto chiari sono stati ottenuti ad esempio nell'area 11, ubicata a ridosso delle terme, dove si riconoscono molto bene degli elementi anomali corrispondenti ad ambienti e stanze dell'impianto. In figura 5.23 viene rappresentata tridimensionalmente una porzione del tomospazio indagato, in figura 5.24 una sezione estrapolata dal volume e in figura 5.25 una rappresentazione delle sole anomalie con elevate ampiezze (giallo-rosso).



*Figura 5.23. Area 11: porzione volume tridimensionale indagato.*



*Figura 5.24. Area 11: sezione estrapolata dal volume di dati.*

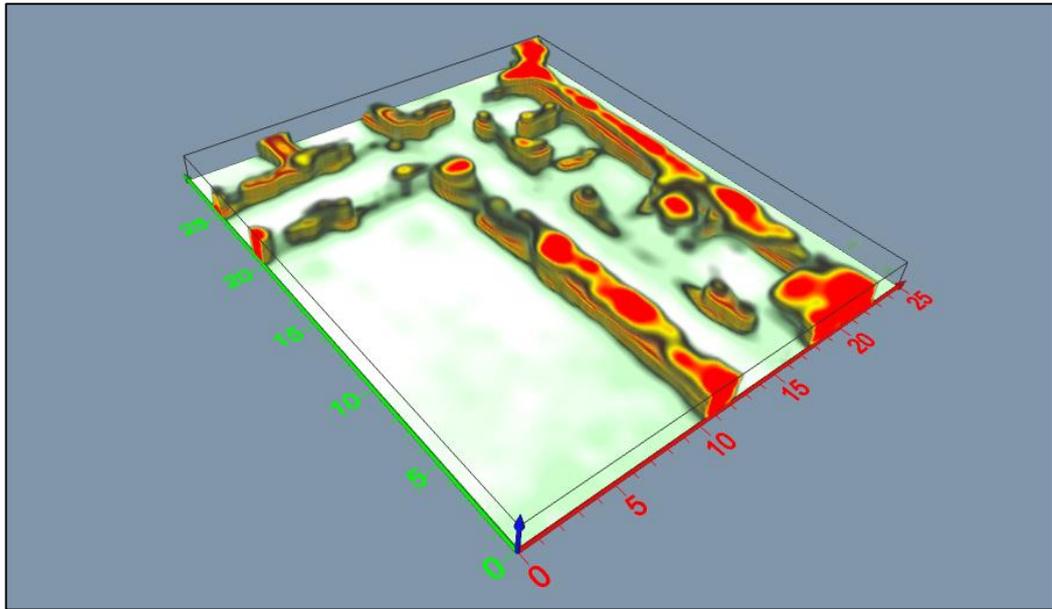


Figura 5.25. Area 11: rappresentazione delle sole anomalie con elevate ampiezze.

Per meglio interpretare le anomalie, le *slice* più significative di ogni area (relative dunque anche a finestre temporali differenti) sono state posizionate su immagine di Google Earth e messe in relazione alle strutture in luce (figura 5.26). Dall'analisi di tale elaborato emergono in maniera netta le correlazioni tra ciò che è visibile e ciò che è invisibile e sepolto. In figura 5.27 invece vengono riportate tutte le anomalie rilevate a profondità differenti (ogni colore corrisponde ad una finestra temporale diversa) e in figura 5.28, con il color magenta, le anomalie sono ubicate sulla mappa delle evidenze note.



Figura 5.26. Slice relative a diverse finestre temporali su immagine di Google Earth.

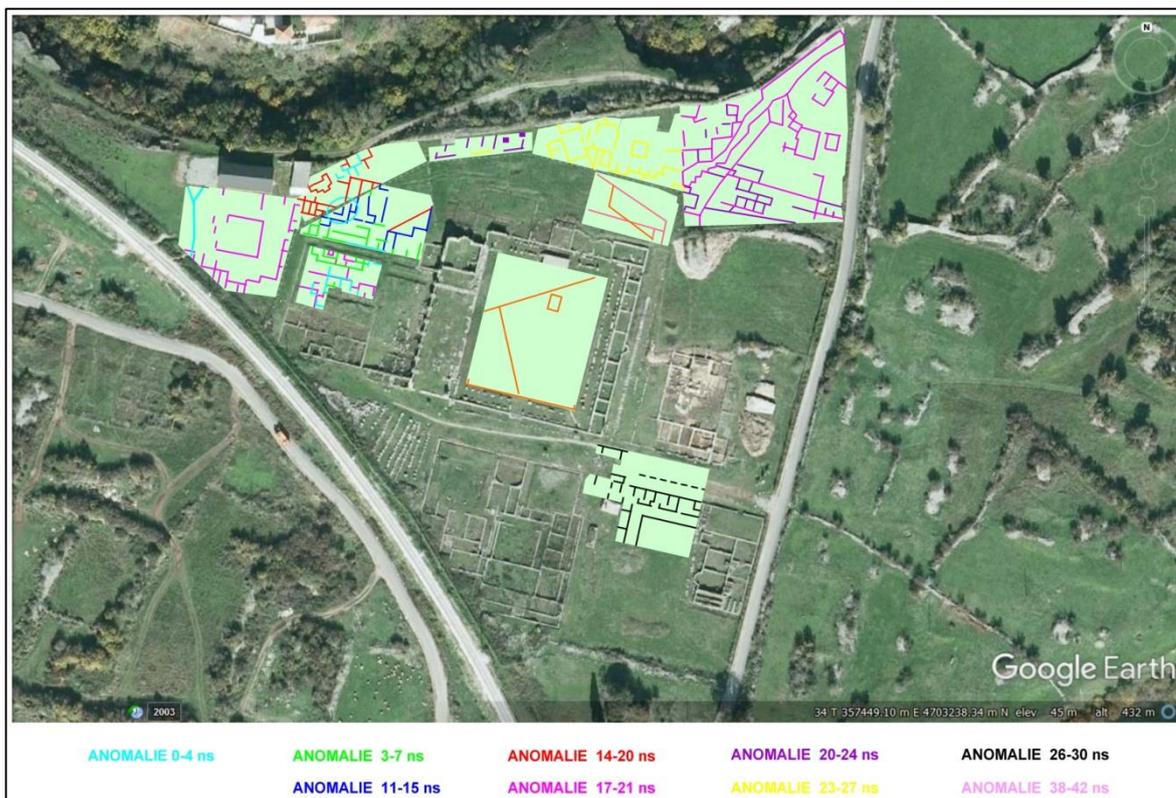


Figura 5.27. Anomalie relative a diverse finestre temporali su immagine di Google Earth.



Figura 5.28. Anomalie geofisiche (in magenta) in relazione alle strutture note (in blu) su immagine di Google Earth.

## 5.2 La Fortezza di Ighram Aousser (Marocco).

Nell'ambito del progetto<sup>93</sup> sulle prospezioni archeologiche per la ricostruzione dei contesti arqueo-metallurgici punic del Maghreb sono state svolte attività di ricerca nel distretto minerario di Aouam–Tighza (regione di Meknès-Tafilet, Marocco) (figura 5.29).

La fortezza di Ighram Aousser è sita nel territorio di Tighza (33°11'15.01"N, 5°37'25.98"O, 1100 m di altitudine, a 6 km a SO della città di M'rirt, a circa 30 km a N dalla città di Khenifra.



Figura 5.29. Localizzazione della fortezza islamica di Ighram Aousser.

Essa è probabilmente databile al periodo almoravide (XI-XII sec. d.C.), quando gli Almoravidi, per difendersi dagli Almohadi, edificarono postazioni fortificate a protezione degli insediamenti<sup>94</sup>.

L'area fortificata occupa una superficie di 27,365 ha (427x736 m) con il lato corto

93 Il progetto, sotto la responsabilità della Dr. L.I. Manfredi (ISMA-CNR), si inserisce in un più ampio programma sui parchi archeominerari. In questa ottica si sono sviluppate collaborazioni con l'Università di Meknès (Marocco), le Università di Lisbona ed Evora (Portogallo), l'Università Suor Orsola Benincasa di Napoli, l'Università di Reims (Francia). Riguardo all'approccio metodologico impostato per lo studio interdisciplinare del sito si veda MANFREDI, FESTUCCIA 2016.

94 La struttura monumentale potrebbe essere stata costruita precedentemente e risalire all'inizio del IX sec. d.C. nel periodo idrisside. Per la storia della fortezza e i confronti con il mondo islamico, per l'identificazione dei caratteri architettonici, l'analisi tipologica e costruttiva delle strutture di difesa si rimanda al contributo di FESTUCCIA 2016, pp. 45-56.

orientato a N (figura 5.30), era protetta da un'importante sistema di difesa costituito da due cinte di mura e da torri quadrangolari disposte esternamente<sup>95</sup>.



*Figura 5.30. La fortezza di Ighram Aousser da Google Earth.*

Il primo circuito di mura cinge un'area che comprende la collina dell'acropoli e un ampio territorio che, presumibilmente, doveva essere occupato da edifici pubblici e sacri, da abitazioni, da magazzini, da officine, da spazi non edificati. La grande cinta muraria ha una lunghezza di circa 2200 m e uno spessore di circa 1,85 m. Essa è molto compromessa e discontinua a causa dei crolli e delle opere di demolizione dell'uomo. Dell'organizzazione urbanistica della fortezza sono conosciute 2 porte: la prima è sita lungo il lato S (figura 5.31) e la seconda sul lato E con una disposizione classica ad angolo semplice.

La seconda fortificazione di circa 270 m di lunghezza delimita la piccola collina dell'acropoli di 0,57 ha ed è situata lungo il lato meridionale dell'area urbana (figura 5.32b).

Vista la grande estensione del sito si è scelto di effettuare ricerche su macro-scala utilizzando immagini satellitari WordView-2 (pancromatiche con risoluzione spaziale di 0,50 m/pixel e multispettrali di 2,00 m/pixel) acquisite il 19 giugno 2010 (figura 5.32), e su

---

<sup>95</sup> Le torri sono di dimensioni diverse, misurano dai 5,50 ai 3,80 m circa, mentre l'altezza varia da 1 a 3 m circa. L'altezza effettiva delle torri doveva essere di circa 8 m (EUSTACHE 1955, p. 218).

micro-scala effettuando prospezioni geofisiche ad induzione elettromagnetica sia all'interno della fortezza che nell'area dell'acropoli.



*Figura 5.31. Circuito murario in prossimità della porta Sud.*

Per evidenziare le disomogeneità superficiali presenti sulle immagini, dovute alle variazioni di tessitura, umidità dei suoli e copertura vegetale indotte in superficie dalla presenza di strutture sottostanti<sup>96</sup>, si sono utilizzate differenti procedure di elaborazione dei dati da remoto<sup>97</sup>. Le immagini risultanti sono state interpretate dal punto di vista archeologico e topografico e hanno offerto nuovi elementi sulla topografia dell'area archeologica.

La fotointerpretazione delle immagini da remoto ha consentito, per quanto riguarda l'organizzazione urbanistica del primo circuito di mura, di individuare altri possibili punti di accesso alla città: una porta è situata lungo il lato N (figura 5.32a, n. 1), un'altra lungo il lato O. L'identificazione della probabile entrata ad oriente è ipotizzabile per la presenza di tracce lineari di colore chiaro, attribuibili a possibili percorsi antichi, che dal territorio

---

96 PICCARRETA & CERAUDO 2000.

97 Principal Components Analysis -PCA, Normalized Difference Vegetation Index -NDVI (GOMARASCA 2007).

circostante convergono verso un punto del circuito murario, oggi distrutto, ed identificato come una porta (figura 5.32a, n. 2 e n. 3).

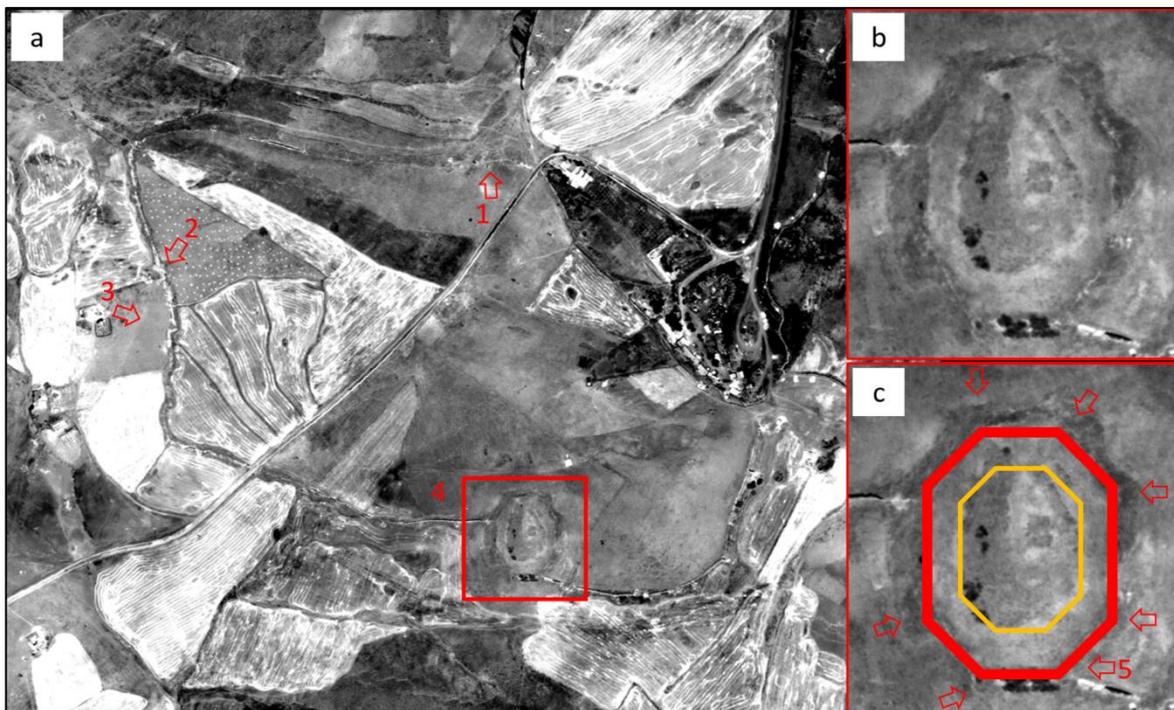


Figura 5.32. Immagine Worldview-2 pancromatica (0,50 m/pixel) della fortezza di Ighram Aousser con indicazione delle anomalie individuate sul dato telerilevato (a) e particolare della collina dell'acropoli (b e c).

Per quanto riguarda la seconda fortificazione la lettura e l'interpretazione delle immagini da remoto ha consentito di definire l'area detta acropoli e la sua particolare forma ottagonale. Le mura di fortificazioni, che misurano circa 270 m, delimitano uno spazio di forma ottagonale, sopraelevato rispetto al terreno circostante, con torri esterne poste presso tutti e otto gli angoli della struttura (figura 5.32b e c).

Sempre sulle immagini telerilevate è stato possibile identificare, presso il lato N dell'ottagono, la presenza di un'importante struttura quadrangolare posta a poca distanza dalla collina e che potrebbe essere indentificata come un elemento (torre) di una porta a tenaglia (figura 5.32c).

