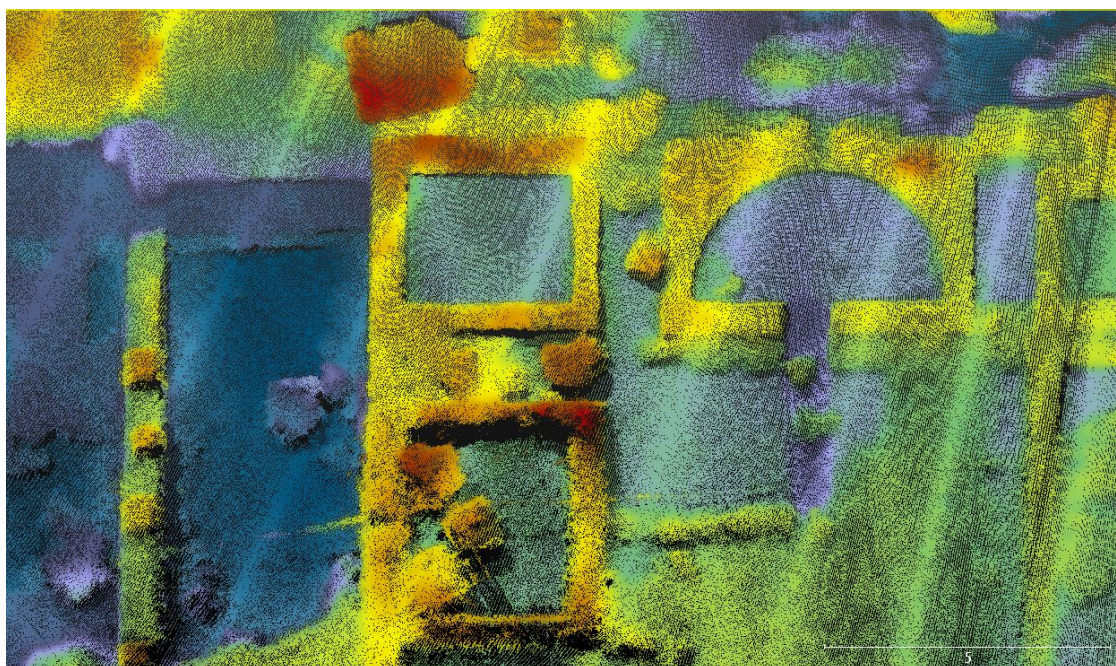


CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE

Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale

RAPPORTO TECNICO SCIENTIFICO

TECNOLOGIE GEOFISICHE E GEO-AMBIENTALI PER IL MONITORAGGIO, LA FRUIZIONE
E LA CONSERVAZIONE DI BENI ARCHEOLOGICI SOMMERSI



Crescenzo Violante ISPC_CNR

Rapporto tecnico scientifico ISPC_CNR, Napoli, Novembre 2022

NAPOLI

Sede centrale

Via Cardinale Guglielmo Sanfelice, 8 - 80134 NA

Email segreteria.ispc@ispc.cnr.it - segreteria.direzione@ispc.cnr.it

www.ispc.cnr.it

TECNOLOGIE GEOFISICHE E GEO-AMBIENTALI PER IL MONITORAGGIO, LA FRUIZIONE E LA CONSERVAZIONE DI BENI ARCHEOLOGICI SOMMERSI

RAPPORTO TECNICO SCIENTIFICO

Rapporto sulle attività archeo-geofisiche e geo-ambientali svolte nel biennio 2020-2022 nell'Area Marina Protetta e Parco Archeologico Sommerso di Baia (NA) - mare Tirreno meridionale - finalizzate al monitoraggio, la fruizione e la conservazione di beni archeologici sommersi.

Crescenzo Violante^{1*}

*crescenzo.violante@cnr.it

1) Istituto ISPC-CNR, Via Guglielmo Sanfelice, 8 - 80133 Napoli (IT)

Riassunto

Vengono presentati le attività e i risultati di indagini archeo-geofisiche e geo-ambientali svolte nell'Area Marina Protetta e Parco Archeologico Sommerso di Baia nel mar Tirreno meridionale nel biennio 2020-2022 in collaborazione con il Parco Archeologico dei Campi Flegrei (PAFLEG) nell'ambito di una convenzione operativa su “ *Tecnologie geofisiche e geo-ambientali per il monitoraggio, la fruizione e la conservazione di beni archeologici sommersi*”. Obiettivi principali delle indagini sono stati l'esecuzione di rilievi geofisici ad altissima risoluzione nell'area marina costiera di Baia dell'antico *Baianus Lacus* con incluso ispezioni visive del fondale tramite sistema ROV e immersioni subacquee su specifici transetti individuati nelle aree di maggiore interesse geo-archeologico. Le attività di rilevamento si sono svolte nell'ambito di tre campagne in mare effettuate in collaborazione con la Norbit Subsea di Trondheim (Norvegia), con la Subseafenix s.r.l di Ravenna (Italia) e utilizzando il laboratorio mobile MOLAB della “Integrated Platform for the European Research Infrastructure on Heritage Science” (IPERION HS) in collaborazione con Institute for Mediterranean Studies (IMS)- Foundation for Research and Technology Hellas (FORTH). I dati raccolti hanno consentito la mappatura e la caratterizzazione ad altissima risoluzione dei caratteri archeologici, geologici e ambientali del fondo e del primo sottofondo marino con importanti e implicazioni per la ricerca di soluzioni innovative riguardanti la protezione e la gestione del paesaggio culturale subacqueo e la creazione di modelli tridimensionali di strutture architettoniche e oggetti sommersi.

Parole chiave: *Geofisica marina, Altissima risoluzione, Parco Archeologico Sommerso di Baia, Archeologia subacquea, Telerilevamento acustico subacqueo, Geologia marina, Multibeam, Parametric sub-bottom profiler, ROV, ricostruzioni 3D.*

Abstract

In this report are presented the activities and results of archaeo-geophysical and geo-environmental investigations carried out in the Protected Marine Area and Submerged Archaeological Park of Baia (southern Tyrrhenian Sea) in the two-year period 2020-2022 in collaboration with the Phlegraean Fields Archaeological Park (PAFLEG). The main objectives of these investigations were to carry out geophysical surveys in the Baia coastal marine area of the ancient Baianus Lacus, including visual inspections of the seabed using an ROV system and scuba diving on specific transects identified in the areas of greatest geo-archaeological interest. The survey were undertaken as part of three oceanographic cruises carried out in collaboration with the Norbit Subsea of Trondheim (Norway), the Subseafenix s.r.l of Ravenna (Italy) and using the MOLAB mobile laboratory of the 'Integrated Platform for the European Research Infrastructure on Heritage Science' (IPERION HS). These latter activity was organized in collaboration with the Institute for Mediterranean Studies (IMS)- Foundation for Research and Technology Hellas (FORTH). The collected data have enabled the characterization and mapping of the archaeological, geological and benthic features of the seabed and shallow sub-seabed at ultra high resolution, with important and innovative implications on the protection and management of the underwater cultural landscape and on the production of three-dimensional models of underwater architectural structures and submerged objects.

Key words: *Marine Geophysics, Ultra-high resolution, Acoustic Remote Sensing, Baia Underwater Archaeologic Park, Underwater Archaeology, Marine Geology, Multibeam, Parametric sub-bottom profiler, ROV, 3D digital reconstructions.*

Citare questo REPORT come: Violante C. (2022) Rapporto sulle attività archeo-geofisiche e geo-ambientali svolte nell'Area Marina Protetta e Parco Archeologico Sommerso di Baia (NA) mare Tirreno meridionale finalizzate al monitoraggio, la fruizione e la conservazione di beni archeologici sommersi – Triennio 2020-2023. Rapporto tecnico, 2022, CNR-ISPC, pp. 1-27.

RAPPORTO TECNICO-SCIENTIFICO, 2022, CNR-ISPC

Foto in copertina: Ambienti del settore occidentale della villa dei Pisoni, Parco Archeologico Sommerso di Baia. Nuvola di punti da rilievo multibeam @ Crescenzo Violante CNR_ISPC

Indice

1	INTRODUZIONE	6
2	METODOLOGIE	7
2.1	TELERILEVAMENTO ACUSTICO SUBACQUEO.....	7
2.2	TOMOGRAFIA DELLA RESISTIVITÀ ELETTRICA DEL SOTTOFONDO MARINO. . .	8
2.3	MAPPATURA DEL SOTTOSUOLO CON SISTEMA GEORADAR (GPR).	9
3	RISORSE IMPIEGATE.	10
3.1	PERSONALE TECNICO SCIENTIFICO.	10
3.2	IMBARCAZIONI	10
3.3	STRUMENTAZIONE	11
3.3.1	SISTEMA BATIMETRICO MULTI-BEAM ECHO-SOUNDER (MBES).	12
3.3.2	PROFILATORE DI VELOCITÀ DEL SUONO IN ACQUA.	12
3.3.3	PROFILATORE PARAMETRICO DI SEDIMENTI (PES).	13
3.3.4	SISTEMA DI NAVIGAZIONE INERZIALE (INS)..	13
3.3.5	VEICOLO FILOGUIDATO PER ISPEZIONI VISIVE (ROV).	14
3.3.6	GEORESISTIVIMETRO PER PROSPEZIONI GEOELETTRICHE (ERT)	14
3.3.7	SISTEMA GEORADAR GPR	14
4	AREA DI INDAGINE	15
4.1	INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO	15
4.2	L'INSEDIAMENTO DI BAIA.	16
5	ATTIVITA' SVOLTE	17
5.1	RILIEVI BATIMETRICI MULTIFASCIO (MBES).	17
5.2	RILIEVI SISMOACUSTICI CON SISTEMA PARAMETRICO (PES).	18
5.3	ISPEZIONI VISIVE (ROV).	19
5.4	PROSPEZIONI GEOELETTRICHE (ERT)	19
5.5	PROSPEZIONI GEORADAR (GPR)	20
6	RISULTATI PRELIMINARI.	21
6.1	BATIMETRIA MULTIFASCIO	21
6.2	ANALISI SISMOSTRATIGRAFICA	22
6.3	TOMOGRAFIA ELETTRICA.	23
5.6	GEORADAR.....	24

7	RINGRAZIAMENTI	24
8	BIBLIOGRAFIA	24

Elenco delle figure

1	Ubicazione dell'area di studio	7
2	Tecnologie di telerilevamento acustico subaqueo utilizzate. A) Ecoscandaglio multifascio (MBES); B) Side Scan Sonar (SSS); C) Profilatore di sedimento (SBP); D) Veicolo filo-guidato (ROV)	8
3	(a) Indagine ERT statica e (b) indagine ERT dinamica applicata nell'area di studio.	9
4	Il metodo elettromagnetico Georadar	9
5	Imbarcazioni utilizzate per le operazioni in mare. A) M/N Ulisse; B) RIB Pafleg; C) RIB Alex	11
6	Schema di interconnessioni del sistema MBS WINGHEAD i77h.	11
7	Sonda SVP al momento del calo in acqua.	13
8	Trasduttore del sistema SBP parametrico SES 2000 installato a palo	13
9	Sistema di navigazione inerziale (INS) installato a palo con la coppia di antenne GNSS.	14
10	Veicolo filoguidato BluRov2 della BluRobotics.	14
11	Sketch geologico dell'area di studio	15
12	Eruzione di Monte Nuovo come documentata nell'incisione di Delli Falcone del 1539 d.C.	16
13	Mappa archeologica dell'area di studio modificata da [42].	16
14	Area rilievi geofisici.	17
15	Fase di acquisizione dati batimetrici.	17
16	Installazione lungo la murata dell'imbarcazione del sistema SBP parametrico.	18
17	Griglia di acquisizione dati SBP_PES.	19
18	Esempio di immagine acquisita con sistema ROV.	19
19	Collegamento della strumentazione Syscal Pro/Switch con il cavo di acquisizione nero per l'esecuzione delle misure ERT statiche.	20
20	Layout delle linee ERT dinamiche sovrapposto a immagine satellitare di Google Earth dell'area di studio.	20
21	Mappa di rilievo ombreggiata della Villa dei Pisoni situata al largo di Punta Epitaffio (Area A dell'Area Marina Protetta di Baia) basata su un DEM con passo di cella di 10cm.	21
22	Esempio di sezione sub-bottom PES elaborata con relativa interpretazione	22
23	Sezioni orizzontali che illustrano i valori di resistività estratti dal modello di inversione tridimensionale del rilievo ERT statico.	23
24	Sezione di resistività verticale 2D lungo due linee rappresentative del rilievo ERT dinamico con indicazione delle anomalie di resistività presenti fino a 1 m al di sotto del fondale marino.	24