Lungo il lato S le mura ottagonali si intersecano con la grande struttura di difesa che cinge l'intera fortezza<sup>98</sup> (figura 5.32c, n. 5): un saggio di scavo effettuato nel settembre del 2014<sup>99</sup> ha portato alla luce i resti di una torre quadrangolare (figura 5.33).

La metodologia di costruzione, i materiali impiegati, i dati di scavo e la posizione

<sup>98</sup> COZZOLINO *et al.*, 2016.

<sup>99</sup> MANFREDI 2016.

topografica fanno ipotizzare che la cinta ottagonale sia antecedente alle mura che delimitano l'intera area fortificata.

Inoltre dalle immagini telerilevate è stato possibile individuare, alla quota del piano di calpestio della collina, un'ulteriore struttura ottagonale che racchiude la sommità dell'acropoli e che risulta avere la stessa forma e lo stesso orientamento della fortificazione ottagonale più esterna (figura 5.32c).



*Figura 5.33. Particolare della torre quadrata esterna individuata lungo il settore meridionale della collina dell'acropoli.*

Dalle indagini ad induzione elettromagnetica (figure 5.34, 5.35, 5.36, 5.37) effettuate ad Est della fortezza emerge una situazione alquanto sterile di strutture antropiche ad eccezione di un'anomalia ad elevata resistività di forma quadrata nello spazio a S della porta (figure 5.35, 5.36). L'assenza di strutture in pietra, nonostante la presenza cospicua di materiale archeologico sul terreno, può supportare l'ipotesi che all'ingresso della città fossero presenti principalmente strutture in legno delle quali non sono rimaste tracce.

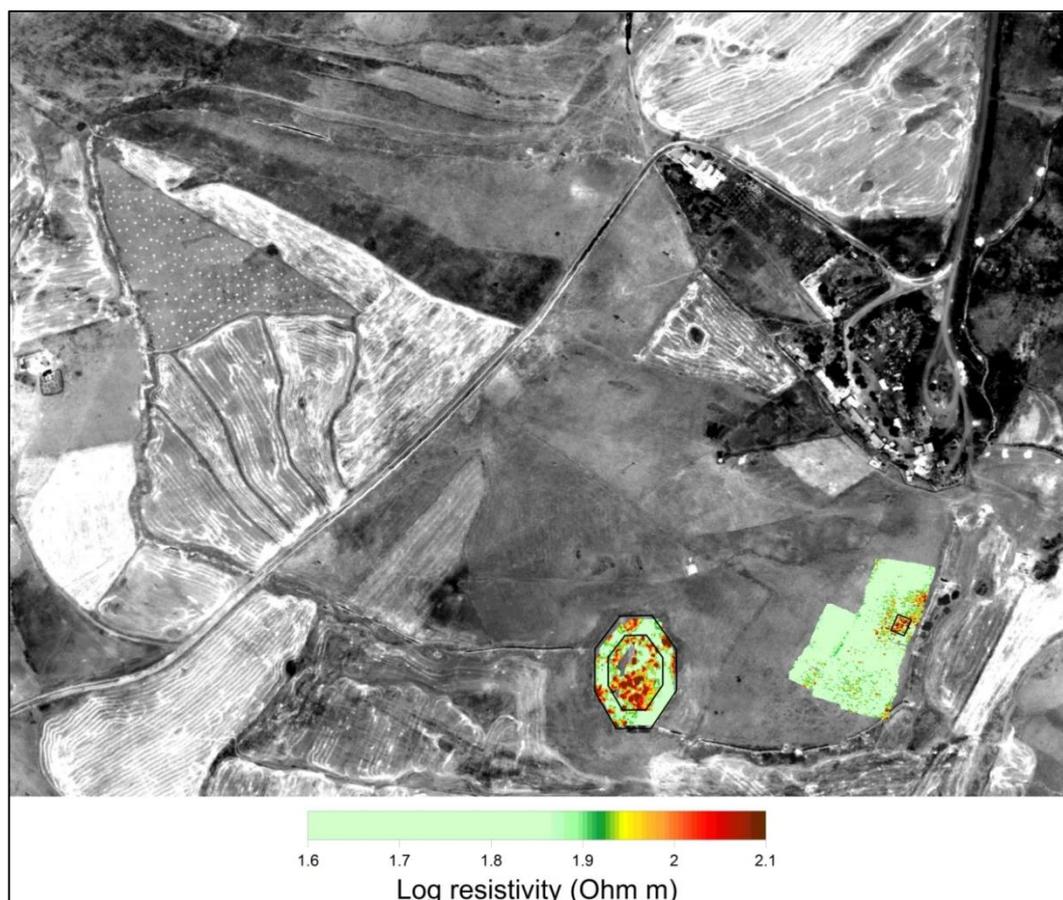
Sull'acropoli i risultati geofisici hanno confermato la presenza di una doppia cinta concentrica di forma ottagonale e inoltre individuato la posizione di alcune probabili

torri<sup>100</sup> (indicate con delle frecce in figura 5.36).

A profondità più elevate (figura 5.37) non si evidenziano anomalie significative.

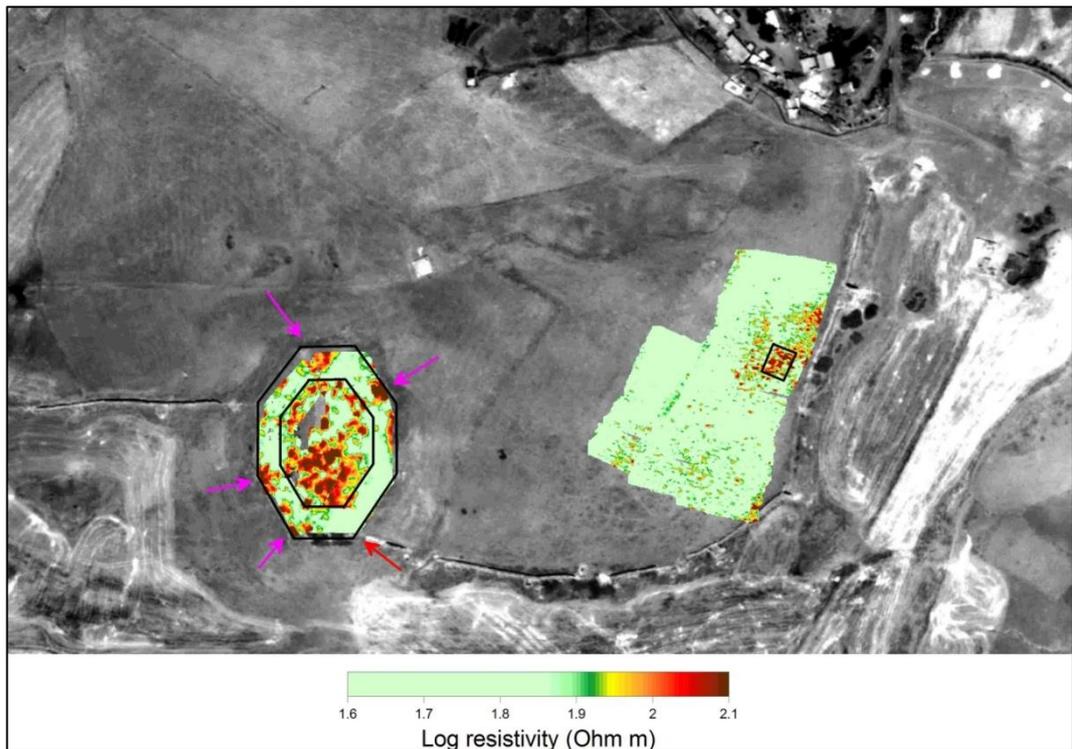


*Figura 5.34. Acquisizione dei dati con Profiler EMP-400 (GSSI)*

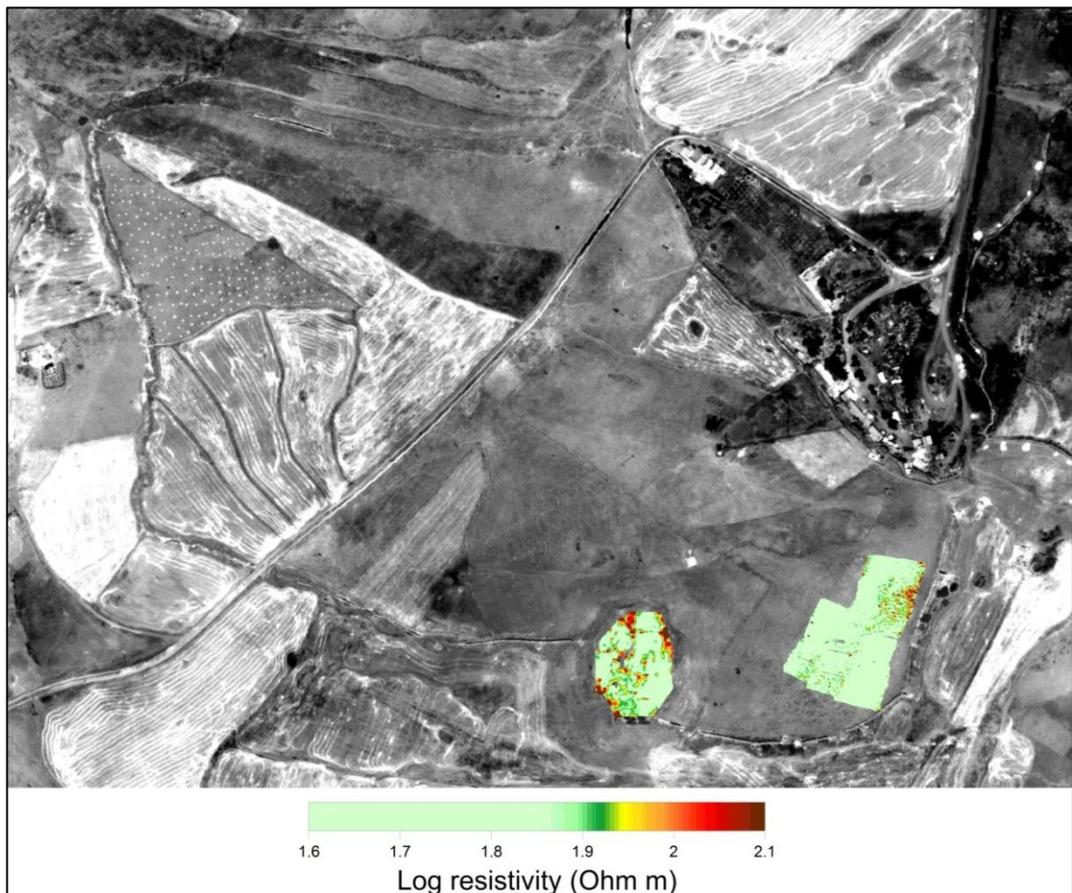


*Figura 5.35. Mappa di resistività relativa alla frequenza di 15000 Hz sovrapposta all'immagine satellitare*

<sup>100</sup> COZZOLINO *et al.*, 2016.



*Figura 5.36. Mappa di resistività relativa alla frequenza di 15000 Hz sovrapposta all'immagine satellitare e indicazione delle anomalie più significative.*



*Figura 5.37. Mappa di resistività relativa alla frequenza di 8000 Hz sovrapposta all'immagine satellitare.*

### 5.3 Sito archeologico di Tell El Maskhuta (Egitto).

Il sito di Tell El Maskhuta è situato nel delta orientale del Nilo a circa 17 Km ad Ovest dalla città di Ismailia, nella regione dello Wadi Tumilat (figura 5.38). Esso è attualmente tagliato in due dal moderno canale di Ismailia che percorre lo wadi nella sua direttrice Ovest-Est (figura 5.39). Nella parte settentrionale il sito è delimitato da un elevato tell, mai scavato finora, di 900 m di lunghezza e una larghezza massima di 60 m. Al contrario, la parte meridionale è stata investigata con vecchi scavi archeologici non ben documentati: il sito è stato indagato in parte nell'800 da E. Neville<sup>101</sup>, che vi trovò grandi e importanti sculture di Ramesse II, e tra il 1977 e il 1985 dall'Università di Toronto sotto la guida di J.S. Holladay<sup>102</sup>.

Dal 2015 è stato avviato un progetto di ricerca<sup>103</sup>, coordinato dalla Dott.ssa G. Capriotti dell'Istituto per gli Studi del Mediterraneo Antico (CNR, Roma), che ha previsto ricognizioni archeologiche, verifiche stratigrafiche e analisi geofisiche soprattutto sul tell (figura 5.40), da sempre considerato un accumulo sterile di sabbie depositate durante la costruzione del canale di Ismailia.

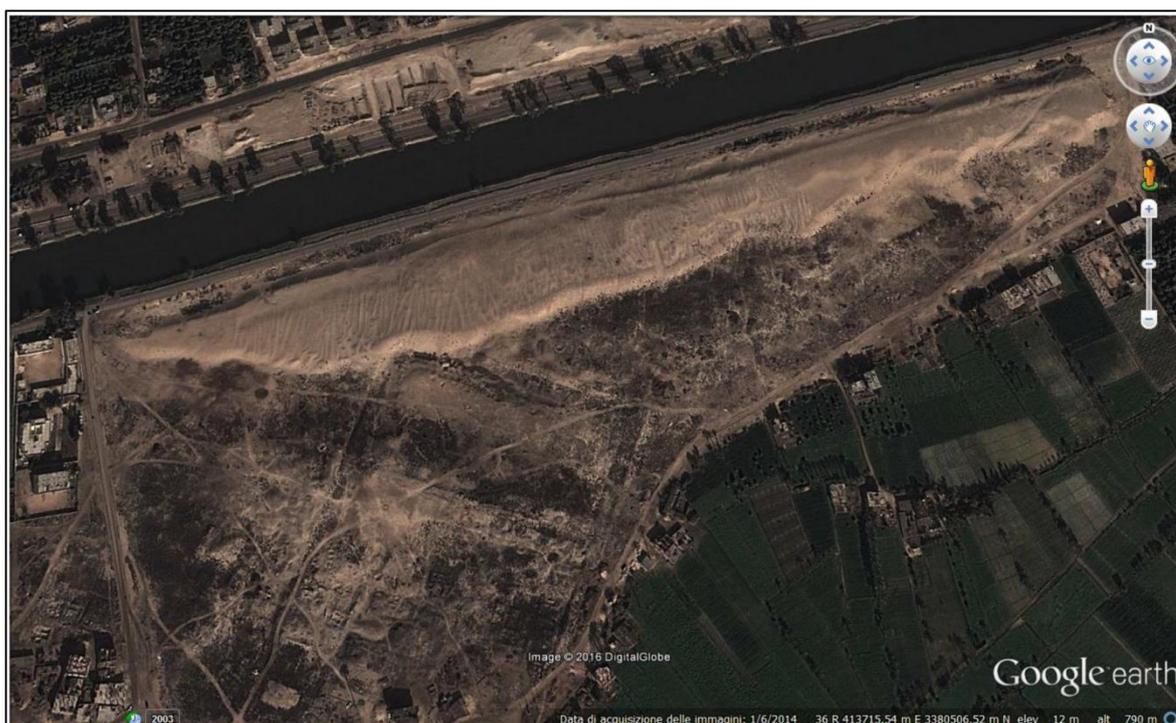


Figura 5.38. Localizzazione sito archeologico di Tell El Maskhuta su immagine di Google Earth.