Elenco delle tabelle

1	Acronimi di organizzazioni, costruttori e strumenti	6
2	Personale tecnico e scientifico.	10
3	Imbarcazioni.	10
4	Specifiche tecniche del sistema WINGHEAD i77h	12

ACRONIMO	DESCRIZIONE	URL
ISPC	Istituto di Scienze dei Beni Culturali	http://www.ispc.cnr.it
CNR	Consiglio Nazionale Delle Ricerche	http://www.cnr.it
PAFLEG	Parco Archeologico dei Campi Flegrei	http://www.pafleg.it/
FORTH	Foundation for Research and Technology Hellas	https://www.forth.gr/en/home/
SUBSEAFENIX s.r.l.	Società rilievi subacquei	https://www.subseafenix.com/
NORBIT SUBSEA	Società produttrice sistemi MBES	https://norbit.com/subsea/
UCH	Patrimonio Culturale Sommerso	
MOLAB	MOBILE LABORatory	https://www.iperionhs.eu/molab/
IPERION HS	Integrated Platform for the European Research Infrastructure on Heritage Science	https://www.iperionhs.eu/
MBES	Multibeam Echosounder	
SBP	Sub-bottom Profiler	
RTK	Real-Time Kinematics	
GPS	Global Positioning System	
IHO	International Hydrographic Organization	https://iho.int/
MRU	Motion Reference Unit	
SVP	Sound Velocity Probe	
S7K	SeaBat 7k Data Format	
UHD	Ultra High Definition	
PES	Parametric Echo Sounder	
ROV	Remotely operated vehicle	
UB	Universitat de Barcelona	https://web.ub.edu/
CSCF	Centro Sub Campi Flegrei	https://www.centrosubcampiflegrei.it/
SABAP	Soprintendenza Archeologia, Belle Arti e Paesaggio - Napoli	https://sabap.na.it/
CSB	Centro Sub Baia	https://subaia.com/it/index
IMS	Institute for Mediterranean Studies	https://www.ims.forth.gr/en/index
GPR	Ground Penetrating Radar	
ERT	Electrical Resistivity Tomography	

Tabella 1 – Acronimi di organizzazioni, costruttori e strumenti

1 – INTRODUZIONE

Lo studio e la documentazione del patrimonio culturale con tecniche di telerilevamento è in continuo sviluppo con l'avanzare della tecnologia, consentendo di effettuare indagini sempre più dettagliate su cui basare l'interpretazione di siti culturali in diversi contesti ambientali. In ambiente marino, l'elaborazione e l'integrazione di dati rilevati da remoto (imbarcazioni e droni marini) con sistemi sonar e l'analisi delle immagini acustiche, della riflettività e della batimetria dei fondali, fornisce una base informativa evoluta da cui estrarre informazioni, costruire modelli, sviluppare algoritmi per la ricerca archeologica e sviluppare

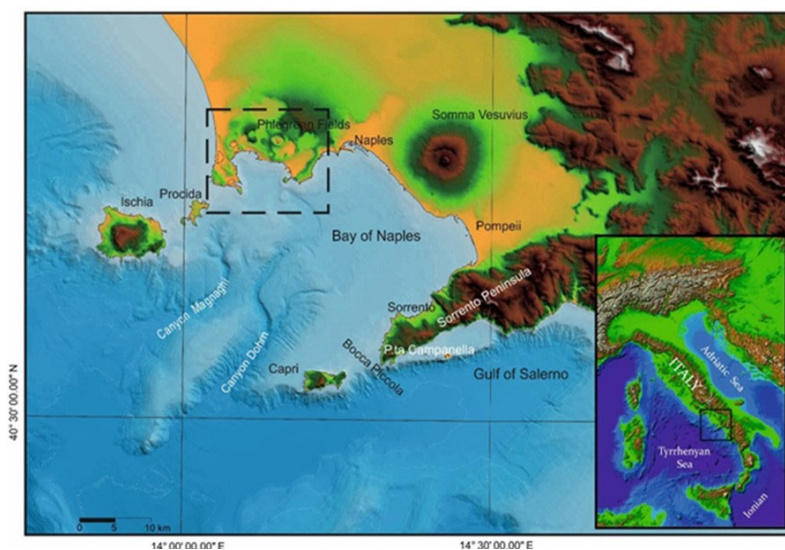


Figura 1. Ubicazione dell'area di studio.

applicazioni per la ricostruzione e la conservazione dei manufatti e dei paesaggi culturali sommersi [1]. Inoltre, le moderne tecniche di imaging sismico si sono rivelate strumenti efficaci per ottenere dati ad elevata risoluzione di strutture sepolte al di sotto del fondale marino anche in aree di mare basso [2].

I metodi che offrono il maggior potenziale per la classificazione e la mappatura di oggetti archeologici sommersi prevedono l'uso di ecoscandagli multifascio (MBES) principalmente progettati per produrre dati batimetrici quantitativi, ma anche in grado di

misurare la riflettività del fondo marino (principalmente il segnale snippet di backscatter), e profilatori di sedimento parametrici (parametric sub-bottom profilers, SBPs) per la produzione di immagini stratigrafiche di oggetti e topografie sepolte (Fig. 2). Da alcuni decenni ormai questi sistemi sono stati utilizzati per la caratterizzazione e la mappatura di siti archeologici sommersi [5], [6], [7], [8]. I sistemi moderni coprono da remoto ampie aree di fondale da una distanza di sicurezza e allo stesso tempo risolvono la forma tridimensionale di oggetti sommersi con risoluzione centimetrica. Queste tecniche generano risultati ad alta risoluzione spaziale, ripetibili e quantificabili e facilmente integrabile con altri dati scientifici e terrestri. Sono impiegati tanto su siti discreti, come i relitti di navi [9], [10], [11] quanto su ampi tratti di fondale marino per ricostruire antichi paesaggi sommersi di interesse archeologico (Fig. 1) [8], [12], [13].

In questo rapporto tecnico-scientifico vengono presentati le attività e i risultati di indagini archeo-geofisiche e geo-ambientali svolte nell'Area Marina Protetta e Parco Archeologico Sommerso di Baia nel mar Tirreno meridionale (Fig.1) nel biennio 2020-2022 nell'ambito di una collaborazione con il Parco Archeologico dei Campi Flegrei (PAFLEG). Le indagini geofisiche hanno compreso l'esecuzione di rilievi batimetrici e sismo-stratigrafici ad altissima risoluzione, e rilievi ERT e GPR nell'area marina costiera di Baia dell'antico Baianus Lacus con incluse ispezioni visive del fondale tramite sistema ROV e immersioni subacquee su specifici transetti individuati nelle aree di maggiore interesse geo-archeologico.

2 - METODOLOGIE

2.1 Telerilevamento Acustico Subacqueo

In ambiente marino, le onde acustiche sono il mezzo di indagine più efficiente grazie alla loro capacità di propagazione in acqua (fino a diversi chilometri) senza subire attenuazioni significative. Il livello di attenuazione dipende dalla frequenza ed è maggiore per le alte frequenze. L'energia acustica trasportata durante la propagazione può essere usata per effettuare misurazioni del mezzo attraversato.

I sistemi sonar sono progettati in modo da generare segnali elettrici che vengono convertiti in energia acustica tramite un trasduttore-trasmettitore che genera un impulso sonoro nella colonna d'acqua a una determinata frequenza. L'energia acustica del segnale di ritorno dal fondo (eco) viene poi convertita in energia elettrica tramite un trasduttore-ricevitore. Inoltre questi sistemi misurano i tempi di arrivo degli echi di ritorno. Le caratteristiche del trasduttore-trasmettitore, del trasduttore-ricevitore e del tipo di elaborazione/interpretazione del segnale di ritorno dal fondo distinguono un particolare sonar come ecoscandaglio multibeam (MBES; Fig. 2A), da un sonar a scansione laterale (SSS; Fig. 2B) o da un profilatore acustico di sedimenti (SBP; Fig. 2C).

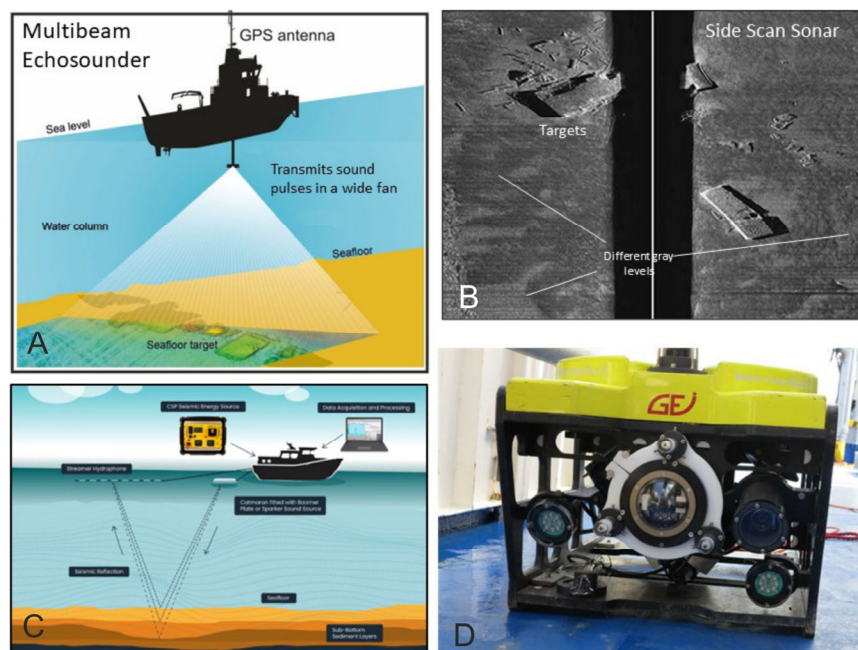


Figura 2. Tecnologie di telerilevamento acustico subaqueo utilizzate. A) Ecoscandaglio multifascio (MBES); B) Side Scan Sonar (SSS); C) Profilatore di sedimento (SBP); D) Veicolo filoguidato (ROV)

I dati acquisiti con sistemi sonar sono di regola integrati con quelli raccolti da veicoli autonomi o azionati a distanza (AUV o ROV) che forniscono in formazioni dirette tramite ispezioni visive utilizzate per la calibrazione dei dati geofisici. I sistemi ROV (Fig. 2D) opportunamente equipaggiati con telecamere ad alta risoluzione sono stati utilizzati anche per generare modelli 3D subacquei di strutture archeologiche attraverso l'applicazione di tecniche di fotogrammetria [14], [15]. Questi modelli sono tarati sulla base di dati batimetrici ad altissima

risoluzione che consentono un accurato posizionamento spaziale [16].

Tecniche di telerilevamento acustico subaqueo sono state tradizionalmente utilizzate per localizzare e documentare siti archeologici presenti sui fondali marini o sepolti dai sedimenti nel primo sottofondo. In particolare i sistemi sonar costituiscono uno strumento indispensabile per lo studio del patrimonio culturale in acque profonde fino a pochi anni fa di fatto inaccessibile [17]. Inoltre la natura non intrusiva di queste indagini permette di preservare le risorse culturali nel contesto in cui si ritrovano con significative implicazioni per la conservazione archeologica.

Dati batimetrici e di backscatter così come quelli derivati da indagini con profilatori parametrici di sedimento sono stati utilizzati per studi sui processi di formazione di sito mirati ad esaminare l'impatto dei processi fisici, biologici e chimici su un sito archeologico nel tempo [18], [19] fornendo informazioni significative per la valutazione quantitativa del degrado delle risorse culturali sommerse e l'analisi del rischio.

2.2 Tomografia della resistività elettrica del sottofondo marino

La mappatura della resistività del suolo, ovvero la misurazione della resistenza specifica del terreno, è una tecnica di indagine geofisica più comunemente usata negli studi del sottosuolo. Ciò è dovuto alla possibilità di rilevare diverse tipologie di strutture incluso pareti, cavità e stratificazione dei sedimenti in base alle loro diverse proprietà elettriche ed elettrochimiche. I metodi di resistività utilizzano campi di corrente continua o alternata per misurare il potenziale elettrico o il gradiente di potenziale della corrente corrispondente [20]. La resistività del mezzo attraversato è calcolata dalla legge di Ohm. Esistono diverse matrici (o configurazioni) basate sempre sull'utilizzo di quattro elettrodi. La scelta dell'array appropriato per una determinata indagine dipende da fattori quali l'area di indagine, la natura e la profondità dei target, le proprietà del sottosuolo, il tipo di attrezzatura, la profondità di indagine e le caratteristiche di comportamento dell'array [21]. Normalmente la tecnica viene impiegata in modalità di mappatura orizzontale (cioè una configurazione fissa di elettrodi che si muove lungo un profilo o una griglia, fornendo la distribuzione orizzontale della resistenza), ma può anche essere adattata per misurare la distribuzione verticale della resistenza, e quindi la profondità di un elemento, attraverso la separazione degli elettrodi mentre il centro della configurazione rimane fermo (sondaggi di resistività). Può anche essere applicata in modalità tomografica, dove vengono misurate le distribuzioni verticali e orizzontali della resistività lungo i transesti. I sistemi multi-sonda, su ruote e su carrelli sono usati per velocizzare rilievi di resistività (soprattutto in terreni lisci e conduttivi) e per le tecniche di

profilatura verticale (o profilatura elettrica verticale, VES) e tomografica fornendo informazioni stratigrafiche a diverse profondità.

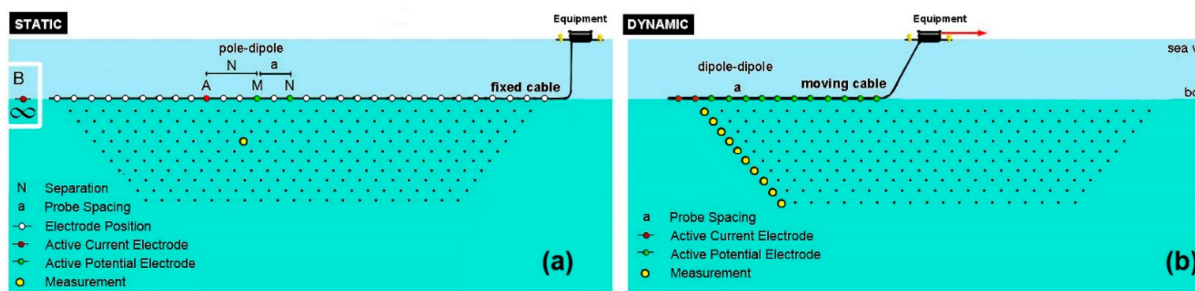


Figura 3. (a) Indagine ERT statica e (b) indagine ERT dinamica applicata nell'area di studio [23].

La tomografia della resistività elettrica (ERT) viene generalmente effettuata lungo transetti paralleli nel tentativo di mappare le proprietà di resistività del suolo in un contesto 3D [22]. Per quanto riguarda le aree marine, la scelta della modalità di indagine (statica o dinamica ; Fig. 3) si basa fondamentalmente sullo spessore della colonna d'acqua e sulle condizioni effettive del fondo marino. Nelle aree in cui la profondità dell'acqua supera 1 m, viene applicata la modalità dinamica al fine di massimizzare la risoluzione delle immagini ERT sia in termini di mappatura stratigrafica che di individuazione di target sepolti [23].

2.3 Mappatura del sottosuolo con sistema Georadar (GPR)

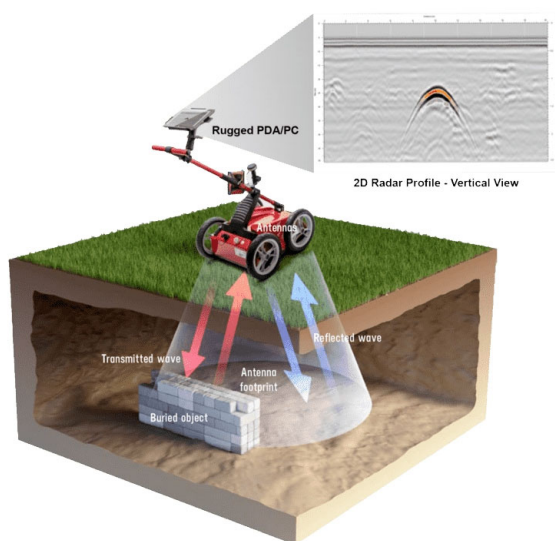


Figura 4. Il metodo elettromagnetico Georadar

Radar è l'acronimo di RAdio Detecting And Ranging. È un sistema che utilizza la radiazione elettromagnetica ad alta frequenza. Il metodo Georadar (GPR Ground Penetrating Radar; Fig. 4) ha lo stesso principio di funzionamento del metodo di riflessione sismica. Questa tecnica geofisica è applicabile alla mappatura del sottosuolo e sfrutta le diverse proprietà elettriche che hanno i vari materiali [24]. Il Georadar emette onde elettromagnetiche ad alta frequenza nel terreno che vengono riflesse ogni qualvolta incontrano materiali con proprietà fisiche diverse. I segnali riflessi dal sottosuolo vengono registrati ed elaborati. In particolare l'energia elettromagnetica che si propaga nel terreno dipende dalle proprietà elettriche del sottosuolo, dalla conduttività e dalla costante dielettrica dei materiali attraversati [25]. Il tempo che intercorre tra l'impulso di trasmissione e quello di ricezione dipende dalla velocità lungo la traccia seguita dall'impulso. Questo tempo può essere misurato e se si conosce la velocità

di propagazione dell'onda elettromagnetica si può determinare la profondità del riflettore. Inoltre, l'assorbimento del segnale dipende principalmente dalla frequenza dell'antenna, dalla conduttività e dalla costante dielettrica. I vari profili georadar vengono effettuati lungo tracce parallele tra loro in modo da ottenere ricostruzioni delle proprietà elettriche del sottosuolo nelle tre dimensioni. Gli impulsi captati dall'antenna ricevente, dopo essere stati trasformati nuovamente in impulsi elettrici, vengono trasferiti all'unità centrale di controllo: qui i segnali vengono prima trattati tramite l'ausilio di amplificatori e filtri (compresi nell'unità centrale), poi visualizzati su un display e registrati nella memoria del computer in funzione del tempo, in modo da potere essere visualizzati come una funzione del loro Two-Way Travel Time (TWTT), cioè il tempo intercorso dall'istante di trasmissione all'istante di ricezione, nella forma di un radargramma.

3 - RISORSE IMPIEGATE

3.1 Personale tecnico-scientifico

NOMINATIVO	ORGANIZZAZIONE	RUOLO
Crescenzo Violante	ISPC_CNR NAPOLI	Responsabile della ricerca – Geologia e Geofisica
Guglielmo Fragale	CSCF	Pilota imbarcazione
Enrico Gallochio	PAFLEG	Archeologia subacquea
Eduardo Ruspantini	CENTRO SUB BAIA	Pilota imbarcazione
Carlo Leggieri	SABAP_NA	Pilota imbarcazione – Archeologia subacquea
Aleksandra Kruss	NORBIT SUBSEA	Acquisizione ed elaborazione dati MBES – Navigazione
Stefano Mancini	SUBSEAFENIX	Acquisizione dati PES-SPB - Navigazione
Altro Subsea	SUBSEAFENIX	Navigazione
Samuele Carannante	MARINESUB	Pilota imbarcazione - Archeologia subacquea
Sabrina Samela	ISPC-CNR NAPOLI	ROV- Navigazione
Sveva Longo	ISPC-CNR NAPOLI	ROV- Navigazione
Pol Bridgewater	UB	ROV- Navigazione
Paola Fabretti	NORBIT SUBSEA	Navigazione
Daniele Ferdani	ISPC-CNR ROMA	Elaborazione dati 3D
Bruno Fanini	ISPC-CNR ROMA	Elaborazione dati 3D
Nicodemo Abate	ISPC-CNR POTENZA	Operatore GIS
Alberto Panti	BLUSURVEY	Tecnico di bordo
Nicola Masini	ISPC-CNR POTENZA	Elaborazione dati
Nikos Papadopoulos	FORTH	Acquisizione ed elaborazione dati ERT e GPR
Dimitrios Oikonomou	FORTH	Acquisizione ed elaborazione dati ERT e GPR
Claudio Cipriani	CSCF	Tecnico di bordo

Tabella 2 – Personale tecnico e scientifico

3.2 Imbarcazioni

Tabella 3

<i>Imbarcazione</i>	<i>Lunghezza</i>	<i>Larghezza</i>	<i>N. Ric.</i>	<i>Operatività</i>	<i>Periodo</i>	<i>Giorni</i>	<i>Operazioni</i>
M/N ULISSE “Marinesub”	8,82	2,71	4	7H	Novembre	3	MBES
RIB PAFLEG	6,00	2,50	3	7H	Maggio	3	MBES
RIB ALEX CSB	7,45	2,55	4	7H	Aprile	2	SPB PES

Larghezza: larghezza dell'imbarcazione fuoritutto in m.

N. Ric.: numero di ricercatori

Operatività: operatività dell'imbarcazione nell'arco della giornata



Figura 5. Imbarcazioni utilizzate per le operazioni in mare. A) M/N Ulisse; B) RIB Pafleg; C) RIB Alex.

3.3 – Strumentazione

3.3.1 – Sistema batimetrico Multi-Beam Echo-Sounder (MBES)



Figura 6. Schema di interconnessioni del sistema MBS WINGHEAD i77h

Per lo svolgimento dei rilievi batimetrici ad altissima risoluzione sono stati utilizzati due modelli della Norbit Subsea il modello WINGHEAD i77h (Fig. 6) e il modello WINGHEAD i80S entrambi con frequenza di lavoro di 400 kHz e operatività in un range batimetrico da un minimo di 0.5 metri fino a circa 300 metri. Si tratta di sistemi integrati composti da tre elementi: un trasduttore curvo, una piccola Sonar Interface Unit (SIU) e una coppia di ricevitori GNSS in cui l'elaborazione del rilevamento fondale avviene all'interno della testa del sonar che integra anche un sistema di navigazione inerziale Applanix OceanMaster ad altissime prestazioni. Tale configurazione permette una precisa georeferenziazione del rilievo fornendo informazioni di latitudine, longitudine, quota, rollio, beccheggio, heading, heave e garantendo la sincronia temporale. Tale sistema è inoltre compatibile con la correzione in tempo reale RTK (Real Time Kinematic) che garantisce un'accuratezza centimetrica del posizionamento orizzontale. Il trasduttore acustico è dotato di un sistema per la trasmissione e la ricezione per la formazione dei fasci acustici. Per ogni ciclo di misura il sistema genera in

trasmissione un fascio acustico orizzontale ampio 155°, mentre in ricezione vengono rilevati fino a 1024 fasci di 0.5 gradi, ai quali corrispondono altrettanti punti di misure batimetriche su una sezione trasversale alla prua della nave. Questo metodo consente di coprire sezioni ampie fino a circa 3.5 volte la profondità reali e conseguire la copertura totale del fondo a velocità operative fino a 3-5 nodi.

Alle distanze misurate vengono apportate, in tempo reale, le correzioni necessarie a compensare il movimento dell'imbarcazione e le variazioni della velocità del suono nell'acqua. Entrambi i sistemi eseguono misure batimetriche con una accuratezza massima di 2 cm (secondo certificazione IHO) ed una risoluzione pari ad circa 1 cm.