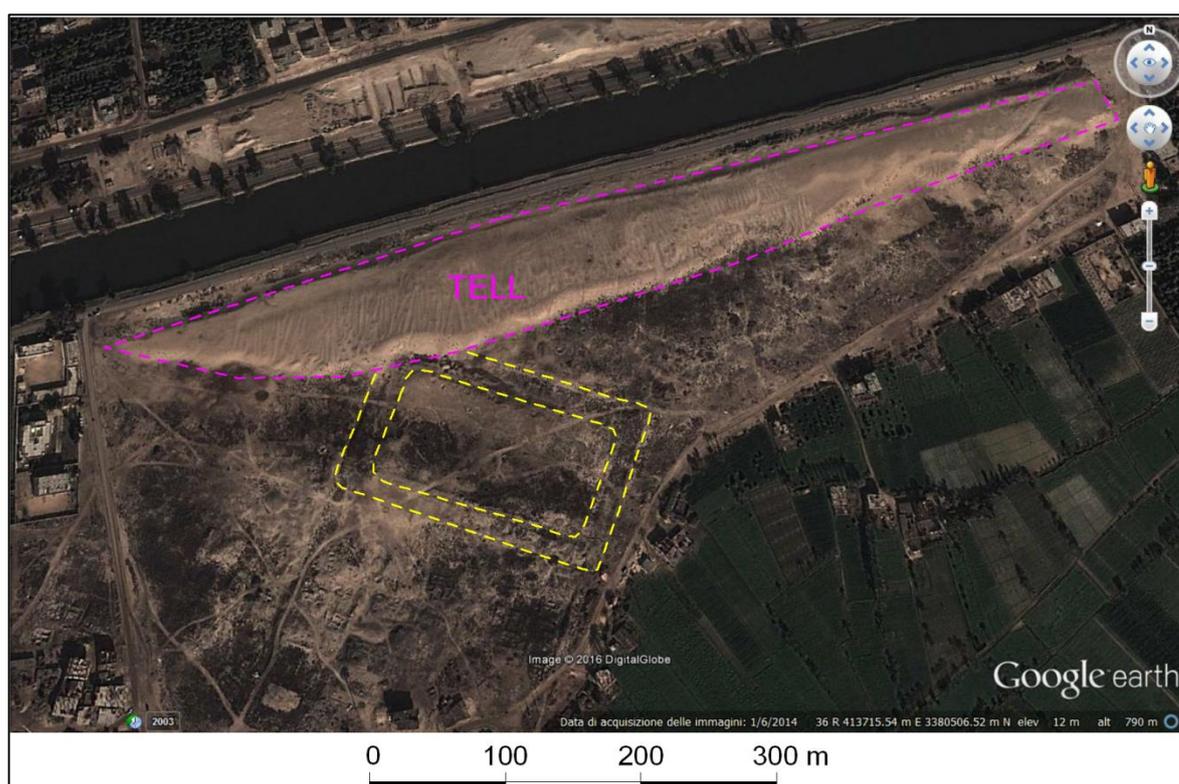
<sup>101</sup> NAVILLE 1885.

<sup>102</sup> HOLLADAY 1982.

<sup>103</sup> CAPRIOTTI & ANGELINI 2015.



*Figura 5.39. Tell El Maskhuta da immagine di Google Earth.*



*Figura 5.40. Tell El Maskhuta da immagine di Google Earth: il tell in magenta e la fortificazione in giallo.*

La parte orientale del tell mostra una sezione in cui sono visibili depositi alluvionali terrazzati, parzialmente cementate in alto a causa della precipitazione di carbonati chimici,

situazione riscontrabile anche dall'altra parte del canale dove furono trovate delle sepolture durante i lavori di costruzione della strada. Questi risultati e la preferenza degli antichi egizi a scavare tombe nella roccia o in un terreno duro e in elevato, fanno ipotizzare la presenza di una necropoli anche nel Tell<sup>104</sup>. Per quanto riguarda la parte bassa del sito, la ricognizione ha consentito di individuare diversi tratti di una doppia cinta muraria, la cui traccia è ben visibile sull'immagine di Google Earth del 2015 (figure 5.39 e 5.40) non documentati da Naville e Clédat<sup>105</sup> e tuttora visibili nella parte settentrionale e occidentale<sup>106</sup> (figura 5.41).

Le prospezioni geofisiche ad induzione elettromagnetica sono state realizzate in quattro differenti aree, una posizionata sul tell e tre a Sud di esso (figura 5.42).



Figura 5.41. Tratti di mura visibili nella parte settentrionale e occidentale della fortificazione (da CAPRIOTTI et al. 2016).

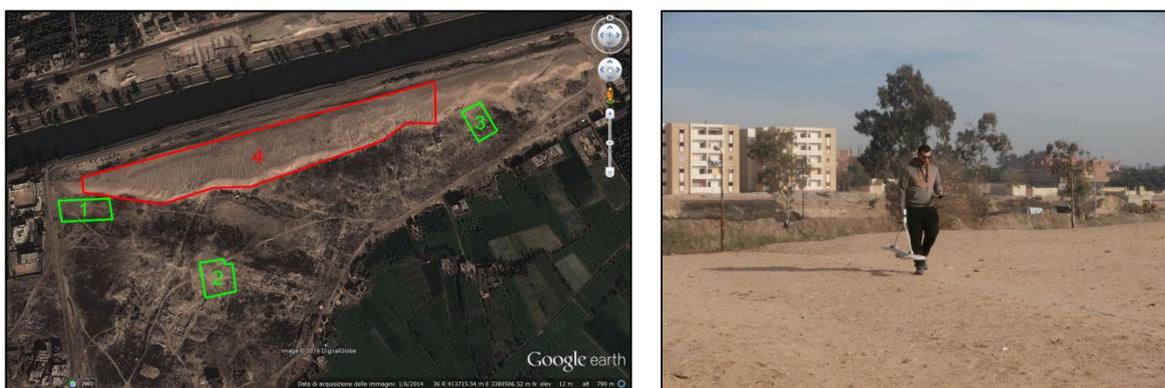


Figura 5.42. Ubicazione delle indagini (sinistra) e acquisizione dei dati con Prolifer GSSI (destra)

Dallo studio mappa di resistività relativa alla frequenza di 15.000 Hz è stato possibile

<sup>104</sup> CAPRIOTTI et al. 2016.

<sup>105</sup> CLÉDAT 1921, p. 167-197.

<sup>106</sup> CAPRIOTTI et al. 2016.

individuare diverse anomalie rispetto ai valori mediamente misurati nelle aree indagate (figura 5.43). Dal risultato geofisico si deduce facilmente che le anomalie alto resistive, visibili sia al di sopra che al di sotto del Tell, presentano forme geometriche regolari identificabili probabilmente come strutture sepolte.

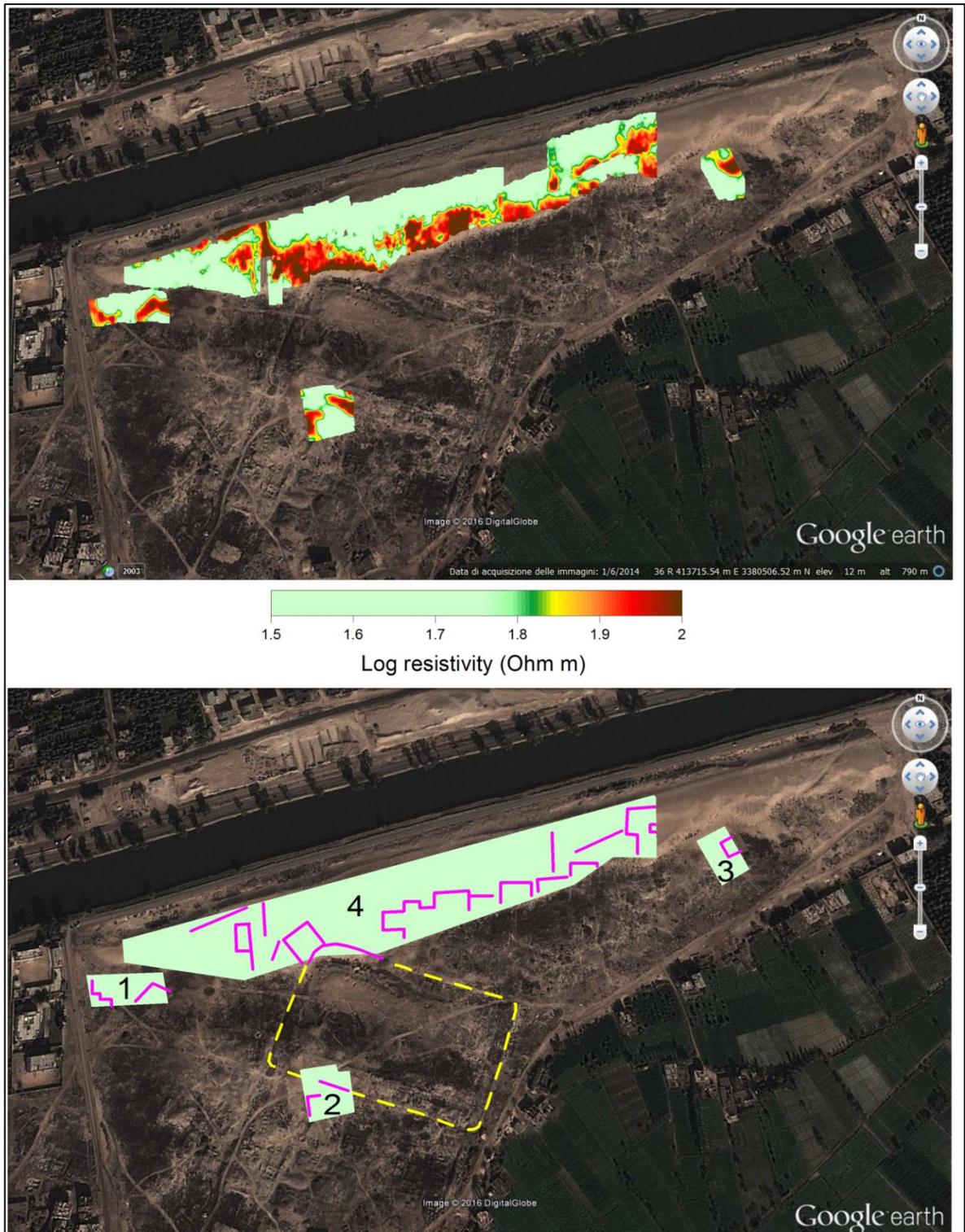


Figura 5.43. In alto mappa di resistività relativa alla frequenza di 15000 Hz posizionata su immagine Google Earth, in basso interpretazione delle anomalie.

Nelle figure 5.44, 5.45 e 5.47 vengono riportati degli ingrandimenti dei risultati delle aree 1, 2 e 3, mentre in figura 5.46 è riportata una rappresentazione tridimensionale delle anomalie relative all'area 2. In particolare nell'area 2 è visibile un tratto di muratura facente parte del muro di cinta del lato Sud della fortezza; nell'area 3 le indagini hanno evidenziato un'anomalia quadrangolare confermando la presenza di una struttura archeologica, individuata anche sull'immagine satellitare. Il dato più significativo è rappresentato dall'area 4 dove è stato identificato l'angolo Nord del circuito murario della fortezza e sono state individuate diverse anomalie alto-resistive di grandi dimensioni, che si configurerebbero probabilmente come strutture archeologiche sepolte, smentendo l'ipotesi che il tell fosse un accumulo di sabbia dovuto allo scavo del canale di Ismailia.



*Figura 5.44. Dettaglio area 1*



*Figura 5.45. Dettaglio area 2*

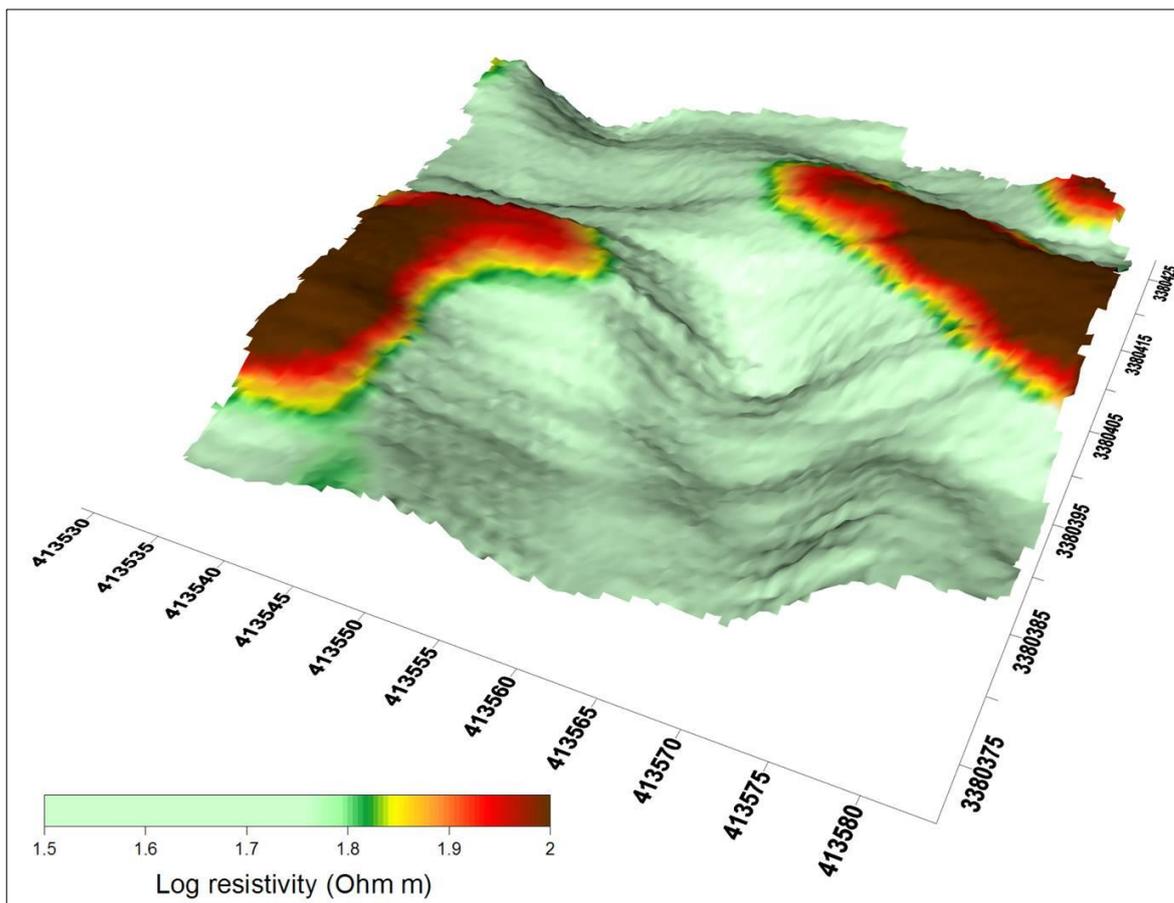


Figura 5.46. Rappresentazione 3D delle anomalie dell'area 2



Figura 5.47. Dettaglio area 4

#### 5.4 Sito archeologico di Umm ar-Rasas (Giordania).

Il sito di Umm ar-Rasas è localizzato a 30 Km a Sud-Est dalla città di Madaba, a Nord dello Wadi Mugib (figura 5.48).

L'indagine archeologica è iniziata nel 1986 sotto la direzione di M. Piccirillo<sup>107</sup> che portò alla luce le chiese di Vescovo Sergio e Santo Stefano ed eseguì alcuni studi sulla torretta dello stilita, localizzata a pochi chilometri dalle chiese (figura 5.49). Mentre per le due chiese la documentazione archeologica è ben attestata<sup>108</sup>, per la torretta dello stilita c'è una forte carenza di documentazione.

All'interno del sito archeologico è stato rinvenuto un campo fortificato (costituito da una cinta muraria caratterizzata da alti e possenti mura provviste di torri e contrafforti) e un quartiere ecclesiastico sviluppatosi ad Nord-Est di quest'ultimo. All'interno del quartiere sono state portate alla luce due chiese mosaicate (Vescovo Sergio e Santo Stefano), un cortile lastricato (successivamente trasformato in chiesa), un battistero, una cappella funeraria localizzati a Sud-Est delle chiese mosaicate e alcune strutture identificabili come abitazioni localizzati ad Est ed Ovest di quest'ultima chiesa.

Nonostante gli scavi effettuati solo una piccola parte delle strutture del sito archeologico sono state portate alla luce.



Figura 5.48. Ubicazione del sito di Umm ar-Rasas su immagine di Google Earth

<sup>107</sup> BUJARD *et al.*, 1988.

<sup>108</sup> PICCIRILLO 1991, PICCIRILLO & ALLIATA, 1994.

Al giorno d'oggi sia le chiese di Santo Stefano e Vescovo Sergio che la torretta dello stilita godono di un cattivo stato di conservazione ed hanno dei problemi statici (le chiese presentano dei cedimenti del mosaico, la torretta risulta inclinata nella parte Est-Ovest).

La ricerca condotta in questo sito ha visto l'applicazione e l'integrazione del rilievo laser scanner e del GPR. Il primo ha avuto l'obiettivo sia di rilevare l'intero complesso ecclesiastico (evidenziando nel dettaglio le deformazioni a cui erano soggetti i mosaici delle chiese di Vescovo Sergio e Santo Stefano) che di calcolare la pendenza della torretta dello stilita. Le prospezioni GPR hanno avuto lo scopo di capire il motivo sia dei cedimenti dei mosaici che dell'inclinazione della torretta.

All'interno del complesso i rilievi laser scanner sono stati effettuati senza l'utilizzo di *target* (per allineare le scansioni sono stati utilizzati punti noti quali murature, pavimento e tettoia) e adoperando due differenti tipi di cavalletti per l'alloggiamento dello strumento. Il primo è quello fornito dalla casa madre che permette di alzare lo strumento di circa 1.50 m dal suolo, il secondo è rappresentato da un'asta telescopica che consente il sollevamento del laser scanner ad un'altezza massima di 6 m (figura 5.50). L'utilizzo di quest'ultimo è dipeso dalla necessità di raggiungere punti elevati (spessore delle murature) non rilevabili con l'altro tipo di cavalletto.



*Figura 5.49. Chiesa di Vescovo Sergio (in alto, sinistra), Chiesa di S. Stefano (in basso, sinistra) e Torretta dello Stilita (destra).*



*Figura 5.50. Asta telescopica utilizzata per l'acquisizione delle scansioni.*

Per creare una documentazione in grado di rispondere pienamente agli scopi di questa ricerca dai modelli tridimensionali sono state estrapolate ortofoto e DEM (*Digital Elevation Model*) delle chiese di Vescovo Sergio e Santo Stefano.

Le ortofoto visibili nelle figure 5.51 e 5.52 sono state ottenute applicando alle mappe di riflettanza il corrispondente valore di RGB. Successivamente utilizzando un *software CAD* è stata realizzata la pianta complessiva del quartiere ecclesiastico visibile in figura 5.53.

Tramite la creazione del DEM (figure 5.54 e 5.55) è stato possibile documentare le zone dove le pavimentazioni presentano cedimenti. Nelle immagini, con le tonalità di rosso vengono evidenziate le parti non interessate dai cedimenti, mentre con le tonalità tendenti al blu quelle che presentano collassi nella pavimentazione.

Il GPR all'interno delle due chiese sopra citate è stato utilizzato indagando l'intera superficie mosaicata tramite profili paralleli stanziati di 0.50 m.

Nelle figure 5.56 e 5.57 vengono riportate le *slice* relative alla profondità di 0.6 – 0.8 m e di 1.9 – 2.1 m.

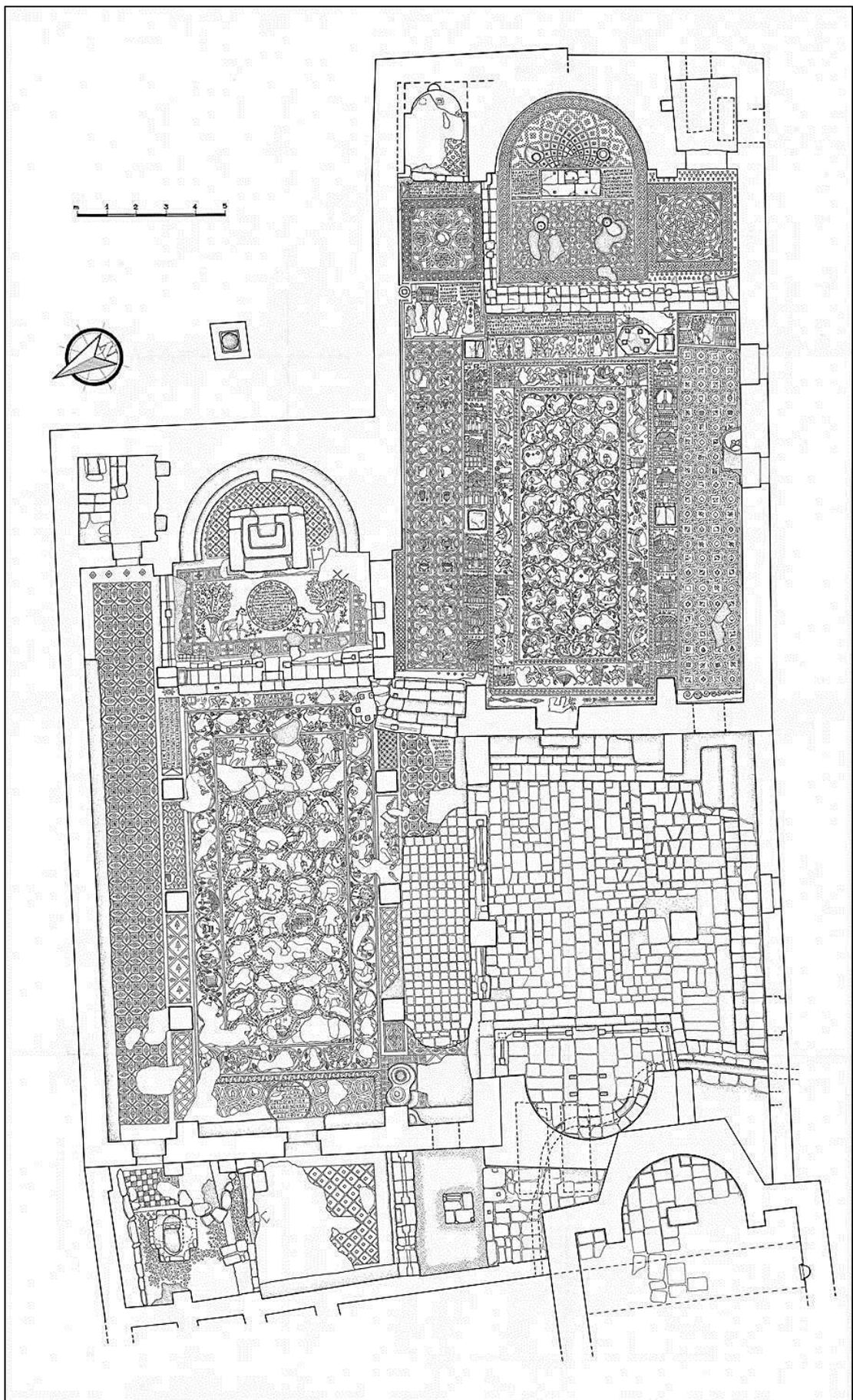
Per quanto riguarda la Chiesa di S. Stefano, nella mappa più superficiale, emergono diverse anomalie perpendicolari alla navata sinistra, un'anomalia longitudinale al centro del corpo mediano della chiesa e un'anomalia nello spazio antistante l'abside (in corrispondenza del bordo destro).



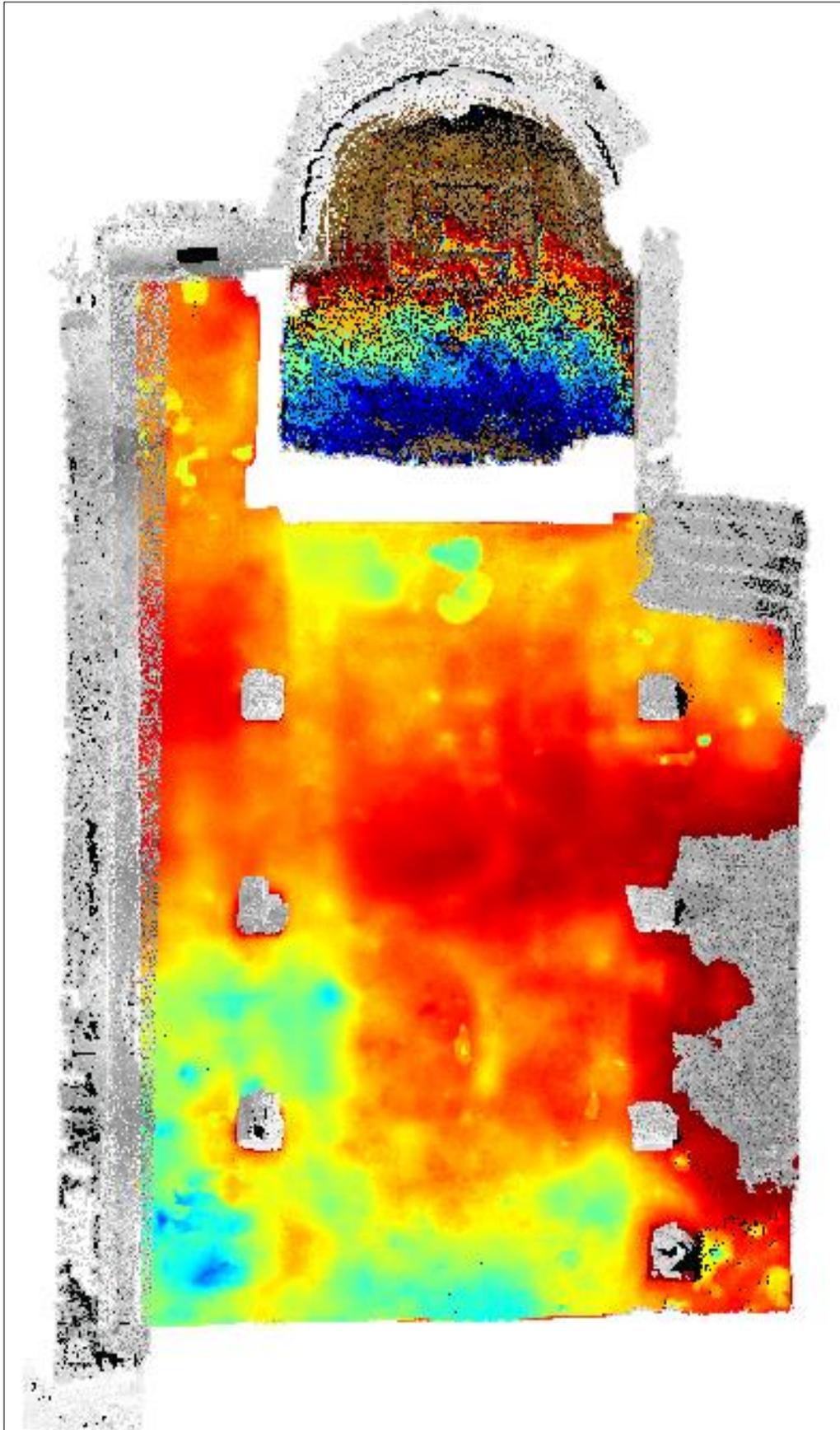
*Figura 5.51. Ortofoto della chiesa Vescovo Sergio.*



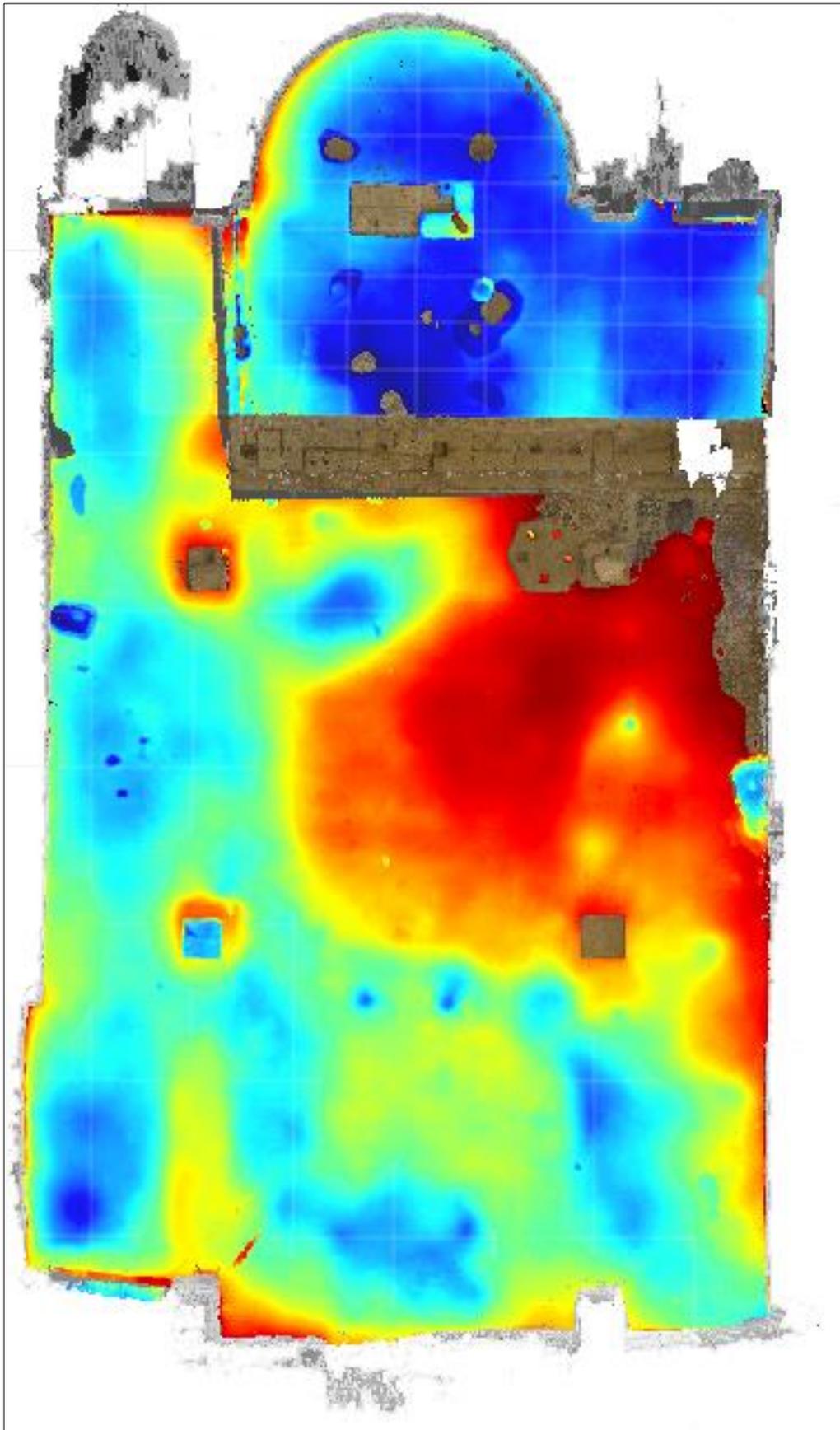
*Figura 5.52. Ortofoto della chiesa Santo Stefano.*



*Figura 5.53. Pianta del quartiere ecclesiastico.*



*Figura 5.54. Digital Elevation Model (DEM) della pavimentazione della Chiesa di Vescovo Sergio.*



*Figura 5.55. Digital Elevation Model (DEM) della pavimentazione della Chiesa di Santo Stefano.*

La presenza di probabili strutture sepolte al di sotto della pavimentazione, precedenti alla fase di costruzione della chiesa, potrebbe aver causato, in una fase di assestamento dei materiali, la deformazione riscontrata dal rilievo laser scanner.