SWATH COVERAGE	5-210° FLEXIBLE SECTOR (SHALLOW WATER IHO SPECIAL ORDER >155°)
RANGE RESOLUTION	<10mm ACOUSTIC w. 80kHz BANDWIDTH
NUMBER OF BEAMS	256, 512, 1024 EA & ED
OPERATING FREQUENCY	NOMINAL FREQUENCY 400kHz (FREQUENCY AGILITY 200-700kHz)
DEPTH RANGE	0.2m to >400m*,
PING RATE	UP TO 60Hz, ADAPTIVE
RESOLUTION (ACROSS X ALONG)	STANDARD: 0.5° X 0.9° @400kHz, 0.3° x 0.5° @700kHz
POSITION	HOR: ±(8mm +1ppm X DISTANCE FROM RTK STATION) VER: ±(15mm +1ppm X DISTANCE FROM RTK STATION) (ASSUMES 1m GNSS SEPARATION)
HEADING ACCURACY	0.02° (RTK) WITH 2m ANTENNA SEPARATION
PITCH/ROLL ACCURACY	0.01° INDEPENDENT OF ANTENNA SEPARATION
HEAVE ACCURACY	2 cm OR 2% (TRUEHEAVE™), 5 cm OR 5% (REAL TIME)
INTERFACE	ETHERNET
POWER CONSUMPTION	<90W (10-28VDC, 110-240VAC) TOTAL
DIMENSIONS	DIMENSIONS WITHOUT BRACKET H: 447mm/17.605", L: 296mm/11.657", W: 101.9mm/4.010"
WEIGHT	6.9kg (AIR) 3.8kg (WATER) EXCL. BRACKET 7.4kg (AIR) 4.0kg (WATER) INCL. BRACKET
CABLE LENGTH	STD 8m, OPTIONAL: 2m, 25m
OPERATING TEMP.	-4°C to +40°C (TOPSIDE -20°C to +55°C)
STORAGE TEMP.	-20°C to +60°C
ENVIRONMENTAL	TOPSIDE: IP67: DUST TIGHT, PROTECTED AGAINST THE EFFECT OF IMMERSION UP TO 1m WET-END (SONAR): 100m

Tabella 4. Specifiche tecniche del sistema WINGHEAD i77h

3.3.2 Profilatore di velocità del suono in acqua

Gli impulsi acustici generati dal sistema multibeam subiscono variazioni di velocità dovute alle differenti caratteristiche fisico-chimiche nella colonna d'acqua attraversata che alterano la direzione di propagazione. Per tale motivo le operazioni di acquisizione MBES necessitano di correzioni della velocità del suono tramite Sound Velocity Profiler. In questo caso è stata utilizzata una sonda SVP SVALEPORT SWiFTsvp con GPS integrato (Fig. 7). Lo strumento opera fino a 500 metri di profondità e fornisce la misura continua e diretta della velocità.

3.3.3 Profilatore parametrico di sedimenti (PES)



Figura 7. Sonda SVP al momento del calo in acqua.

L'indagine sismica è stata condotta con l'ecoscandaglio parametrico SES-2000 (PES). Si tratta di un sistema compatto costituito da un piccolo trasduttore ($\sim 20 \times 20$ cm; Fig. 8) e da un'unità ricevente con elementi di conversione del segnale analogico-digitale. La sorgente acustica trasmette simultaneamente due segnali di alta frequenza leggermente diversi (tipicamente 100 e 110 kHz) a pressioni elevate. L'interazione di due alte frequenze ad elevata pressione genera nuove frequenze nell'acqua. Una di queste è la “frequenza di sottrazione” (DF) ed è compresa tra 6 e 14 kHz. Questo nuovo segnale a bassa frequenza ha un'ampiezza del fascio molto stretta di $\pm 1,8^\circ$ (indipendente dalla frequenza), un'alta direttività con lobi laterali praticamente assenti durante la trasmissione e una larghezza di banda simile al segnale a frequenza primaria (100 kHz). L'elevata larghezza di banda consente la trasmissione di impulsi brevi (nell'intervallo 0,07-1 ms) senza ringing, mentre la ridotta larghezza del fascio determina un footprint molto ridotto, pari a circa il 7% della profondità dell'acqua. Questa configurazione consente risoluzioni verticali e orizzontali molto elevate (intervallo cm/dm). L'ampiezza ridotta del fascio consente di rilevare

piccole strutture sepolte, mentre la breve lunghezza dell'impulso permette di lavorare in acque molto basse (1 m) [26]. Queste caratteristiche determinano anche una minore riverberazione e, di conseguenza, un migliore rapporto segnale/rumore rispetto all'SBP lineare[27]. Allo stesso tempo, la bassa frequenza del DF consente la penetrazione nel fondale marino, mentre la frequenza primaria (più alta) viene utilizzata per le misure di profondità dell'acqua. La profondità di penetrazione del fondale marino può raggiungere alcune decine di metri in sedimenti sottili (ricchi di fango), mentre nei depositi sabbiosi è spesso limitata a 5-10 metri.

3.3.4 Sistema di navigazione inerziale (INS)

Per il rilievo dei dati sismo-stratigrafici nell'area di studio è stato utilizzato un sistema di navigazione inerziale POS-MV WaveMaster per filtrare il movimento delle onde e determinare il posizionamento dell'imbarcazione con una precisione centimetrica (Fig. 9). Un sistema di navigazione inerziale (INS) è un dispositivo autonomo costituito da un'unità di misura inerziale (IMU) e da un'unità di calcolo in grado di calcolare la posizione, sia rispetto a un sistema/punto di riferimento sia rispetto a coordinate assolute. L'IMU è tipicamente composta da un accelerometro a 3 assi, un giroscopio a 3 assi e talvolta un magnetometro a 3 assi e misura la velocità angolare e l'accelerazione del sistema. Il concetto di base di un sistema INS consiste nel misurare le variazioni del moto relativo (attraverso la misurazione dell'accelerazione) per proiettare una posizione variabile in un quadro di riferimento inerziale nel tempo. L'unità di calcolo determina l'assetto, la posizione e la velocità del sistema sulla base delle misurazioni grezze dell'IMU, date una posizione e un assetto iniziali.



Figura 8. Trasduttore del sistema SBP parametrico 2000 installato a palo.



Figura 9. Sistema di navigazione inerziale (INS) installato a palo con la coppia di antenne GNSS.

3.3.5 Veicolo filoguidato per ispezioni visive (ROV)

La documentazione visiva subacquea è stata fatta tramite un veicolo filoguidato (ROV) BluRov2 della BluRobotics equipaggiato con una telecamera Low-Light HD (Fig. 10) per il monitoraggio dei caratteri bentonici (fino a 50 m). Il ROV è dotato di sistema di posizionamento per conoscerne la posizione esatta in tempo reale e registrarne il percorso durante l'immersione. Le immagini video e le foto effettuate durante l'esplorazione, trasmesse a un monitor a bordo della nave nell'area di comando del pilota ROV, vengono seguite in tempo reale dal personale di bordo.

3.3.6 Georesistivimetro per prospezioni geoelettriche (ERT)

Per la mappatura e la tomografia della resistività del fondale marino è stato utilizzato il georesistivimetro Syscal Pro della IRIS instrument. Il Syscal Pro è un sistema multielettrodo all-in-one dedicato al profiling e all'imaging della resistività e della polarizzazione indotta. Tale sistema include diverse opzioni, come la modalità Fullwave per registrare serie temporali complete di

tensioni misurate durante un'acquisizione e la modalità Remote che consente di controllare automaticamente il Syscal Pro attraverso un PC per scopi di monitoraggio. Lo strumento comprende un ricevitore a 10 canali e un trasmettitore interno da 250W, 2000Vpp. L'unità può eseguire fino a 10 misurazioni al secondo con una risoluzione di 1m x 1m.

3.3.6 Sistema Georadar per prospezioni elettromagnetiche (GPR)

Il georadar (GPR) è una tecnica ampiamente utilizzata in geoarcheologia, che consente di rilevare le caratteristiche del sottosuolo sulla base di cambiamenti nella propagazione dell'energia elettromagnetica. Un tipico GPR comprende un'antenna trasmittente (Tx) e un'antenna ricevente (Rx). Il Tx trasmette onde elettromagnetiche a frequenza fissa nel sottosuolo. L'Rx riceve la porzione di energia che viene riflessa dai materiali che compongono il sottosuolo e registra l'ampiezza di questo segnale ai fini della mappatura.

Per il rilievo di settori selezionati di spiaggia emersa è stato usato il sistema Noggin Plus. Si tratta un georadar ad alte prestazioni che integra la possibilità di intercambiare le frequenze dell'antenna, utilizzando un'antenne da 100 MHz, 250 Mhz, 500 MHz e 1000 MHz. I sistemi Noggin integrano anche un GPS esterno e un software di post-elaborazione. Il Noggin Plus utilizza antenne a banda ultra larga (UWB) che garantiscono la massima penetrazione del segnale e la più alta qualità dei dati GPR.



Figura 10. Veicolo filoguidato BluRov2 della BluRobotics

4 – AREA DI INDAGINE

4.1 – Inquadramento geologico e geomorfologico

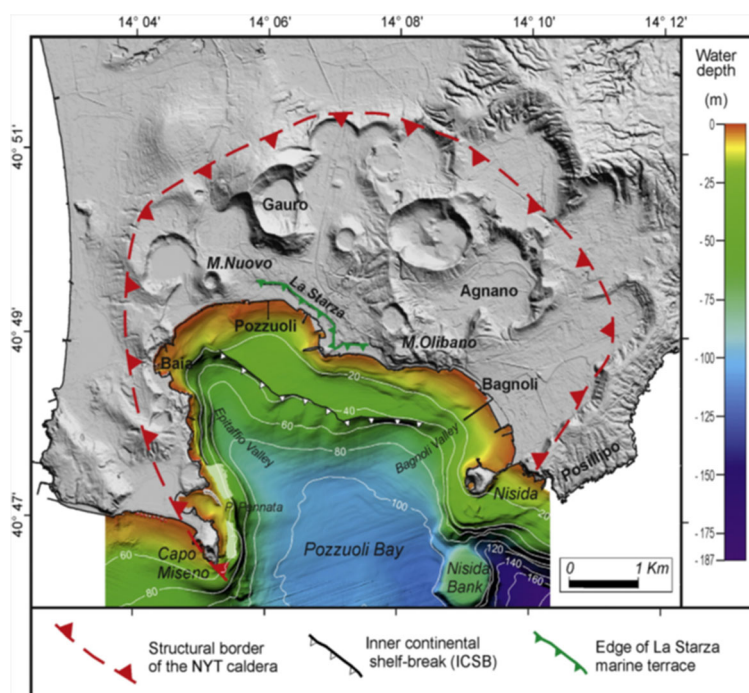


Figura 11. Sketch geologico dell'area di studio

L'area di studio è ubicata nella Caldera Flegrea, un'area vulcanica attiva situata a nord di Napoli (Fig. 11), caratterizzata da frequenti terremoti, manifestazioni idrotermali e da fenomeni di lento sollevamento e subsidenza del suolo noti come bradisismo [28]. In quest'area, l'attività vulcanica risale a circa 60.000 anni fa [28; 29]. Due eventi vulcanici maggiori avvenuti tra 39 e 15 ka BP hanno provocato collassi della caldera dando luogo alle eruzioni dell'Ignimbrite Campana (CI, 39 ka BP) [30] e del Tufo Giallo Napoletano (NYT; 15 ka) [31]. Attualmente, nel perimetro della caldera sono ancora visibili i resti di trenta strutture vulcaniche (principalmente edifici vulcanici di piccole dimensioni). L'ultima eruzione è avvenuta nel 1538, dopo un periodo di quiescenza di circa 3000 anni,

quando si è formata una nuova struttura vulcanica (Monte Nuovo) [32]. In quell'occasione si registrò uno spostamento della linea di costa di 200 m verso il mare.

Nel corso degli ultimi millenni, il bradisismo ha causato la sommersione di ampi settori dell'area calderica e cambiamenti significativi del paesaggio costiero. Movimenti verticali del suolo a lungo termine, caratterizzati da un'alternanza di fasi di subsidenza e sollevamento tra l'eruzione del NYT (ca. 15 ka BP) e 5,0 ka BP, sono stati riconosciuti nel record stratigrafico del terrazzo della Starza [33;34], situato 2 km a est dell'area di studio. Questi fenomeni hanno indotto variazioni della linea di costa sia verso terra che verso mare di varie decine di metri.

Il fenomeno del bradisismo fu riconosciuto per la prima volta nella prima metà del XVIII secolo dopo lo scavo del cosiddetto "Tempio di Serapide", i resti di un mercato romano nella città di Pozzuoli. Lyell (1850) [35] interpretò le perforazioni effettuate da un mollusco marino presenti sulle sue colonne come risultato di variazioni relative del mare dovute a fasi di sommersione ed emersione dell'area costiera. Questi perforazioni biologiche, oggi a 7 m sul livello del mare, possono essere considerate un'importante prova di rapidi cambiamenti del livello del mare dovuti a crisi bradisismiche in questo sito. La datazione e l'interpretazione di queste strutture [36] indicano che il tempio Serapide e i suoi dintorni iniziarono a essere sommersi dal mare nel III secolo a.C.. La subsidenza durò fino al X secolo portando il tempio a circa 7 m sotto il livello del mare. Successivamente iniziò un periodo di sollevamento che culminò con l'eruzione del Monte Nuovo nel 1538. A quel punto, due giorni prima dell'eruzione, il sollevamento aveva raggiunto i +7 m (rispetto all'attuale livello del mare), come documentato dall'incisione di Delli Falconi del 1539 d.C. (Fig. 12) [37]. Dopo il 1538, in seguito a un periodo di subsidenza, i Campi Flegrei sono stati caratterizzati da rapidi sollevamenti, seguiti da una lenta subsidenza. I due eventi maggiori del 1969-1972 e del 1982-1984 hanno determinato un sollevamento totale di circa 3,5 m [38]. Successivamente, nel 1989, nel 1994 e nel 2000 sono stati registrati solo piccoli eventi di sollevamento (pochi centimetri) e di breve durata. Il tasso di subsidenza aumenta sia a est che a ovest di Pozzuoli [39].