Nella Chiesa di Vescovo Sergio le prospezioni hanno evidenziato, all'ingresso della struttura e alla profondità di 1.9 – 2.1 m, anomalie di forma regolare probabilmente ascrivibili a vuoti e quindi a possibili cisterne interrato, anch'esse appartenenti ad una fase cronologica più antica.

Dal rilievo laser scanner effettuato sulla torretta dello stilita è emerso che il monumento presenta un'inclinazione pari a  $2.244^\circ$  verso Est-Ovest (figura 5.58). L'indagine GPR ha evidenziato la probabile assenza di fondazioni al di sotto del lato pendente, individuate invece, in prossimità degli altri tre lati (figura 5.59). Ciò potrebbe rappresentare la causa del movimento della struttura.

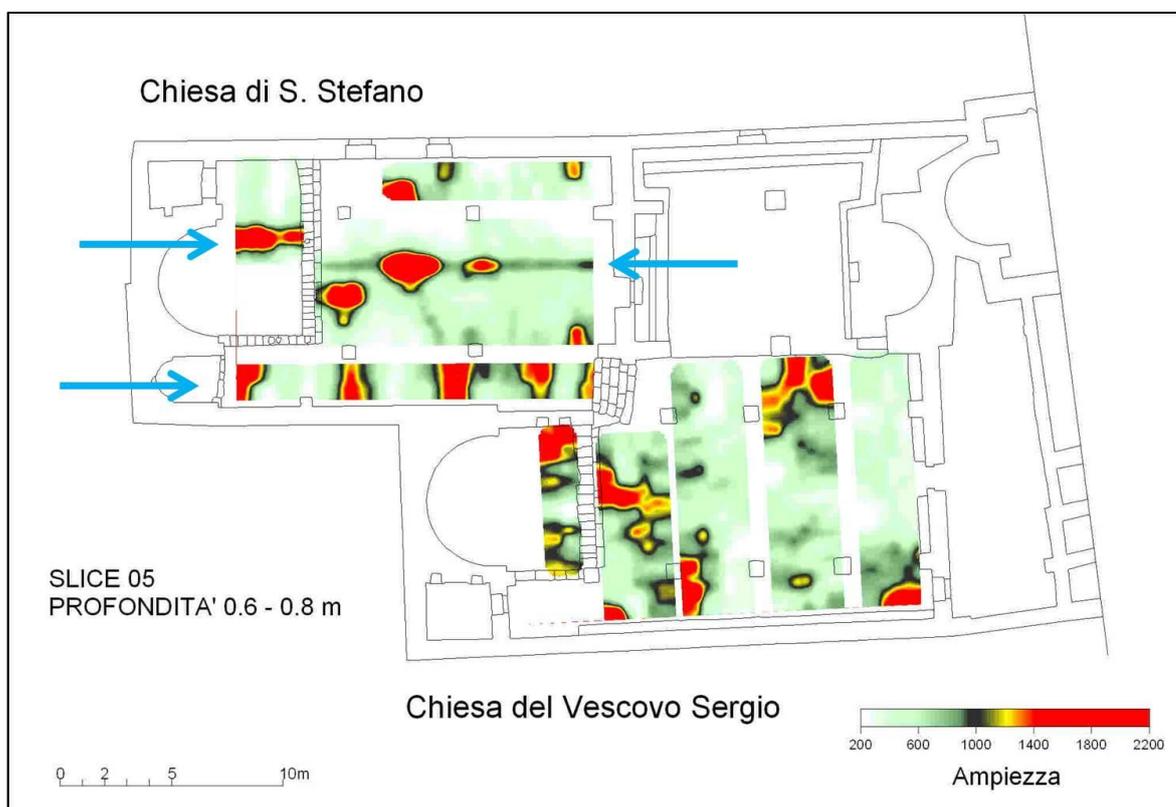


Figura 5.56. Mappa delle ampiezze del segnale radar relativa alla profondità di 0,6 – 0,8 m.

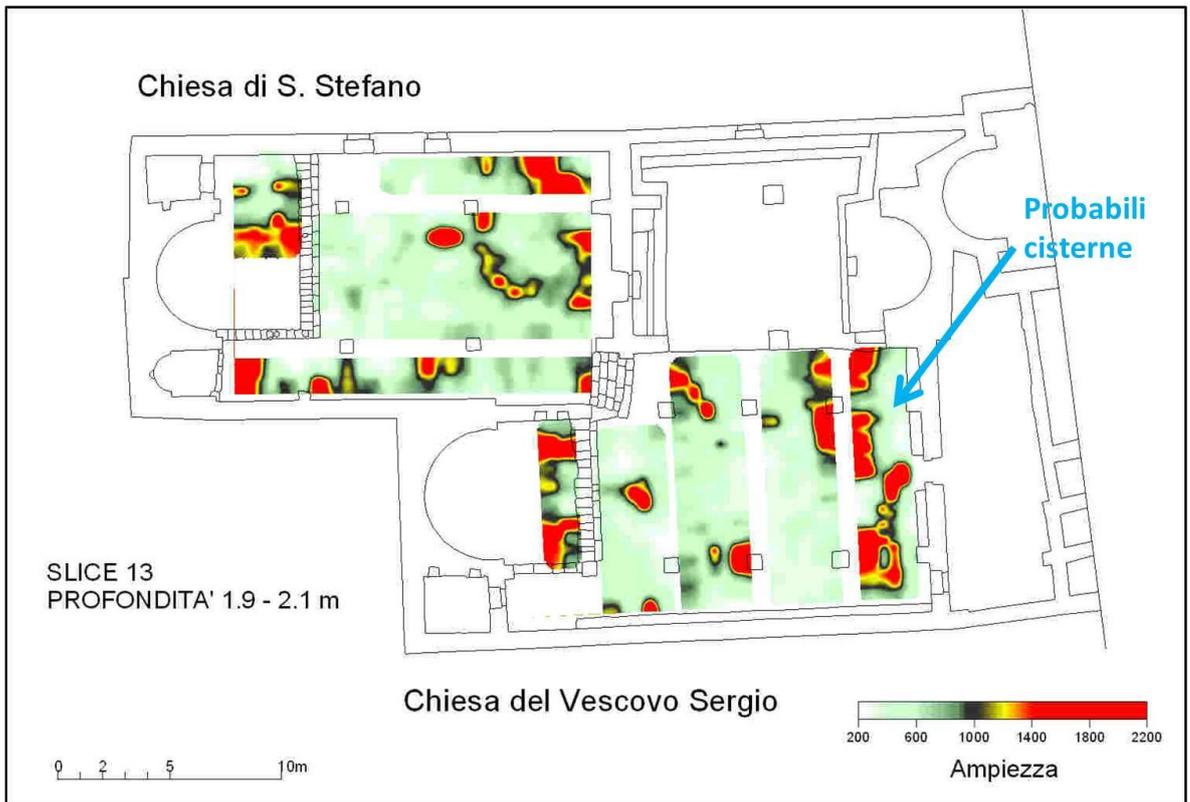


Figura 5.57. Mappa delle ampezze del segnale radar relativa alla profondità di 1.9 – 2.1 m.

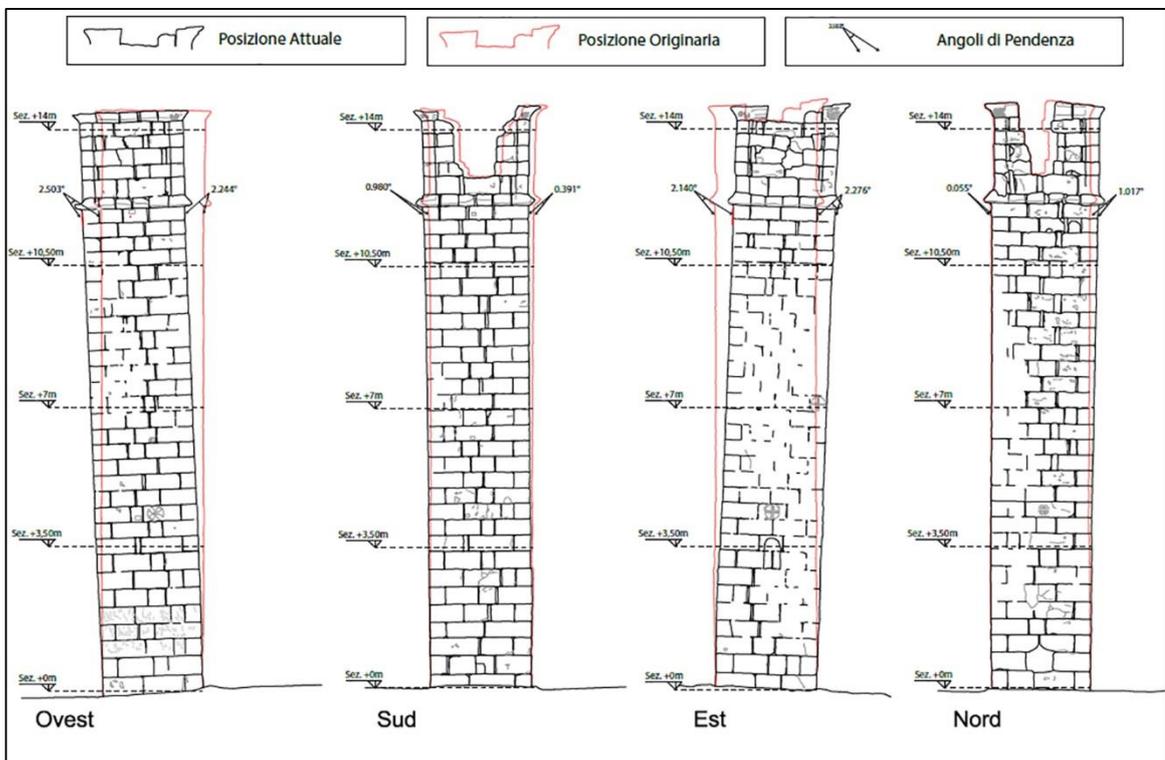


Figura 5.8. Rilievo ottenuto con il laser scanner della torretta dello stilita con calcolo del fuori piombo.

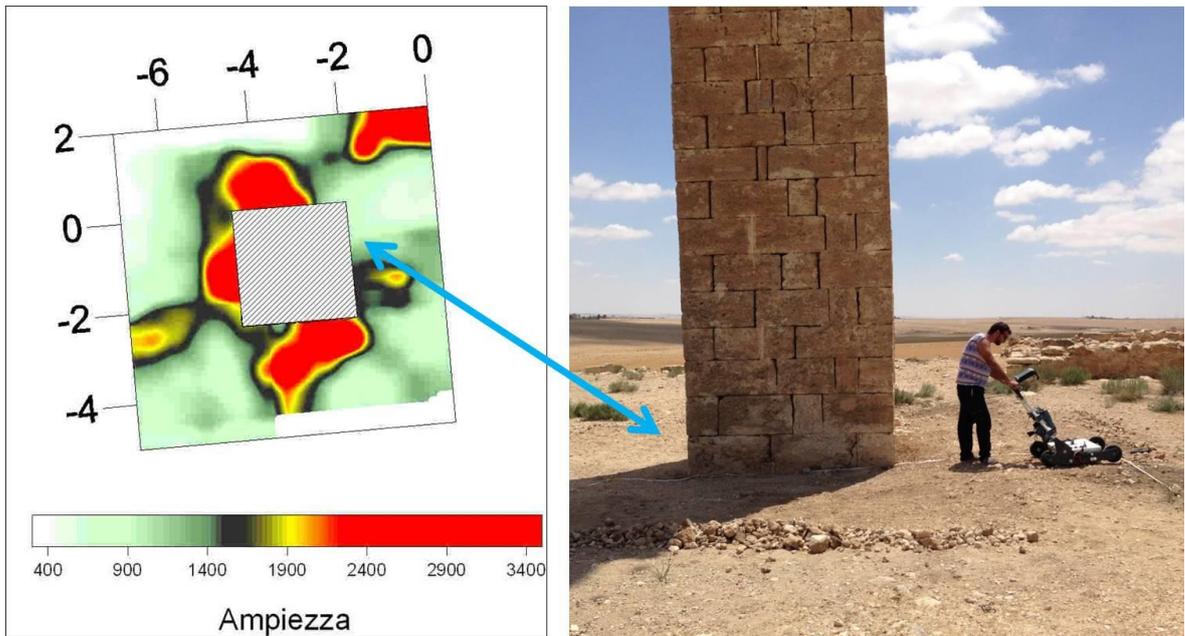


Figura 5.59. Mappa di ampiezza del segnale radar alla profondità di 0.6 – 0.8 m.

### 5.5 Sito archeologico di Gur (Iran).

Le rovine dell'antica città di Ardasir Khwarrah, nota nel Medioevo con il nome di Gur, sono localizzate nella piana di Firuzabad, facente parte della provincia di Far, nella parte Sud dell'Iran (figura 5.60).



Figura 5.60. Ubicazione del sito di Gur su immagine di Google Earth.

I primi studi sull'area, rappresentati da una ricognizione archeologica territoriale e da diversi saggi archeologici, sono iniziati nel 1966 da parte del Servizio Archeologico Iraniano e successivamente, dal 1972, dalla Direzione Centrale dell'Istituto Archeologico Germanico in collaborazione alle due sezioni di Istanbul e Teheran. Lo scopo della ricognizione è stato quello di censire e di mettere in relazione tutte le evidenze archeologiche presenti nel territorio.

La città di Gur rappresenta una fortezza<sup>109</sup> databile al periodo di Ardashir I (prima metà del V secolo). La città, avente pianta circolare di circa 2 Km di diametro (figura 5.61), era difesa da un fossato e da mura di cinta costituite da due cortine concentriche in mattoni crudi.



*Figura 5.61. Immagine satellitare di Google Earth della città di Gur.*

L'area interna era probabilmente divisa da due assi principali e otto secondari in 20 settori ulteriormente suddivisi da anelli concentrici. All'interno delle mura sono riconoscibili i resti strutturali di quattro porte di accesso alla città e di un'alta torretta posta all'incrocio dei due assi viari principali (figura 5.62). Essa caratterizzata da una forma tronco-conica era costruita in pietra e gesso presenta ancora tracce di una scala elicoidale che doveva permettere l'accesso alla sua sommità.

Nonostante non ci siano sovrapposizioni urbanistiche moderne all'interno della città è

<sup>109</sup> HINZ 1969; HUFF 1973; HUFF 1976; ALI SAMI 1976.

ancora tutto sepolto, sono visibili in superficie solo alcuni resti di strutture collassate (figura 5.63).



*Figura 5.62. Torretta localizzata all'incrocio degli assi stradali principali.*



*Figura 5.63. Resti di strutture visibili in superficie.*

Negli ultimi anni a Nord-Ovest della torre è stata portata alla luce un'area funeraria composta da due sarcofagi una piccola superficie pavimentata, una cisterna ed un affresco (figura 5.64).



*Figura 5.64. In alto l'area funeraria, in basso l'affresco con la localizzazione all'interno dell'area.*

Vista la carenza di documentazione archeologica dell'area sopra citata sono stati effettuati rilievi laser scanner e fotogrammetrici aventi come obiettivo finale la produzione di piante, sezioni ed ortofoto ad alta risoluzione.

Il rilievo laser è stato effettuato creando 12 stazioni e per allineare le scansioni sono stati utilizzati *target* sferici, posizionati sfruttando i pali metallici della tettoia di copertura dell'area di scavo (figura 5.65). Conclusa la fase di rilievo con il laser scanner è stata realizzata una campagna fotografica prima dell'area funeraria e successivamente dell'affresco (n. 123 fotografie acquisite).

Il risultato finale di questo rilievo ha permesso di estrapolare piante, sezioni (figura 5.66) e ortofoto (figure 5.67-5.68).



*Figura 5.65. Sinistra acquisizione delle scansioni tramite laser scanner, destra acquisizione delle immagini per la produzione di ortofoto.*

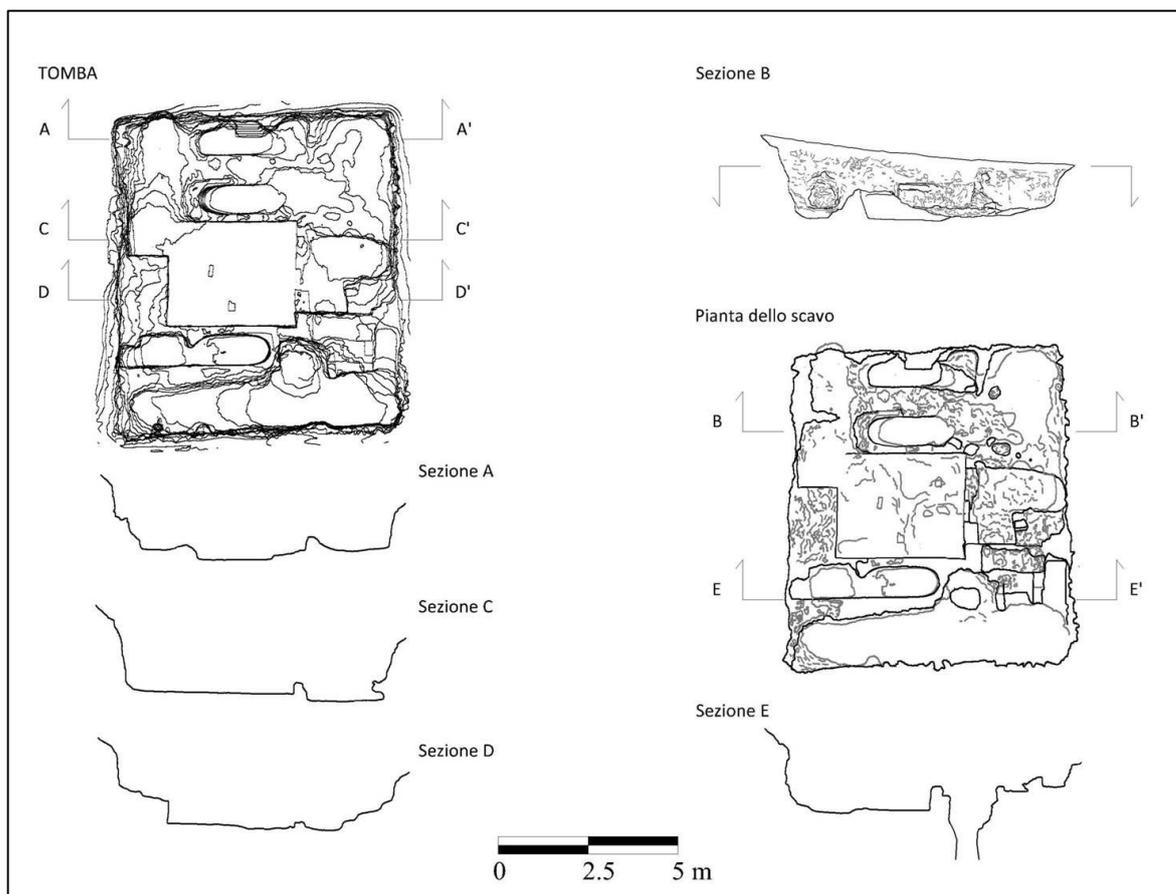


Figura 5.66. Pianta e sezioni dello scavo archeologico.

A pochi Km dal sito di Gur sono stati rilevati due bassorilievi di grandi dimensioni scolpiti in due distinte pareti rocciose. Lo scopo di questo rilievo è stato quello di documentare i bassorilievi (in cattivo stato di conservazione in quanto soggetti alla continua attività degli agenti atmosferici) per comprenderne lo sviluppo delle scene figurate (utile per produrre successivi studi vista la carenza di documentazione archeologica) e per ricrearne una stampa tridimensionale in scala da esporre nel museo archeologico di Firuzabad.

Il bassorilievo 1 (figura 5.69) si presenta in un cattivo stato di conservazione e con molte parti mancanti soprattutto nella parte inferiore. Utilizzato il laser scanner è stata rilevata tutta la parete e sono state acquisite le fotografie per la creazione dell'ortofoto.

Durante la fase di elaborazione per visualizzare meglio i contorni delle sagome è stata estrapolata prima una visualizzazione per *mesh* del bassorilievo (figura 5.70) e successivamente l'ortofoto (figura 5.71).

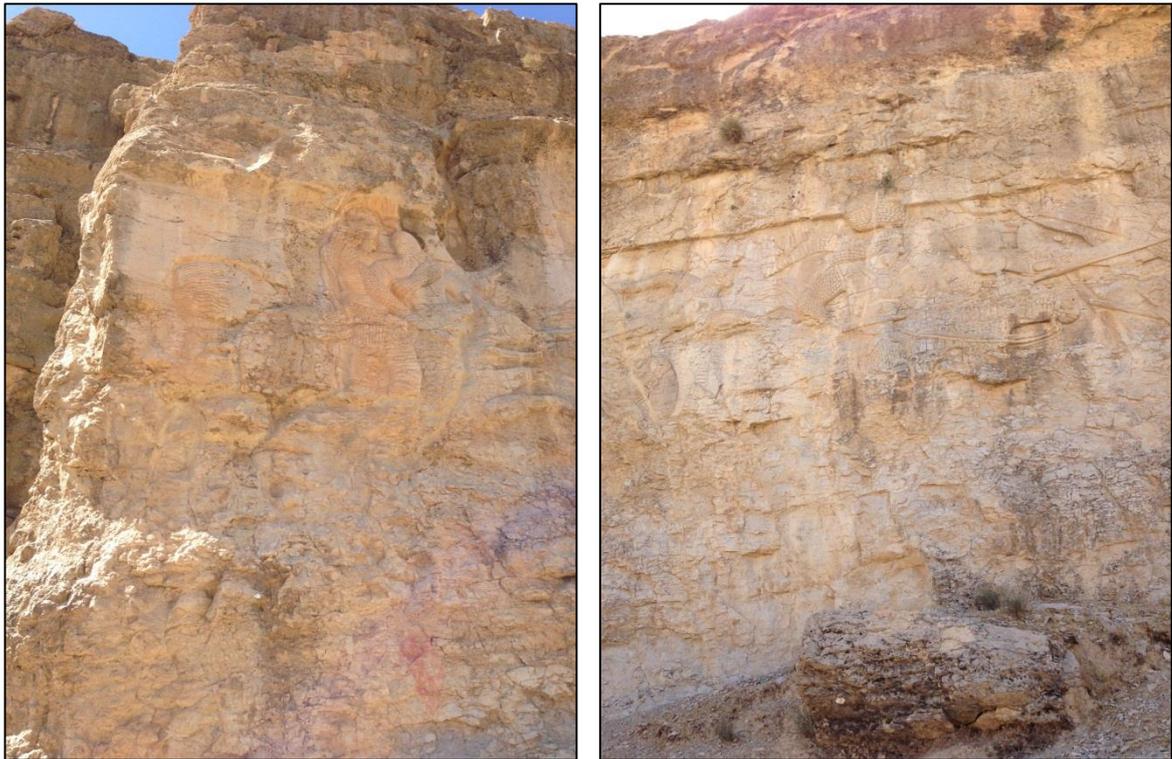
Utilizzando queste due immagini si è proceduto con la caratterizzazione del bassorilievo in ambiente CAD per rendere maggiormente distinguibili i contorni dei personaggi presenti nella scena (figura 5.72).



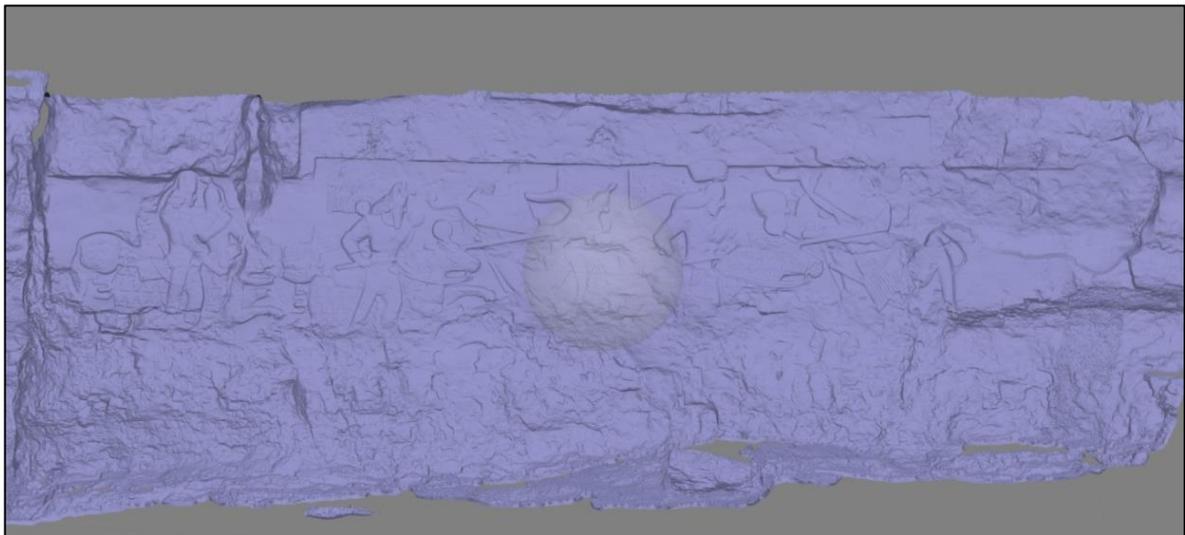
*Figura 5.67. Ortofoto dell'area funeraria.*



*Figura 5.68. Ortofoto dell'affresco.*



*Figura 5.69. Bassorilievo 1.*



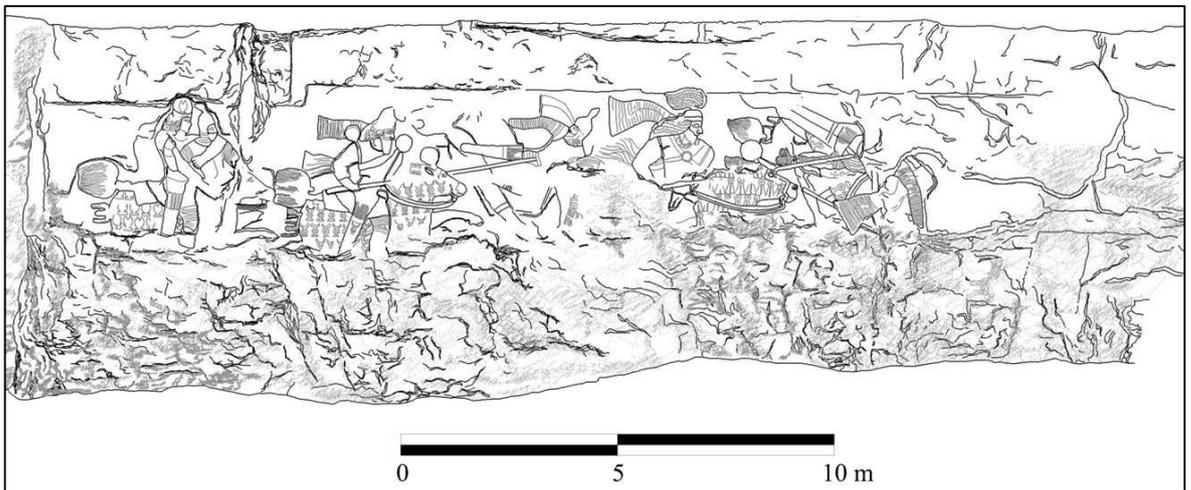
*Figura 5.70. Visualizzazione per mesh del basso rilievo.*

Dalla creazione dell'ortofoto metrica è stato possibile stabilire le dimensioni della scena (larghezza: 24.82 m e altezza 7.06 m circa) e delle figure (circa 3.60 m).

Successivamente per avere un maggior dettaglio dei personaggi sono stati effettuati degli ingrandimenti dell'ortofoto (figure 5.73-5.74) con la relativa caratterizzazione (5.75).



*Figura 5.71. Ortofoto di dettaglio in RGB del basso rilievo.*



*Figura 5.72. Caratterizzazione dell'ortofoto.*



*Figura 5.73. Localizzazione su ortofoto della zona dove è stato effettuato il dettaglio.*



*Figura 5.74. Ortofoto del dettaglio.*



0 0.50 1.0 m

*Figura 5.75. Caratterizzazione del dettaglio.*

Il secondo bassorilievo gode di uno stato di conservazione migliore del precedente. Anche in questo caso è stato integrato il laser scanner con la fotogrammetria. Per rilevare la parete sono state effettuate tre scansioni settando la risoluzione dello strumento in HD (*High Definition*) ottenendo in questo modo una fittissima nuvola di punti (figura 5.76).