L'area di studio è anche caratterizzata da presenza di emissioni di gas sul fondale marino. Circa 1500 metri a sud di Pozzuoli, si ritrovano trova diverse risorgenze termali (la Secca delle Fumose) con emissioni di acqua calda (fino a 93°C) contenenti metano, anidride solforosa, arsenico e anidride carbonica [40].

4.2 – L'insediamento romano Di Baia

La città romana di Baiae fu fondata nel golfo di Pozzuoli (NA) in corrispondenza di un insenatura naturale probabilmente già utilizzata come porto dell'insediamento dei "Cumani" [41]. In età romana era prevalentemente un centro residenziale, costituito da ville, terme e locande. L'antica città sorgeva sulle sponde di un lago costiero (Baianus Lacus), collegato al mare da un canale artificiale. A causa di movimenti verticali del suolo dovuti al fenomeno vulcanico del "Bradisismo", la ville residenziali e altri manufatti e strutture romane databili dal I secolo a.C. al IV secolo d.C. sono stati inondati dal mare che ha invaso gran parte dell'area costiera su cui sorgeva Baiae, famosa per le sue sorgenti di acque termali. Resti di edifici di lusso, domus, mosaici e porti di attracco sono attualmente sommersi fino a profondità di circa - 15 m rendendo questo sito unico nel suo genere.

Tra le strutture più importanti che circondavano il Baianus Lacus vi sono il Ninfeo di Claudio (I secolo a.C.), un complesso termale di due edifici nei pressi del Ninfeo e una grande villa attribuita alla famiglia Pisoni (Fig. 13). Quest'ultima presenta una pianta rettangolare ed era costituita da più ambienti con gran parte del settore interno occupato da giardini circondati da absidi e colonne. Dati geologici indicano che il sito di Baiae fu attivo almeno fino alla fine del IV secolo dopo Cristo, periodo in cui iniziò il suo declino in seguito all'insorgere del bradisismo e al conseguente inondazione di intere aree del centro abitato [42].

L'intera area archeologica dall'antico porto di Puteoli (l'attuale Pozzuoli) al Baianus Lacus (Baia) è stata mappata nell'ambito di indagini archeologiche subacquee pluriennali e, più recentemente, con indagini geofisiche marine [43, 44, 45]. A partire dagli anni 60 il sito romano sommerso di Baia è stato ampiamente studiato e mappato da numerose campagne subacquee e scavi archeologici. Insieme al primo relitto romano ritrovato al largo di Albenga, Baia è stata una delle maggiori aree per la ricerca e la sperimentazione di nuove

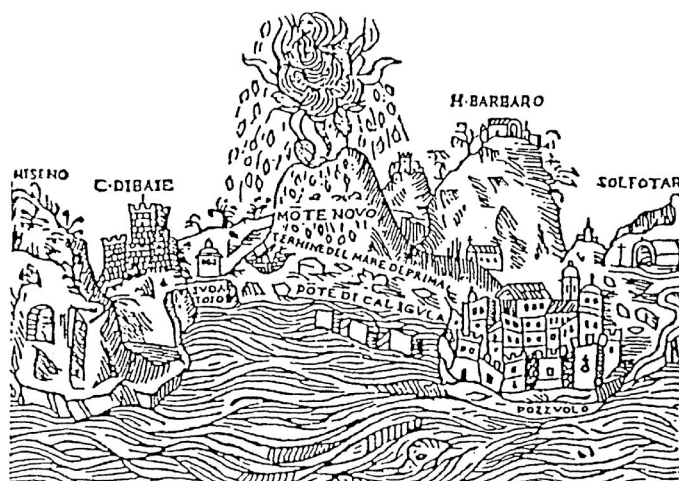


Figura 12. Eruzione di Monte Nuovo come documentata nell'incisione di Delli Falcone del 1539 d.C.



Figura 13 Mappa archeologica dell'area di studio modificata da [42].

tecniche dell'emergente archeologia subacquea italiana. Il sistema di suddivisione dell'area rilevata in riquadri regolari è stato introdotto per la prima volta in quest'area nel corso di progetti mirati alla ricostruzione delle strutture sommerse. Nel 2002 la creazione dell'Area Marina Protetta ha riconosciuto l'importanza delle interrelazioni tra risorse archeologiche e naturali nel parco sommerso di Baia.

5 - ATTIVITA' SVOLTE

5.1 Rilievi batimetrici con sistema MBES



Figura 14. Area rilievi geofisici.

Le operazioni di acquisizione si sono svolte nel mese di novembre del 2021 nella Zona A della AMP di Baia (Fig. 14) su fondali compresi tra 1 e 15 metri di profondità. In tale area sono ubicati i resti di una grande villa denominata Villa dei Pisoni, le Terme del Lacus e il Ninfeo di Claudio. Le rotte seguite sono state sia parallele che perpendicolari alla costa e distanziate fra loro al fine di garantire una copertura del 100% delle aree indagate. I grid di acquisizione sono stati generati con una cella di 10 centimetri. Il rilevamento ha coperto complessivamente un'area di 1.5 Km². Durante il rilievo sono state effettuate misure di velocità del suono nella colonna d'acqua mediante la sonda SVP. I dati di velocità del suono in acqua ottenuti tramite calate SV due volte al giorno a distanza di circa 8 ore, sono stati inseriti nel programma di acquisizione per il calcolo corretto della profondità.

Per l'acquisizione dei dati batimetrici è stato utilizzato il software QINSy (Quality Integrated Navigation System) della QPS (Quality Positioning Services). E' un software di acquisizione di dati idrografici che permette di registrare i dati di batimetria, backscatter e navigazione. Il software consente di costruire una doppia visualizzazione in fase di acquisizione che garantisce, attraverso il controllo dell'operatore, finestre utilizzabili dal pilota e finestre utilizzate dall'acquirente (Fig. 15).

Nella funzione RealTime tutte le strumentazioni inserite nel Progetto sono attivate e visualizzate in diversi pannelli e quando l'operatore attiva l'acquisizione, esse vengono registrate in un file successivamente rielaborabile. Durante l'acquisizione sono disponibili una serie di filtri come il Quality Filter che evidenzia le letture con una bassa qualità, il Nadir Filter che marca i dati esterni meno attendibili, l'Intersect Filter e lo Slope Filter che, applicati in presenza di fondali pianeggianti, eliminano singoli beam o gruppi di beam che mostrano variazioni angolari fra i beam non attendibili.

Sono stati inoltre utilizzati il software Lefebure NTRIP (Network Transport of RTCM data over IP) client che consente di applicare in tempo reale la correzione RTK per il posizionamento ricevendo i dati via internet da un apposito servizio che fornisce dati di posizionamento di una rete di stazioni a terra, e il software Seacast 4.4.0 che fornisce l'interfaccia grafica per dialogare con la sonda SVP usata per le acquisizioni dei dati di velocità del suono lungo la colonna d'acqua.

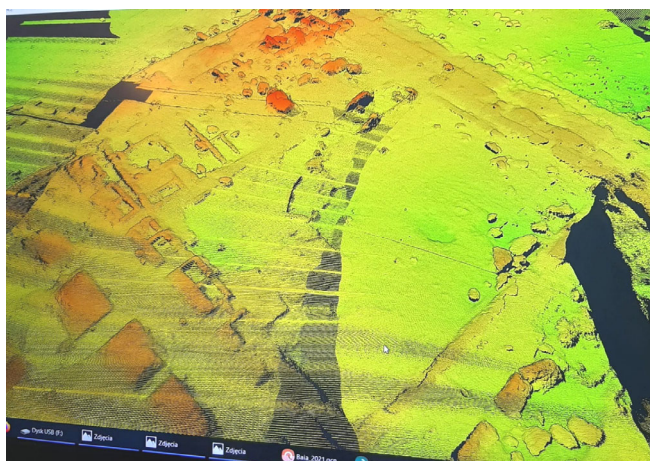


Figura 15. Fase di acquisizione dati batimetrici

L'elaborazione dei dati batimetrici acquisiti con il sistema MBES è stata effettuata utilizzando il modulo di post-elaborazione Qimera del software QPS Qinsy. Questo modulo consente una valutazione approfondita dei dati secondo tre fasi fondamentali:

1) Correzione della posizione, utilizzando un modulo che consente di definire i criteri di base per la correzione automatico dei dati anomali (picchi) dovuti a salti nel sistema di posizionamento e l'intervento manuale per eliminare le registrazioni imprecise; 2) correzione della profondità, mediante un modulo che consente di applicare la compensazione delle maree all'intero set di dati; 3) controllo statistico dei dati, basato sulla definizione di una serie di parametri e regole empiriche per estrarre un insieme di misure affidabili. I dati batimetrici così processati e filtrati sono stati elaborati per ottenere un modello digitale del fondale marino (DTM) ad altissima risoluzione con passo di cella di 0,1 m.

5.2 Rilievi con sistema SBP parametrico



Figura 16. Installazione lungo la murata dell'imbarcazione del sistema SBP parametrico

Sono stati acquisiti oltre 40 km di profili PES ad altissima risoluzione su una griglia di rilevamento formata da 29 linee orientate in direzione WNW-ENE e 20 linee in direzione NNE-SSW, coprendo complessivamente un'area di 0,5 Km² (Fig. 17). L'intervallo batimetrico dell'area indagata è di 1-15 m. La distanza media di interlinea è stata di circa 20 m. Il rilevamento è stato effettuato a bordo di un gommone con basso pescaggio. L'ecoscandaglio è stato fissato su un'asta di ferro fissata al fianco dell'imbarcazione (Fig. 16).

La risposta acustica complessiva del fondo marino è stata complessivamente molto buona anche se la presenza di strutture archeologiche presenti a fondo mare ha limitato la penetrazione acustica del fondale. I profili PES sono stati registrati utilizzando il software della Innomar SESWIN del sub-bottom profiler SES_2000, in formato proprietario ISE che conserva tutte le informazioni originali relative ad ogni singolo impulso della sorgente acustica, tra cui il numero di eventi, il posizionamento, la profondità in metri, etc. I dati sono stati esportati anche nel formato sismico standard SEG-Y, gestibile con un qualunque software dedicato al processing sismico.

Durante il rilievo, sono state utilizzate diverse impostazioni di filtro e display di controllo per verificare la qualità dei dati. L'alta frequenza di ping (fino a 40 impulsi/s), combinata con la bassa velocità dell'imbarcazione (2-3 nodi), ha permesso di ottenere un'elevata copertura laterale (punti dati ogni 5-10 cm lungo la linea). Nonostante l'elevata attenuazione del segnale dovuta alla presenza dei depositi vulcanici, la penetrazione del segnale ha raggiunto i 12 ms TWT (~10 m). Il sistema di navigazione inerziale POS-MV WaveMaster ha consentito di filtrare il movimento delle onde e determinare il posizionamento della nave con una precisione centimetrica. La velocità del suono nell'acqua di mare è stata registrata in continuo tramite profilatore di velocità del suono. Le frequenze di acquisizione sono comprese tra 6 e 12 kHz con una durata dell'impulso di 100 μ s. Ciò ha portato a una risoluzione verticale di 0,1 m.

L'elaborazione dei dati PES è stata eseguita utilizzando il pacchetto software di post-elaborazione ISE3 fornito da Innomar. La sequenza di elaborazione ha previsto l'applicazione di filtri di banda, la normalizzazione del guadagno dei dati, la riduzione del rumore (cioè il filtro di smoothing per la riduzione del segnale-rumore) e il muting della colonna d'acqua. Il WaveMaster POS-MV ha consentito una vera compensazione dell'onda e del movimento. La conversione da tempo a profondità è stata applicata utilizzando i dati del sound velocity

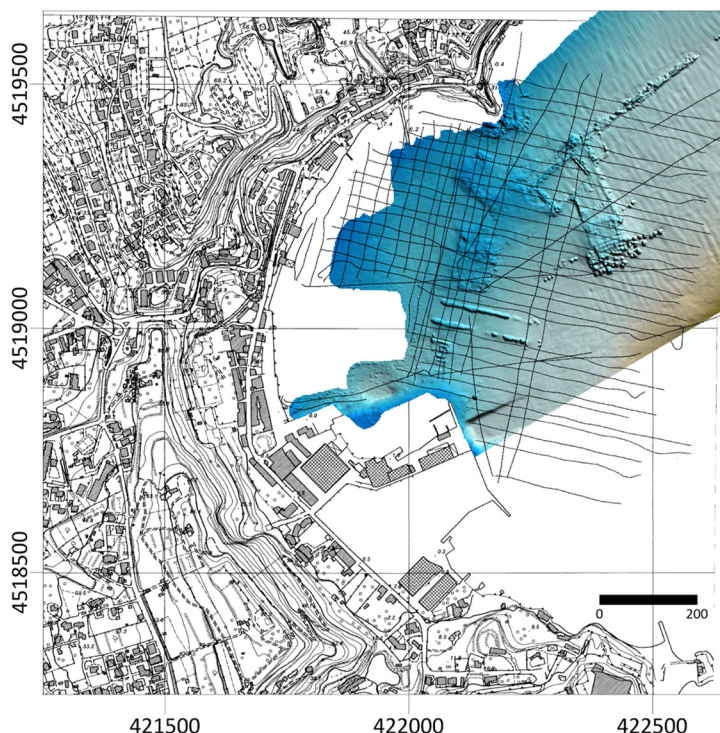


Figura 17. Griglia di acquisizione dati SBP_PES

permesso di individuare i caratteri vegetazionali e la natura del fondale che hanno fornito il “groutd-hruting” per tarare i rilievi effettuati con sistema MBES. Le immagini acquisite hanno confermato l’esistenza di matte di Posidonia consentendo di individuare un habitat prioritario per la istituzione di un SIC marino. Le immagini e i filmati acquisiti hanno permesso di individuare i caratteri delle strutture archeologiche e delle principali comunità biologiche associate. I dati ROV così acquisiti consentono di convalidare le evidenze derivanti dai dati indiretti e fornire indicazioni circa la componente biotica e abiotica dei fondali investigati.

5.4 Prospezioni geoelettriche

I rilievi ERT sono stati effettuati sia in modalità statica che dinamica e hanno interessato settori selezionati di spiaggia sommersa della AMP di Baia su un'area di circa 5000 metri quadrati. La modalità statica è stata utilizzata fino a una distanza di 47 m dalla linea di costa (Fig. 19). Quest’area è stata indagata attraverso misurazioni lungo linee parallele con distanza d’interlinea e interelettrodo di un 1 m. Per il rilievo è stato usato un cavo multimodale con 48 elettrodi in acciaio inossidabile adagiato sul fondale marino lungo i transetti di indagine predefiniti, mentre l’unità di misura della resistività Syscal Pro è stata posizionata sulla costa. I dati di resistività tomografica apparente sono stati acquisiti tramite un protocollo polo-dipolo che combina misure dirette e inverse, mentre per aumentare il rapporto segnale/rumore e mappare la stratigrafia più profonda sono state impiegate combinazioni multiple di N separazioni (distanza tra l'elettrodo di corrente e il dipolo di potenziale) con spaziatura unitaria degli elettrodi. La georeferenziazione degli angoli dell'area indagata e delle misure batimetriche è stata condotta tramite stazione totale.



Figura 18. Esempio di immagine acquisita con sistema ROV

profiler per la colonna d'acqua e un valore di 1650 m/s per i sedimenti del sottosuolo, considerato rappresentativo di depositi marini vulcanoclastici poco profondi e non consolidati (Rosi e Sbrana, 1983). I profili processati sono stati riportati con un'esagerazione verticale di 10 ×, per visualizzare meglio l'architettura stratigrafica del sottofondo.

5.3 Ispezioni visive tramite ROV

Sono state eseguite otto calate ROV in diversi luoghi dell’AMP di Baia. I filmati e le immagini acquisite sono stati registrati su supporto digitale e visionati per l’analisi (Fig. 18). Le informazioni ottenute hanno fornito elementi per caratterizzare il fondale sia su basi sedimentologiche e biologiche che archeologiche. In particolare le ispezioni visive tramite ROV hanno



Figura 19. Collegamento della strumentazione Syscal Pro/Switch con il cavo di acquisizione nero per l'esecuzione delle misure ERT statiche.

La modalità di misurazione dinamica è stata utilizzata per mappare le proprietà elettriche del sottofondo marino in settori più profondi della spiaggia sommersa (fino a circa -4m) su un'area di circa 2500 metri quadrati (Fig. 20). In questo caso si è fatto uso di un cavo composto da 13 elettrodi di grafite con una separazione reciproca di 1 m, posizionato a fondo mare, con l'unità ricevente multicanale Syscal Pro posizionata su una barca. La geometria utilizzata ha consentito di registrare dieci letture di resistività apparente dipolo-dipolo da diversi strati con una singola iniezione di corrente, facilitando così l'applicazione sul campo della modalità dinamica. Oltre al cavo subacqueo, il sistema Syscal Pro gestisce il sensore GNSS e il dispositivo sonar ed è

sincronizzato con un touchpad che esegue uno speciale software di gestione per registrare in contemporanea le misure di resistività e la batimetria. Anche in questo caso il rilievo è stato effettuato lungo rotte predefinite e parallele tra loro a velocità relativamente ridotta (~1-2m/sec).

L'elaborazione delle singole linee ERT statiche e dinamiche 2-D ha seguito una specifica procedura (rimozione degli outlier, correzione per la batimetria e la resistività dell'acqua marina misurata con un conduttimetro ad alta precisione) per la valutazione della qualità del dato nel delineare potenziali strutture archeologiche sepolte. Inoltre sono stati utilizzati approcci di elaborazione e inversione tridimensionale per la compilazione di sezioni più profonde all'interno del fondale marino.

5.5 Prospezioni Georadar (GPR)

L'indagine con sistema GPR ha utilizzato il Sensore e relativo Software dedicato della Noggin Plus e antenna a 250 MHz. Le misurazioni hanno interessato un settore di spiaggia emersa lungo un'area di circa 2.800 metri quadrati a ridosso della linea di costa (fig. 2a). I dati sono stati acquisiti lungo transetti paralleli con interlinea di 0,5 m e l'intervallo di campionamento lungo ogni linea di 0,05 m all'interno di tre griglie di acquisizione. Successivamente il segnale dei singoli transetti GPR è stato migliorato con l'impiego di una routine di elaborazione standard (riposizionamento della traccia, correzione del tempo zero, sottrazione dello sfondo con filtro dewow, spreading e guadagno di compensazione esponenziale). La velocità del segnale elettromagnetico è stata calcolata attraverso l'adattamento di un'iperbole alle rispettive riflessioni presenti nei radargrammi. Quindi è stata applicata una trasformata di Hilbert per calcolare l'ampiezza istantanea ed estrarre diverse sezioni in base alla velocità calcolata.



Figura 20. Layout delle linee ERT dinamiche sovrapposto a un'immagine satellitare di Google Earth dell'area di studio.

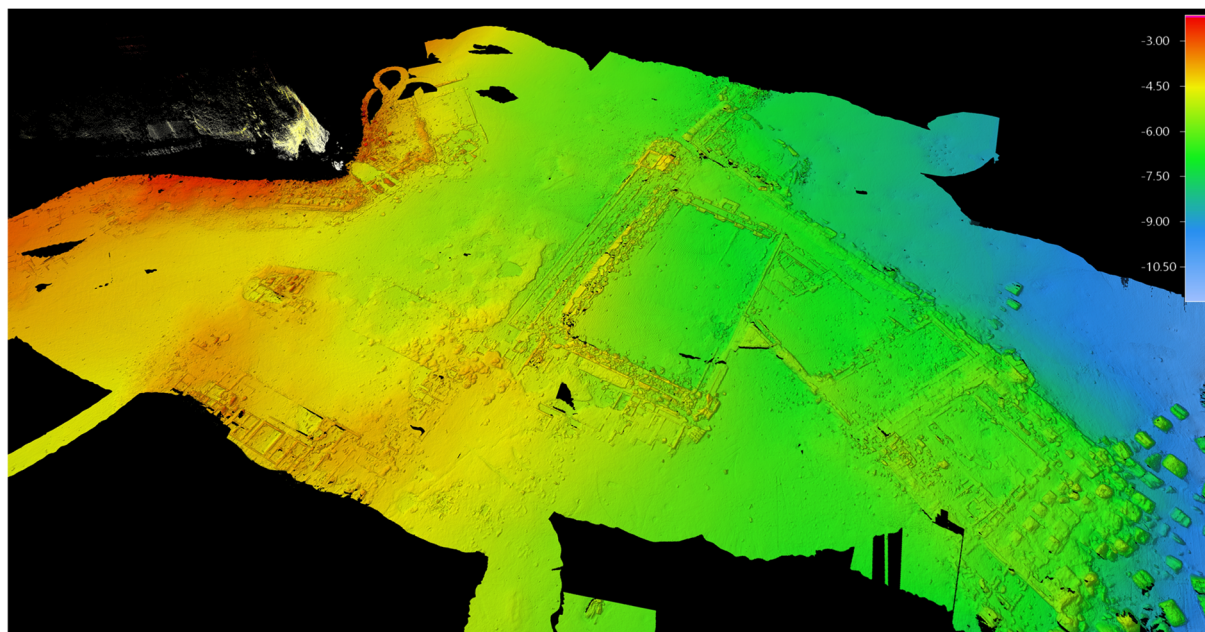


Figura 21. Mappa di rilievo ombreggiata della Villa dei Pisoni situata al largo di Punta Epitaffio (Area A dell'Area Marina Protetta di Baia) basata su un DEM con passo di cella di 10cm.

6 - RISULTATI PRELIMINARI

Le attività svolte nel Parco Archeologico Sommerso di Baia nell'ambito di una convenzione operativa dal titolo " Tecnologie geofisiche e geo-ambientali per il monitoraggio, la fruizione e la conservazione di beni archeologici sommersi" durate il biennio 2020-2022 hanno riguardato l'acquisizione di dati 1) batimetrici ad altissima risoluzione, 2) dati sismo-acustici ad altissima risoluzione, 3) dati geoelettrici e 4) dati elettromagnetici georadar. Vengono di seguito riportati i risultati preliminari di tali indagini sulla base di una prima interpretazione dei dati.

6.1 Batimetria multifascio

Le misure batimetriche con ecoscandaglio multifascio Norbit Winghead hanno consentito la produzione di carte tematiche ad altissima risoluzione che illustrano con elevato grado di dettaglio i caratteri archeologici, sedimentologici e geomorfologici dei fondali investigati, anche attraverso rappresentazioni tridimensionali e a rilievo ombreggiato (Fig. 21). Il rilievo MBES ha interessato l'area A della AMP di Baia dove mappando nel dettaglio i resti archeologici della così detta Villa dei Pisoni, delle Terme del Lacus e il ninfeo triclinio di Claudio. Le strutture mappate si trovano a una profondità compresa tra 0 e 10 metri, testimoniando il forte controllo del bradisismo negli ultimi 2 Ka. Il complesso della Villa si trova a circa 150 m a sud-est della costa di Punta Epitaffio. È composto da diversi ambienti con una struttura principale a pianta rettangolare che si sviluppa per 240x70 m in direzione N160E e una struttura minore sempre a pianta rettangolare allungata in direzione N45N per 100x70 m. I rilievi effettuati oltre a confermare la forma generale e le dimensioni derivanti dalle precedenti indagini archeologiche ha rivelato dettagli e ambienti finora sconosciuti come la presenza di una peschiera lungo la parte terminale della Villa e aree di attracco nella zona Nord. E' stato possibile anche individuare un possibile Viridarium del I sec.