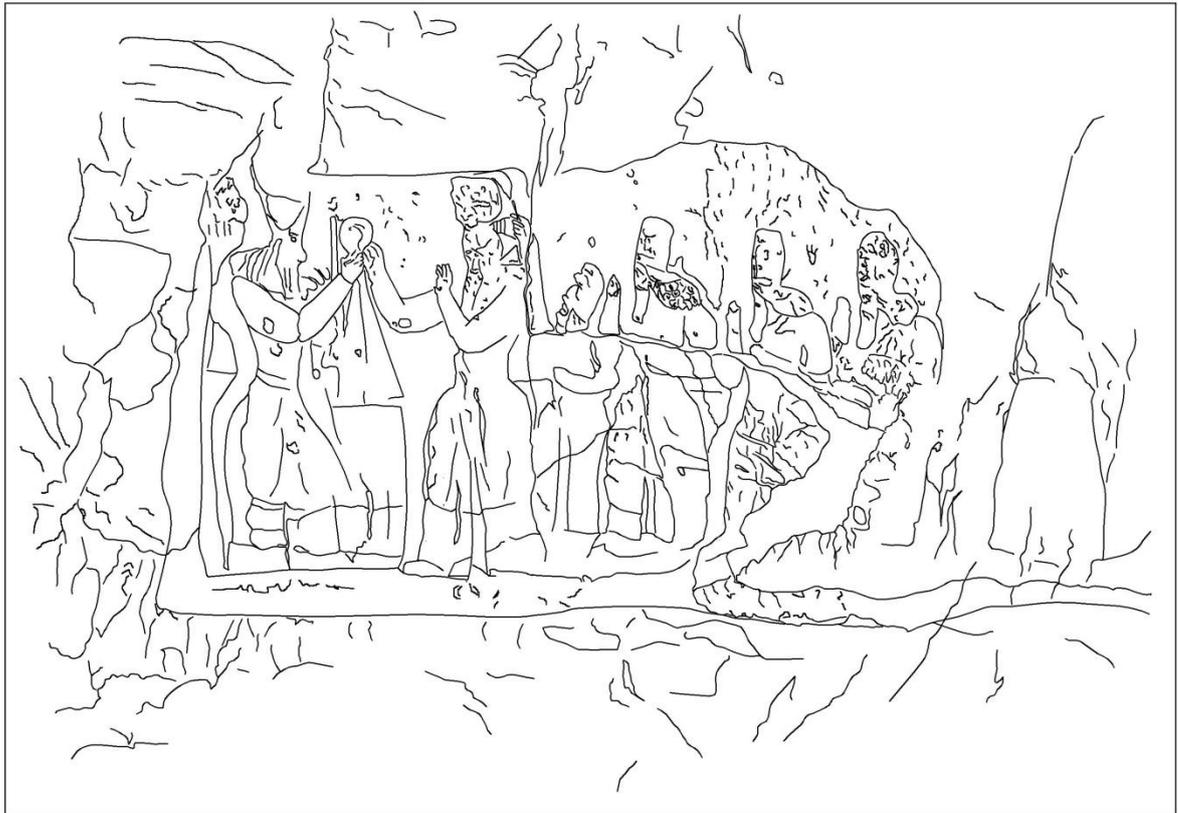


*Figura 5.76. Impostazione della risoluzione (sinistra), acquisizione della scansione (destra).*

La creazione dell'ortofoto metrica (figura 5.77) con la relativa caratterizzazione (figura 5.78), che ha permesso di definire meglio i contorni dei personaggi, ha consentito da un lato di stabilire le dimensioni della scena (larghezza 7.5 m altezza 5 m circa) e delle figure (4 m circa), dall'altro di documentare lo stato di conservazione del bassorilievo (sono visibili delle lesioni che attraversano la scena verticalmente).



*Figura 6.77. Ortofoto bassorilievo 2.*



0 0.50 1.0 m

*Figura 6.78. Caratterizzazione bassorilievo.*

## **CONCLUSIONI**

L'insediamento di Egnazia rappresenta un palinsesto pluristratificato caratterizzato da una lunga continuità di vita che, partendo dal XVI secolo a.C. e passando sotto la dominazione romana, perdura fino al XIII secolo.

Numerosi sono stati gli scavi archeologici che nel corso degli anni hanno portato alla luce solo una piccola parte dell'antica città (necropoli occidentale e meridionale, basilica civile, piazza porticata, il cosiddetto "anfiteatro", quartieri residenziali e produttivi, criptoportico, acropoli, sacello delle divinità orientali, le terme, la basilica meridionale ed episcopale) ed hanno aiutato a chiarire il modello e le varie fasi insediative del sito. Nonostante queste ricerche, al giorno d'oggi risulta ancora poco chiara la struttura urbanistica interna ed esterna del sito.

In questo lavoro tramite lo studio della cartografia storica e moderna, l'analisi di fotografie aeree ed immagini multispettrali, multi temporali e multi scalari (MIVIS, QuickBird, Google Earth™) e la realizzazione di indagini geofisiche (metodo ad induzione elettromagnetica e GPR) si è cercato di ricostruire, in modo preciso e puntuale, l'articolata viabilità del sito e di determinare in maniera predittiva e non invasiva la presenza di strutture archeologiche ancora sepolte nel sottosuolo attraverso la valutazione globale della convergenza di più parametri fisici che descrivono la stessa situazione.

L'approccio multi metodologico e multi scala ha consentito di acquisire informazioni che hanno aggiunto nuovi elementi ed arricchito lo stato delle conoscenze dell'impianto urbano del sito. La collaborazione e il continuo flusso di informazioni tra ricercatori di discipline differenti ha rappresentato un punto fondamentale per uno scambio costante di idee e risultati. In questo lavoro geofisici e archeologi hanno operato in completa sinergia calibrando le procedure di intervento tenendo in considerazione tutti i bisogni della ricerca e raggiungendo la definizione della strategia ottimale da perseguire per lo studio dell'area archeologica. Le investigazioni archeologiche, realizzate dall'Università di Bari, hanno fornito dati molto importanti e la loro sovrapposizione con i risultati delle indagini geofisiche e dati da remoto può essere considerata una conferma della validità della metodologia proposta nella localizzazione di *target* sepolti e del potere risolutivo di questo approccio.

Il rilievo tramite laser scanner del criptoportico ha consentito di elaborare un modello tridimensionale che ha permesso, tramite l'estrazione di piante, sezioni e sezioni prospetto, di redigere una planimetria della struttura e di documentarne lo stato di conservazione

analizzando le deformazioni e le lesioni a cui sono soggette le murature. Il costante monitoraggio del monumento, tramite futuri rilievi, potrà evidenziare, nel caso in cui persista, l'aumento e l'intensità delle deformazioni e delle lesioni nel tempo, promuovendo future attività di restauro e messa in sicurezza della struttura.

Inoltre, grazie alla collaborazione tra differenti istituti di ricerca nazionali ed internazionali, questo approccio multi metodologico è stato applicato in diversi siti archeologici localizzati in territorio internazionale (Doclea (Montenegro), Ighram Aousser (Marocco), Tell El Maskhuta (Egitto), Umm ar-Rasas (Giordania) e Gur (Iran)).

In base alle caratteristiche dell'area oggetto di studio e agli obiettivi della ricerca sono state scelte ed integrate le metodologie che potessero fornire i migliori risultati per la risoluzione di specifiche problematiche. L'integrazione di più metodi ha portato ad una interpretazione più accurata e precisa dei modelli elaborati a partire dai dati acquisiti.

Per quanto riguarda le indagini geofisiche la scelta della metodologia da utilizzare è dipesa principalmente dalla natura geologica e topografica del suolo, dall'estensione del territorio da investigare e dal tempo a disposizione per effettuare l'indagine.

I risultati ottenuti per mezzo di indagini geofisiche e dati da remoto nei siti di Doclea, Ighram Aousser e Tell El Maskhuta hanno portato all'identificazione di strutture archeologiche sepolte, aggiungendo nuovi elementi sulla struttura insediativa delle aree oggetto di studio. Successive verifiche stratigrafiche potranno essere realizzate in maniera diretta nelle zone caratterizzate da un alto potenziale archeologico, consentendo in questo modo di compiere scavi archeologici mirati con un notevole risparmio di tempo, denaro e un alta probabilità di successo.

Nel sito di Umm ar-Rasas l'integrazione tra rilievi laser scanner e GPR hanno avuto l'obiettivo di documentare in maniera precisa (tramite la creazione di DEM e prospetti) le deformazioni a cui erano soggetti i mosaici delle chiese di Vescovo Sergio e Santo Stefano e il grado di inclinazione della torretta dello stilita. Grazie al confronto effettuato con i risultati ottenuti dal rilievo tridimensionale e quelli GPR è emerso che, all'interno delle chiese, nelle zone di maggior cedimento dei mosaici, erano presenti strutture archeologiche precedenti alla fase di costruzione del complesso ecclesiastico. Per la torretta dello stilita, invece, dall'integrazione dei risultati è emerso che essa presenta un'inclinazione pari a  $2,244^\circ$  verso Est-Ovest dipesa dall'assenza di fondazioni, individuate, invece, negli altri tre lati.

Nel sito di Gur i rilievi tridimensionali sono stati effettuati per documentare un'area funeraria e due bassorilievi di grandi dimensioni scolpiti in una parete rocciosa. Per quanto riguarda i due bassorilievi la ricerca ha permesso di comprendere lo sviluppo delle scene

figurate e di verificare le dimensioni dei diversi personaggi. In questo modo potranno essere compiuti successivi studi di carattere scientifico e iconografico che, basandosi sulle dimensioni dei personaggi e sul ruolo che occupano all'interno della scena, aiutino a ricostruire la storia del territorio.

## **RINGRAZIAMENTI**

*Desidero esprimere la mia gratitudine a tutte le persone che in questi tre anni mi hanno sostenuto da un punto di vista professionale e morale ad affrontare questo bellissimo percorso.*

*Grazie al Prof. Agostino Catalano che con la sua simpatia e professionalità ha sempre creduto in me contribuendo alla mia crescita professionale.*

*Grazie al Prof. Paolo Mauriello direttore dell'ITABC per la disponibilità e la fiducia dimostratami sempre.*

*Grazie al Dott. Roberto Gabrielli per avermi accolto nel suo gruppo di lavoro facendomi sentire a casa e mettendo a disposizione, con estrema professionalità e saggezza, le sue competenze che hanno contribuito molto alla mia formazione.*

*Grazie alla Dott.ssa Marilena Cozzolino, compagna di molti viaggi a avventure, che con grande professionalità, integrità e passione mi ha sempre spronato e incoraggiato a combattere la superficialità, coinvolgendomi in molti progetti e insegnandomi l'importanza di essere autonomo nel mondo del lavoro.*

*Grazie al Dott. Pasquale Merola senza il quale molti aspetti della ricerca avrebbero richiesto maggior tempo di realizzazione e sicuramente non avrebbero avuto lo stesso risultato.*

*Grazie alle Dott.sse Lorenza Manfredi, Giuseppina Capriotti e Lucia Alberti, donne di cui nutro profonda stima e rispetto, per avermi coinvolto nei loro bellissimi progetti.*

*Grazie alla mia famiglia che mi ha sempre spronato ed incoraggiato a guardare oltre.*

*Grazie a Giulia che in questi ultimi mesi mi è stata sempre vicino comprendendo i miei stati d'animo e dandomi la forza per non mollare mai.*

*Grazie alle mie nipotine Elena e Nicole che con la loro semplicità e il loro sorriso mi*

*hanno fatto star bene anche nei momenti più difficili.*

## **BIBLIOGRAFIA**

- ALI SAMI 1976. *Sahr-e bastani-ye Gur; Firuzabad-e Kamini*. In Honar va Mardom, 169-170.
- AMATO U., CAVALLI R. M., PALOMBO A., PIGNATTI S., SANTINI F. 2009. *Experimental Approach to the Selection of the Components in the Minimum Noise Fraction*. Riv. IEE Transaction on Geoscience Remote Sensing, vol. 47 (1), 153-160. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2008.2002953>.
- ANDREASSI G. & COCCHIARO A. 1987. *Necropoli d'Egnazia*, Fasano.
- ANNAN A.P., DAVIS I. L. 1977. *Impulse radar applied to ice thickness measurements and freshwater bathymetry*. Geological Survey of Canada, report of Activities paper 77-1B, 117-124.
- BANNARI A., MORIN D., BONIN F. 1995. *A review of vegetation Indices*. In Remote Sensing, 13, 95-120.
- BIANCHINI M. 2008. *Manuale di rilievo e di documentazione digitale in Archeologia*. Roma. ISBN 978-88-548-1826-2
- BITTELLI M. 2009. *Georadar*. In Groma 2. In profondità senza scavare, Ed. E. GIORGI, Bologna, 251-272.
- BOLZAN G. L., BRIVIO P. A., GIARDINO C., LECHI G. M., MORIONDO S., OLIVIERI S., TONELLI A. M. 2000. *Appunti e spunti di Telerilevamento. Elementi di Telerilevamento per gli insegnanti delle scuole medie e i responsabili CREA della Regione Lombardia*, Milano.
- BOSCHI F. 2009. *Introduzione alla geofisica per l'archeologia*. In Groma 2. In profondità senza scavare, Ed. E. GIORGI, Bologna, 291-315.
- BRIVIO P. A., LECHI G. M., ZILIOLI E. 1992. *Il telerilevamento da aereo e da satellite*, Sassari.
- BRIVIO P. A., LECHI G. M., ZILIOLI E. 2006. *Principi e metodi di telerilevamento*, Città Studi Edizioni, Novara.
- BUJARD M., PICCIRILLO M., POIATTI-HALDIMANN M. 1992. *Les églises géminées d'Umm er-Rasas. Fouilles de la mission archéologique Suisse (Fondation Max van Berchem)*. In AAJ, XXXVI, 291-306.
- CAMMARANO F., MAURIELLO P., PATELLA D. AND PIRO S. 1997. *Integrated geophysical methods for archaeological prospecting*. In Volcanism and archaeology in Mediterranean sea, 7-34.