Verso mare, il complesso della Villa continua con diversi ambienti che sono stati interpretati come vasche per la conservazione del pesce, magazzini, moli e banchine. Nella parte più meridionale del complesso sono visibili due allineamenti di Pilae allungate in direzione N60E. Tali strutture, la cui base è a circa -10 m, raggiungono in media i 7 m di profondità, e facevano parte di un sistema di frangiflutti costruito per proteggere la Villa dai venti di sud-est. Nell'angolo NW della Villa sono visibili i resti della Via Herculanea che collegava Baia con Pozzuoli. Questa struttura costituiva il limite verso mare dell'antico lago di Lucrino, sede del porto

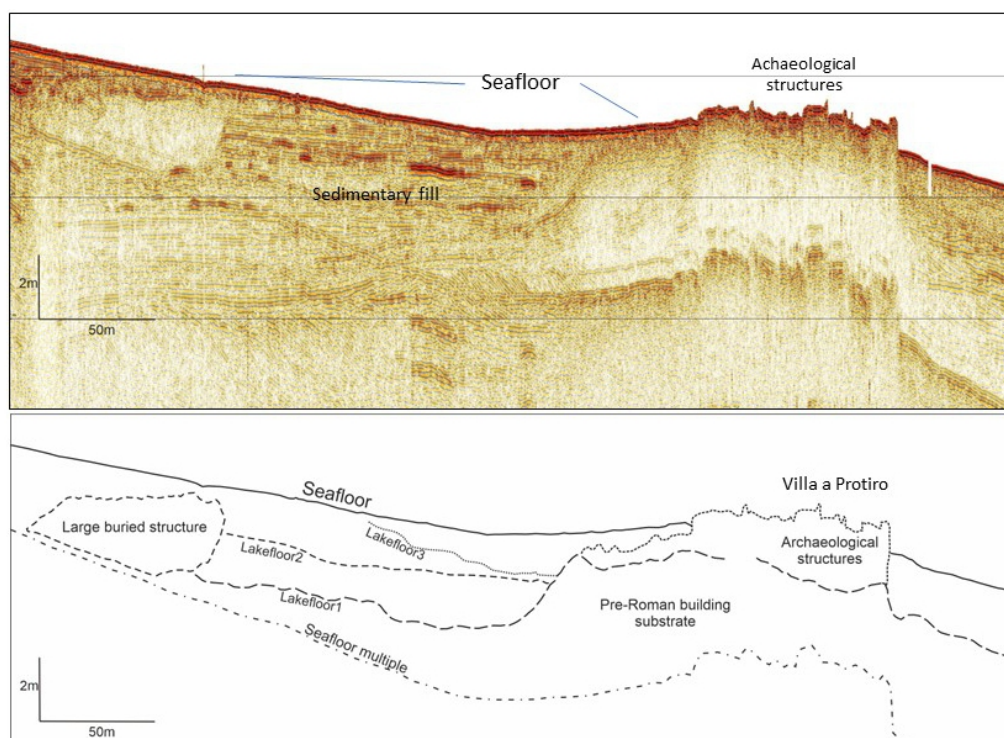


Figura 22. Esempio di sezione sub-bottom PES elaborata con relativa interpretazione.

militare romano. La Via Herculanea si sviluppa in direzione N60E e si raccorda con l'ambulacro presente lungo il perimetro nord della Villa dei Pisoni.

6. 2 Analisi sismostratigrafica

Le indagini sismostratigrafiche condotte nel sito romano sommerso di Baiae con l'ecoscandaglio parametrico SES-2000 hanno restituito immagini ad altissima risoluzione del sotto-fondo marino la cui interpretazione di dettaglio consentirà di mappare con elevato grado di dettaglio sia i target archeologici sia l'architettura stratigrafica confermando l'elevata affidabilità del PES nelle indagini archeologiche in ambienti di acque basse (Fig. 22). I segnali sismo-acustici hanno penetrato il fondale fino a circa 6 ms TWT (circa 8 m) di profondità. La massima penetrazione è stata registrata in aree più profonde. D'altra parte la penetrazione è stata leggermente inferiore in aree di fondo mare in cui la presenza di strutture archeologiche emergenti ha localmente causato l'attenuazione e la copertura del segnale sismico.

L'interpretazione preliminare dei dati sismici è molto promettente. Per la prima volta è stato ottenuto un quadro dettagliato dell'organizzazione stratigrafica dell'antico Baianus Lacus. I profili sismici hanno anche rivelato numerosi potenziali target archeologici sepolti. Le dimensioni delle strutture sepolte variano da varie decine di metri a pochi decimetri. Un primo confronto tra sezioni sismiche ha permesso di ricostruire un quadro dettagliato del paesaggio sepolto con importanti informazioni sulle caratteristiche originali e sulla forma dell'antico Baianus Lacus. Ottimi risultati sono stati ottenuti anche in acque molto basse, fino a circa -1 m, nonostante la bassa penetrazione dovuta alla presenza di riflessioni multiple. Qui sono state rilevate strutture artificiali sepolte ed elementi morfologici negli strati più alti del fondale marino. In acque relativamente più profonde (4-5 m) la lettura dei sismogrammi ha permesso di individuare la superficie di costruzione originaria dei principali edifici romani, rivelando le caratteristiche topografiche dell'area di studio in epoca pre-romana. Infine l'interpretazione preliminare dei dati ha permesso l'identificazione di diverse sequenze sismostratigrafiche nel contesto sedimentario del Baianus Lacus. L'analisi sismo-stratigrafica delle sequenze identificate fornirà importanti informazioni per ricostruire la storia geologica dell'area di studio.

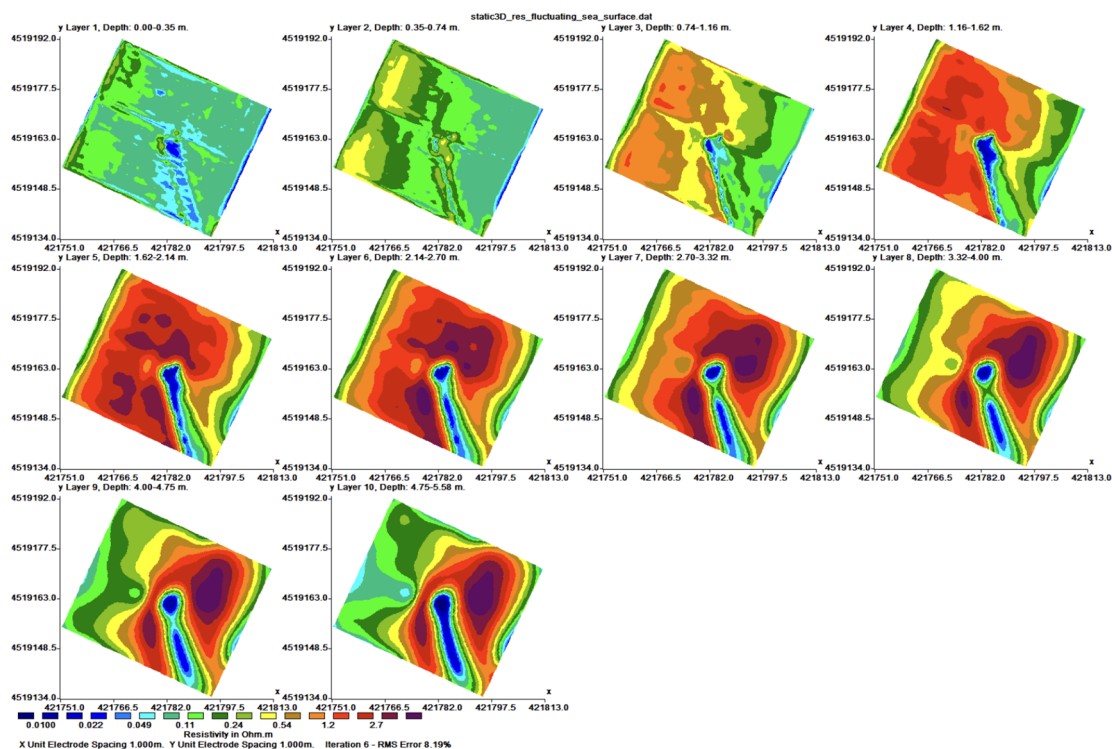


Figura 23. Sezioni orizzontali che illustrano i valori di resistività estratti dal modello di inversione tridimensionale del rilievo ERT statico.

6.3 Tomografia elettrica

6.3.1 Rilievo ERT statico

Il modello di inversione della resistività 3D dei dati geoelettrici acquisiti in modalità statica ha mostrato un errore RMS relativamente basso (8,2%) che indica la buona qualità dei dati raccolti (Fig. 23). Il sottofondo marino è stato suddiviso in dieci strati di spessore progressivamente crescente fino alla profondità di 5,6 metri. L'intero intervallo esaminato indica la presenza di un elemento conduttivo lineare con valori di resistività inferiori a 0,05 Ohm-m, caratteristiche di un oggetto metallico. L'oggetto individuato ha uno spessore medio di 3,5 m e un orientamento quasi nord-sud. La sua lunghezza visibile è di oltre 27 m e sembra estendersi più a sud e al di fuori dei limiti della griglia di acquisizione. Dall'osservazione in situ e dalle informazioni fornite dalla popolazione locale, si può ricondurre l'oggetto in questione a un fumaiolo di nave. Per eliminare le interferenze causate dalla presenza di tale oggetto sono state considerati esclusivamente i profili ERT che coprono la metà settentrionale della griglia, escludendo le linee meridionali che attraversano questa struttura. Il rispettivo modello di inversione 3D presenta un RMS ancora più ridotto (3,76%) rispetto al modello dell'intera griglia. Inoltre, le caratteristiche resistive dei primi 1,5 m del sotto-fondale marino indicano la presenza di probabili resti strutturali appartenenti a un ampio complesso edilizio.

6.3.1 Rilievo ERT dinamico

La distribuzione spaziale dei dieci profili ERT acquisiti in modalità dinamica e la maggiore distanza di interlinea (4-10 m) rispetto alla distanza lineare degli elettrodi (~1 m) ha impedito l'elaborazione 3D dei dati tomografici. Quindi le linee sono state considerate individualmente in un contesto 2D utilizzando parametri di elaborazione simili, al fine di estrarre la distribuzione verticale della resistività lungo le sezioni specifiche. I modelli di inversione 2D delineano una stratigrafia formata da materiali con diverse proprietà di resistività fino a una profondità di circa 3 m al di sotto del fondale marino. Tutti i profili mostrano uno strato resistivo più spesso a profondità superiori a 2-2,5 m, con superficie superiore ondulata e valore di resistività superiore a 0,8 Ohm-m. I livelli soprastanti con valori di resistività nell'intervallo 0,3-0,8 Ohm-m corrispondono a

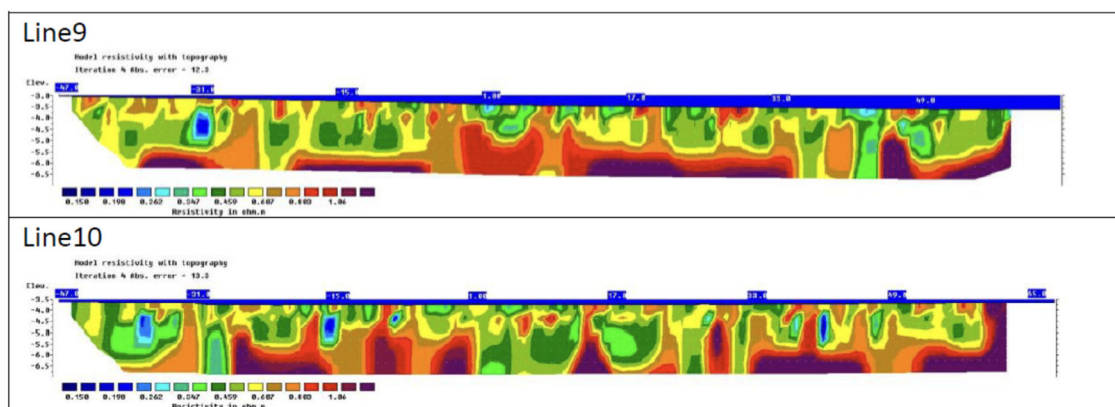


Figura 24. Sezione di resistività verticale 2D lungo due linee rappresentative del rilievo ERT dinamico con indicazione delle anomalie di resistività presenti fino a 1 m al di sotto del fondale marino.

depositi più sottili. All'interno di questi livelli superiori sono state rilevate anomalie puntiformi di resistività a profondità inferiori al metro al di sotto il fondale marino, che possono indicare la presenza di strutture archeologiche. L'interpretazione delle anomalie di resistività puntiformi e poligonali indica la presenza di strutture archeologiche sepolte a fondo mare e il loro possibile raccordo con gli edifici romani presenti lungo la costa (Fig. 24).

6.4 Georadar

Le sezioni GPR mostrano una forte attenuazione del segnale elettromagnetico a profondità superiori a 40-50 cm, soprattutto nella sezione più vicina alla linea di costa. Inoltre, le sezioni orizzontali più superficiali evidenziano alcune forti riflessioni lungo il confine occidentale della griglia GPR. La natura di queste aree ad alta riflettività è duplice: l'aumento dell'umidità dovuto al flusso dell'acqua lungo i piccoli corsi d'acqua e l'accumulo di pietre e ciottoli in superficie. Pertanto, l'esistenza di questi fattori esterni ha oscurato qualsiasi segnale elettromagnetico che potrebbe essere attribuito a potenziali elementi archeologici del sottosuolo.