- CAMPANA S. 2009. *Archeologia dei Paesaggi e Remote Sensing*. In Groma 2. In profondità senza scavare, Bologna, 137-155.
- CAMPANA S., PRANZINI E. 2001. *Telerilevamento in Archeologia*. In S. CAMPANA, M. FORTE (a cura di), *Remote Sensing in Archaeology*, atti dell'XI International School Archaeology, (Certosa di Pontignano, 6-11 Dicembre 1999), Firenze, 17-62.
- CAMPANA S., PRANZINI E. 2003. *Il telerilevamento in archeologia*, 1-27 [www.academia.edu](http://www.academia.edu).
- CAMPBELL J. B. 1996. *Introduction to Remote Sensing, 2d*, New York.
- CAPRIOTTI G., COZZOLINO M., GENTILE V, 2016. *Tell El-Maskhuta Project. Report of the II Season*, <http://egitto.isma.cnr.it/index.php?en/159/tell-el-maskhuta-project>.
- CAPRIOTTI VITTOZZI G., ANGELINI A. 2015. *Tell el-Maskhuta Project. Multidisciplinary Egyptological Mission of the National Research Council of Italy (CNR)*. In Proceedings of the International Congress of Egyptologists XI, Florence 23-30 August 2015.
- CASSANO R. & FIORIELLO C. S. 2009. *Percorsi di storia. Itinerari informativi nel territorio di Fasano*, Progetto POR FOVeA, Bari.
- CASSANO R. 2007. *Egnazia al tempo dei vescovi*. In R. M. BONACASA CARRA (a cura di), *La cristianizzazione in Italia fra Tardoantico e Altomedioevo: aspetti e problemi*, Atti del IX Convegno Nazionale di Archeologia Cristiana (Agrigento, 20-25 novembre 2004), Palermo, 1259-1282.
- CASSANO R. 2010. *Egnazia Tardoantica: nuove indagini e prospettive di ricerca*. In G. VOLPE, R. GIULIANI (a cura di), *Paesaggi e insediamenti urbani in Italia meridionale fra Tardoantico e Altomedioevo*, Atti del II Seminario sul Tardoantico e l'Altomedioevo in Italia meridionale (Foggia-Monte Sant'Angelo 27-28 maggio 2006), Bari, 91-106.
- CASSANO R., DI GRAZIA V., FIORIELLO C.S., PEDONE A., TEDESCHI L. 2004. *Ricerche archeologiche nell'area del 'foro' di Egnazia. Scavi 2001-2003: relazione preliminare*. In *Epigrafia e territorio. Politica e società. Temi di antichità romane*. serie a cura di M. PANI VII, Bari, 7-98.
- CASSANO R., FIORIELLO C. S., MANGIATORDI A., MASTROCINQUE G. 2007. *Ricerche archeologiche nella città di Egnazia. Scavi 2004-2006: relazione preliminare*, in *Epigrafia e territorio. Politica e società. Temi di antichità romane*. Serie a cura di M. PANI, VIII, Bari 2007, 7-136.
- CAVALLI R. M., COLOSI F., PIGNATTI S., POSCOLIERI M., BIANCHI R. 2000. *Ricostruzione dell'impianto viario dell'antica Selinunte attraverso il*

- telerilevamento iperspettrale*. In Rivista Italiana di Telerilevamento, n. 20\21.
- CAVALLI R. M., PIGNATTI S. 2001. *Il telerilevamento iperspettrale da aereo per lo studio dei beni archeologici: applicazione dei dati iperspettrali MIVIS*. In Remote Sensing in Archaeology, di S. CAMPANA, M. FORTE (a cura di) XI ciclo di Lezioni sulla Ricerca Applicata (Certosa di Pontignano, Siena, 6-11 novembre 1999), Quaderni del Dipartimento di Archeologia e Storia delle Arti- Sezione Archeologia, n. 51-52, Firenze 2001, 221-232.
- CAVALLI R.M., COLOSI F., PALOMBO A., PIGNATTI S., POSCOLIERI M. 2007. *Remote hyperspectral imagery as a support to archaeological prospection*. In Journal of Cultural Heritage, vol. 8, Issue 3,
- CERAUDO G. 2003. *Insedimenti Italici*. In M. GUAITOLI (a cura di) Lo sguardo di Icaro. Le collezioni dell'Aerofototeca Nazionale per la conoscenza del territorio, Campisano Editore, 306.
- CERAUDO G. 2008. Via Gellia: una strada fantasma in Puglia centrale. In studi di antichità 12, 2008, 187-203.
- CERAUDO G., BOSCHI F. 2009. *Fotografia aerea per l'archeologia*. In Groma 2. In profondità senza scavare, ED. E. GIORGI, Bologna, 171 – 186.
- CINQUEPALMI A. 2000. *Viaggio nell'Età del Bronzo, Egnazia tra Coppa Nevigata e Punta le Terrare*, Velenzano.
- CLÉDAT J. 1921. *Notes sur l'isthme de Suez (XII-XV)*. In Bulletin de l'Institut Français d'archéologie orientale 18, 167-197.
- COLWELL R. N. 1983. *Manual of remote sensing*. Second edition American Society of Photogrammetry.
- COMPARE V., COZZOLINO M., DI GIOVANNI E., MAURIELLO P. 2009. Tomografie geoelettriche nel Parco Archeologico di Norba. Atlante tematico di topografia antica. Rivista di Studi di Topografia Antica. L'Herma di Bretschneider, Atta 19, 193-198.
- CONYERS L. 2004a. *Ground-penetrating Radar for Archaeology*. AltaMira Press, Walnut Creek, California.
- CONYERS L. AND GOODMAN D. 1997. *Ground-Penetrating Radar: An Introduction for Archaeologists*. AltaMira, Walnut Creek, California.
- COZZOLINO M. 2009. *Sviluppo di una metodologia geofisica integrata per I Beni Culturali*, tesi di dottorato in Ambiente e Territorio, XXI ciclo, Università degli Studi del Molise.

- COZZOLINO M., FESTUCCIA S., GENTILE V., MEROLA P., REPOLA L. 2016. *Il futuro della ricerca in Marocco. Le nuove tecnologie applicate alla Fortezza di Ighram Aousser*. In FORMA VRBIS, Anno XXi, n.7. Luglio/Agosto 2016, 37-43.
- DABAS M., TABBAGH A. 2000. *Thermal Prospecting, Archaeological Method and Theory: An Encyclopedia*, New York.
- DE GROOT-HEDLIN C., CONSTABLE S. 1990. *Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data*. In Geophysics, 55, 1613-1624.
- DESSENA M. A., MELIS M. T. 2006. *Telerilevamento applicato*, Quartu S.E. (CA).
- EUSTACHE D. 1955: *El-Basra, capitale idrissite et son port*. In *Hespèris*, 42.
- FESTUCCIA S. 2016. *The fortress of Ighram Aousser: preliminary analysis of the wall structure*. In L.I. MANFREDI, S. FESTUCCIA (a cura di) *AOUAM I. Rapport préliminaire de la première campagne de prospection et de fouille dans la zone minière du Jebel Aouam*, Bologna, 45-56.
- FINZI E., PIRO S. 1991. *Metodo per impulsi elettromagnetici, Georadar*. In Quaderni dell'Istituto per le Tecnologie Applicate ai Beni Culturali – CNR – Roma 1/90, 53-70.
- FOWLER M. J. F. 1995. *Detection of archaeological features on satellite imagery*. In AARGnews 10.
- GARZELLI F., NENCINI L., ALPARONE B., AIAZZI S., BARONTI. 2004. *Pansharpening of multispectral image: A critical review and comparison*. In Proc. IGARSS, 1, 81-84.
- GIRELLI V., A. 2006. *Tecniche digitali per il rilievo, la modellazione tridimensionale e la rappresentazione nel campo dei beni culturali, tesi di dottorato in scienze geodetiche e topografiche*, XIX ciclo, Alma Mater Studiorum–Università di Bologna.
- GOMARASCA M. A. 2007. *Elementi di Geomatica*. Milano. ISBN 88-900943-7-0.44136
- GONG DAO-YI, SHI PEI-JUN 2003. *Northern hemispheric NDVI variations associated with large-scale climate indices in spring*. In International Journal of Remote Sensing, 24, 2559-2566.
- GONG P. 2003. *Image processing from human settlements*, in the volume of Remote Sensing of Human Settlements of the Manual of Remote Sensing, 3th Edition, Chief Editor, Maryland.
- GOODMAN D. 1994. *Ground-Penetrating Radar simulation in engineering and archaeology*. In Geophysics, vol.59, 224-232.

- GOWARD S. N., MARKHAN B., DYE D. G., DULANEY W., YANG J. 1991. *Normalized difference vegetation index measurement from the Advanced Very High Resolution Radiometer*. In *Remote Sensing of Environment* 35, 257-277.
- GRANT F. S. AND WEST G. F. 1965. *Interpretation theory in applied geophysics*. McGraw-Hill.
- GREEN A. A., BERMAN M., SWITZER P., CRAIG M. D. 1988. *A Transformation for Ordering Multispectral Data in Terms of Image Quality with Implication for Noise Removal*. *Riv. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 26 (1), 65-74. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/36.3001>.
- HINZ W. 1969. *Die Felsreliefs Ardashir I*. In *Altiranische Funde und Forschungen*, Berlino, 115-122.
- HOLLADAY J. S. 1982. *Cities of the Delta III. Tell el-Maskhuta, Preliminary Report on the Wadi Tumilat Project 1978-1979*, Malibu.
- HUFF D. 1973. *Archaeological Survey in the Area of Firuzabad, Fars*. In *Proceedings of the 2nd Annual Symposium on Archaeological Research in Iran*, Teheran, 155-179.
- HUFF D. 1976. *Survey and Excavation in Qala-yé Dokhtar, Firuzabad. Archaeological Research and Preparation before the Restoration*. In *Proceedings of the 4th Annual Symposium on Archaeological Research in Iran*, Teheran, 391-403.
- JENSEN J. R. 1996. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*, Englewood Cliffs.
- KASSER M. & EGELS Y. 2002. *Digital photogrammetry*, London, ISBN: 0-203-30595-7.
- KELONG T., YUQING W., LIN Y., RIPING Z., WEI C., YAOLAO M. 2008. *A new archaeological Remote Sensing technology*. In *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37, B7, pp. 221-224.
- LECHI G. 2004. *Dispense del Corso di Telerilevamento, DIIAR*. Facoltà di Ingegneria, Politecnico di Milano.
- LEE J., WOODYATT A. S., BERMAN M. 1990. *Enhancement of high spectral resolution remote-sensing data by noise-adjusted principal components transform*. *Riv. IEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 28 (3), 295-304. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/36.54356>.
- LILLESAND T. M., KIEFER R. W. 2000. *Remote Sensing and Image Interpretation*, 4th Edition, New York.
- LININGTON R. E. 1966. *Test use of a gravimeter on Etruscan chamber tombs at Cerveteri*. In *Prospezioni Archeologiche* vol.1, 37-41.

- LOKE H. M. 2004. *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys*. <http://www.geoelectrical.com>.
- MANFREDI L. I & FESTUCCIA S. 2016. *AOUAM I. Rapport préliminaire de la première campagne de prospection et de fouille dans la zone minière du Jebel Aouam*, Bologna.
- MANFREDI L. I. 2016. Progetto Aouam (Tighza, Khénifra): dallo scavo al parco archeominerario. In *FORMA VRBIS*, Anno XXI, n.7. Luglio/Agosto 2016, 27-32.
- MARESCOT L. 2008. *Imagerie électrique pour géologues. Acquisition, traitement, interprétation*. <http://www.tomoquest.com>.
- MASTROCINQUE G. 2014. *Spazio residenziale e spazio produttivo ad Egnazia in età tardoantica*. In P. PENSABENE, C. SFAMENI (a cura di). *La Villa restaurata e i nuovi studi sull'edilizia residenziale tardoantica*, Atti del convegno internazionale del CISEM, (Piazza Armerina, 7-10 novembre 2012), 415-426.
- MAURIELLO P. PATELLA D. 1999d. *Global probability tomography for natural source electromagnetic induction*. *Three-Dimensional Electromagnetics*, Salt Lake City (Utah), Oct. 99, 174-177.
- MAURIELLO P. PATELLA D. 2009. *A data-adaptive probability-based fast ERT inversion method*. *Progress in Electromagnetics research M*, vol.97, 275-290, ISS:1937-8726, doi:10.2528/PIER09092307.
- MAURIELLO P., PATELLA D. 1999c. *Principles of probability tomography for natural source electromagnetic induction fields*. *Geophysics*, vol.64, No.5, 1043-1417.
- MAXWELL J. C. 1873. *Treatise on electricity and magnetism*. Oxford.
- MEDRI M. 2003. *Manuale di rilievo archeologico*.
- MEROLA P. 2012. *Telerilevamento applicato alla ricerca archeologica: "Regina viarum": i dati da remoto per la ricostruzione della via Appia in Campania*, tesi di dottorato in Metodologie Conoscitive per la Conservazione e la Valorizzazione dei Beni Culturali, XXIV ciclo, Seconda Università degli Studi di Napoli.
- MUNRO J. A. R., ANDERSON W. C. F. AND HAVERFIELD F. 1896. *On the Roman town of Doclea, in Montenegro*. In *Archaeologia*, London, 33-92.
- MUSSET A. E., KHAN M. A. 2003. *Metodi elettromagnetici*. In *Esplorazione del sottosuolo una introduzione alla geofisica applicata*, Bologna, 195-216.
- NAVILLE E. 1885. *The Store-City of Pithom and the Route of the Exodus*, London.
- ORLANDO P., VILLA B. 2011. *Remote sensing applications in archaeology*. In *Archeologia e Calcolatori* 22, 147-168.
- PARCAK S. H. 2009. *Satellite Remote Sensing for Archaeology*, London.

- PICCARRETA F., CERAUDO G. 2000. *Manuale di aerofotografia archeologica. Metodologie, tecniche e applicazioni*, Bari.
- PICCIRILLO M. 1991. Les églises paléochrétiennes d'Umm er-Rasas (Jordanie). Cinq campagnes de fouilles. In CRAI, 273-294.
- PICCIRILLO M., ALLIATA E. 1994. *Umm al – Rasas – Mayfa'ah, I. Gli scavi del complesso di Santo Stefano* (Studium Biblicum Franciscanum, Collectio Maior, 28), Gerusalemme.
- PIDLISECKY A., HABER E., AND KNIGHT R. 2007. *RESINVM3D: A 3D resistivity inversion package*. In Geophysics, vol.72, No.2, 10.1190/1.2402499
- ROWINSKY P. 1890. *Raskopki drevnei Doklei*. In Zurnal narodnago prosvesteniya.
- SGRENZAROLI M., VASSENA G. P. M. 2007. *Tecniche di rilevamento tridimensionale tramite laser scanner. Volume 1-Introduzione generale*, Brescia, ISBN: 978-88-89720-73-8.
- SHENNAN I., DONOGHUE D.N.M. 1992. *Remote Sensing in Archaeological Research*. In Proceedings of the British Academy, 77, 223-232.
- STICOTTI P. 1913. *Die romische Stadt Doclea in Montenegro, Schriften der Balkankommission*. In Antiquarisches Abteilung, VI, Vienna.
- TELFORD W. M., GELDART L. P., SHERIFF R. E. AND KEYS D. A. 1976. *Applied Geophysics*. Cambridge. University Press.
- TRIPATHI A. 2005. *Remote sensing and archeology*.
- WHEATLEY D., GILLINGS M. 2000. *Spatial Technology and Archaeology. The archaeological applications of GIS*, London.
- WISEMAN J., EL BAZ F. 2007. *Remote sensing in archeology*.
- WYNN J. C. AND SHERWOOD S. I. 1984. *The Self-Potential (SP) method: an inexpensive reconnaissance and archaeological mapping tool*. In Journal of Field Archaeology, vol.11 (2), 195-204.
- YUHENDRA J., TRI SUMANTYO H., KUZE 2011. *Performance Analyzing of High Resolution Pan-sharpening Techniques: Increasing Image Quality for Classification using Supervised Kernel Support Vector Machine*. In Research Journal of Information Technology, 3, 12-23.
- ZHANG Y. 2004. *Understanding image fusion*. In Photogrammetry. Eng. Remote Sensing.