7 - RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano l'equipaggio e i tecnici delle imbarcazioni utilizzate, per la professionalità dimostrata e l'indispensabile contributo fornito durante le fasi di acquisizione dati. Si rivolge, in particolare, un ringraziamento al Direttore del PAFLEG per il supporto logistico e organizzativo fornito durante le campagne di acquisizione in mare.

8 - BIBLIOGRAFIA

- [1] Arnold J.B., Weddle R.S., "The Nautical Archaeology of Padre Island", Academic Press, New York, 1978.
- [2] G.F. Caston, "Wreck marks: indicators of net sand transport", Marine Geology, vol. 33, 1979, pp. 193-204.
- [3] M. Redknap, G. Fleming, "The Goodwins Archaeological Survey: towards a regional marine site register in Britain", World Archaeology, vol. 16, 1985, pp. 312-328.
- [4] M. Redknap, "Surveying for underwater archaeological sites: signs in the sands", The Hydrographic Journal, vol. 58, 1990, pp. 11-16.
- [5] Mayer, L. A., Calder, B. R. and Schmidt, J. S., "High-Resolution Multibeam Sonar Survey and Interactive 3-D Exploration of the D-Day Wrecks off Normandy", Fall Meeting EOS Transactions, American Geophysical Union (Abs.), San Francisco, 8-12 December, 2003, pp 84-46.
- [6] Wille, P., "Sound Images of the Ocean in Research and Monitoring". Berlin, Germany, Springer, 2005.

- [7] Brennan, M.L., Ballard, R.D., Roman, C., Bell, K.L.C., Buxton, B., Coleman, D.F., Inglis, G., Köyagasioglu, O., Turanlı, T., “Evaluation of the modern submarine landscape off southwestern Turkey through the documentation of ancient shipwreck sites”, *Continental Shelf Research* vol. 43, 2012, 55-70.
- [8] Violante C., “A geophysical approach to the fruition and protection of underwater cultural landscapes. Examples from the Bay of Napoli, southern Italy”, In: Aveta, A., Marino, B.G., Amore R. (eds.), *La Baia di Napoli. Strategie per la conservazione e la fruizione del paesaggio culturale*, vol. 1, pp. 66-70, 2018, ISBN: 978-88-99130.
- [9] Plets, R., Quinn, R., Forsythe, W., Westley, K., Bell, T., Benetti, S., McGrath, F., Robinson, R., “Using multibeam echo-sounder data to identify shipwreck sites: archaeological assessment of the Joint Irish bathymetric survey data” *International Journal of Nautical Archaeology*, vol. 40 (1), 2011, pp. 87-98.
- [10] Bates, C.R., Lawrence, M., Dean, M., Robertson, P., “Geophysical Methods for Wreck-Site Monitoring: The Rapid Archaeological Site Surveying and Evaluation (RASSE) programme”, *Int. J. Naut. Archaeol.*, 2011, vol. 40, pp. 404–416.
- [11] Grzadziel, A., “Using Remote Sensing Data to Identify Large Bottom Objects: The Case of World War II Shipwreck of General von Steuben”, *Geosciences*, vol. 10, 240, 2020, pp. 1-15, doi:10.3390/geosciences10060240.
- [12] Lawrence, M. L. and Bates, C. R., “Acoustic Ground Discrimination Techniques for Submerged Archaeological Site Investigations”, *Marine Technology Society Journal* vol. 35 (4), 2005, pp. 65–73.
- [13] Westley, K., Quinn, R., Forsythe, W., Plets, R., et al., “Mapping Submerged Landscapes Using Multibeam Bathymetric Data: a case study from the north coast of Ireland. *International Journal of Nautical Archaeology*, vol. 40(1), pp. 99-112.
- [17] Warren D., Wu C. W., Church R.A., Westrick R., “Utilization of multibeam bathymetry and backscatter for documenting and planning detailed investigations of deepwater archaeological sites”. In: *Proceedings of Offshore Technology Conference*, 3–6 May, Houston, 2010, pp 1–8.
- [18] Quinn, R., “The role of scour in shipwreck site formation processes and the preservation of wreck-associated scour signatures in the sedimentary record evidence from seabed and sub-surface data. *Journal of Archaeological Science*, vol. 33 (10), 2006, pp. 1419-1432.
- [19] Quinn, R., Boland, D., “The role of time-lapse bathymetric surveys in assessing morphological change at shipwreck sites”. *Journal of Archaeological Science*, vol. 37 (11), 2010, pp. 2938-2946.
- [14] Mertes, J.R., Zant, C.N., Gulley, J.D. and Thomsen, T.L., “Rapid, quantitative assessment of submerged cultural resource degradation using repeat video surveys and Structure from Motion”, *Journal of Maritime Archaeology*, vol. 12, 2017, pp. 91–107.
- [15] Yamafune, K., Torres, R. and Castro, F., “Multi-image photogrammetry to record and reconstruct underwater shipwreck sites”, *Journal of Archaeological Method and Theory*, vol. 24 (3), 2016, pp. 703–725.
- [16] Kan, H., Katagiri, C., Nakashima, Y., Yoshizaki, S., Nagao, M., Ono, R., “Assessment and Significance of a World War II battle site: recording the USS Emmons using a High-Resolution DEM combining Multibeam Bathymetry and SfM Photogrammetry”, *The International Journal of Nautical Archaeology*, vol. 47(2), 2018, pp. 267–280, doi: 10.1111/1095-9270.12301.
- [20] Hecht S. and Fassbinder J. W. E. (2006) A view beneath the soil: Application of magnetometry and Electrical Resistivity Tomography (ERT) in geoarchaeological research. *Geographische Rundschau*, 58(4), 38-45.
- [21] Scollar, I., A. Tabbagh, A. Hesse and I. Herzog (1990). *Archaeological Prospecting and Remote Sensing*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [22] Simyrdanis, K., Papadopoulos, N., Kim, J.H., Tsourlos, P., and Moffat, I. (2015) Archaeological Investigations in the Shallow Seawater Environment with Electrical Resistivity Tomography. *Journal of Near Surface Geophysics, Integrated geophysical Investigations for Archaeology*, 13, 601 – 611.
- [23] Papadopoulos N. 2021. Shallow Offshore Geophysical Prospection of Archaeological Sites in Eastern Mediterranean. *Remote Sensing*. 13(7):1237. doi.org/10.3390/rs1307123.
- [24] Annan, A.P. (2002). GPR—History, Trends, and Future Developments. *Subsurf. Sens. Technol. Appl.* 3, 253–270.
- [25] Annan, A.P. (2009). Chapter 1 - Electromagnetic Principles of Ground Penetrating Radar. In *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*, Harry M. Jol, ed. (Amsterdam: Elsevier), pp. 1–40.

- [26] Muller S and Wunderlich J 2003 Detection of embedded objects using parametric sub-bottom profilers, *Int. Hydrogr. Rev.*, 4(3), 76–82.
- [27] Wunderlich J, Wendt G and Müller S 2005 High-resolution echosounding and detection of embedded archaeological objects with nonlinear sub-bottom profilers. *Marine Geophysical Researches*, 26, 123–133.
- [28] De Natale G., Troise C., Pingue F., Mastrolorenzo G., Pappalardo L., Battaglia M., Boschi E. (2006) The Campi Flegrei Caldera: Unrest mechanisms and hazards, in Troise C. et al. (eds.) *Mechanisms of Activity and Unrest at Large Calderas*, Geological Society Special Publications, 269, 25–45.
- [29] Rosi M., Sbrana A., Principe C. (1983) The Phlegraean Fields: Structural evolution, volcanic history and eruptive mechanisms. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 17, 273–288.
- [30] Fedele F.G., Giaccio B., Isaia R., Orsi G. (2003) The campanian ignimbrite eruption, Heinrich event 4, and palaeolithic change in Europe: a high-resolution investigation. *Volcanism and the Earth's Atmosphere* 139, 301–325.
- [31] Deino A.L., Orsi G., de Vita S., Piochi M. (2004) The age of Neapolitan Yellow Tuff caldera forming eruption (Campi Flegrei caldera, Italy) assessed by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating method. *J. Volcanol. Geoth. Res.* 133, 157–170.
- [32] D'Antonio M., Civetta L., Orsi G., Pappalardo L., Piochi M., Caradente A., de Vita S., Di Vito M.A., Isaia R. (1999) The present state of the magmatic system of the Campi Flegrei caldera based on a reconstruction of its behavior in the past 12 Ka. *J. Volcanol. Geoth. Res.* 91, 247–268.
- [33] Cinque A., Rolandi G., Zamparelli V., (1985) L'estensione dei depositi marini olocenici nei Campi Flegrei in relazione alla vulcano-tettonica. *Boll. Soc. Geol. It.* 104, 327–348.
- [34] Isaia R., Vitale S., Marturano A., Aiello G., Barra D., Ciarcia S., Iannuzzi E., Tramparulo F. (2019) High-resolution geological investigations to reconstruct the long-term ground movements in the last 15 kyr at Campi Flegrei caldera (southern Italy). *J. Volcanol. Geoth. Res.* 385, 143–158.
- [35] Lyell C. (1850) *Principles of Geology*, pp. 489–498. J. Murray, London.
- [36] Morhange C., Marriner N., Laborel J., Todesco M., Oberlin C. (2006) Rapid sea-level movements and non-eruptive crustal deformation in the phlegrean Fields caldera. Italy. *Geology*, 34, 93–96.
- [37] Toledo P.G. (1539) *Ragionamento del Terremoto del Nuovo Monte dell'Aprimento di Terra in Pozzuolo nell'Anno 1538, e dela significatione d'essi*, Naples, Giovanni Sultzbach, 16 pp.
- [38] Del Gaudio C., Aquino I., Ricciardi G.P., Ricco C., Scandone R. (2010) Unrest episodes at Campi Flegrei: a reconstruction of vertical ground movements during 1905–2009. *J. Volcanol. Geoth. Res.* 195 (1), 48–56.
- [39] Berrino G., Corrado G., Luongo G., Toro B. (1984) Ground deformation and gravity changes accompanying the 1982 Pozzuoli uplift. *Bulletin Volcanologique*, 47 (2), 187–200.
- [40] Vaselli O., Tassi F., Tedesco D., Poreda J., Caprai A. (2011) Submarine and inland gas discharges from the Campi Flegrei (Southern Italy) and the Pozzuoli Bay: geochemical clues for a common hydrothermal-magmatic source. *Earth and Planetary Science*, 4, 57–73.
- [41] Livio, XII, 16, 3–4, Mores Virique Romani, Antologia Viviana, 1957, Ardia, Napoli.
- [42] Pappalardo U, Russo F 2001 Il bradisismo dei Campi Flegrei (Campania): dati geomorfologici ed evidenze archeologiche, in: P. Gianfrotta, F. Maniscalco (Eds) "Forma Maris, Forum Internazionale di Archeologia Subacquea", Pozzuoli (Naples), Massa Editore, Napoli, 107–129.
- [43] Violante C 2017 A geophysical approach to the fruition and protection of underwater cultural landscapes. Examples from the Bay of Napoli, southern Italy, In: Aveta, A., Marino, B.G., Amore R. (eds.), *La Baia di Napoli. Strategie per la conservazione e la fruizione del paesaggio culturale*, 1, 66–70, ISBN: 978-88-99130.
- [44] Violante C, Buonocunto F, Esposito E, Ferraro L, Giordano, L 2019 The Submerged Cultural Landscape: Examples from the Bay of Naples. In: E. Fasano, A. Scamardella and V. Bucci (Eds.) *Nautical and Maritime Culture, from the Past to the Future. Progress in Marine Science and Technology*, IOS Press, Vol. 3, 212–219. Doi:10.3233/PMST3. ISSN: 2543-0963.
- [45] Passaro S, Barra M, Saggiomo R, Di Giacomo R, Leotta A, Uhlen H, Mazzola S 2103 Multiresolution morpho-bathymetric survey results at the Pozzuoli-Baia underwater archaeological site (Naples, Italy), *Journal of Archaeological Science*, vol. 40(2), 1268–1278.

- [46] Rosi M., Sbrana A., Principe C. (1983) The Phlegraean Fields: Structural evolution, volcanic history and eruptive mechanisms. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 17, 273–288.