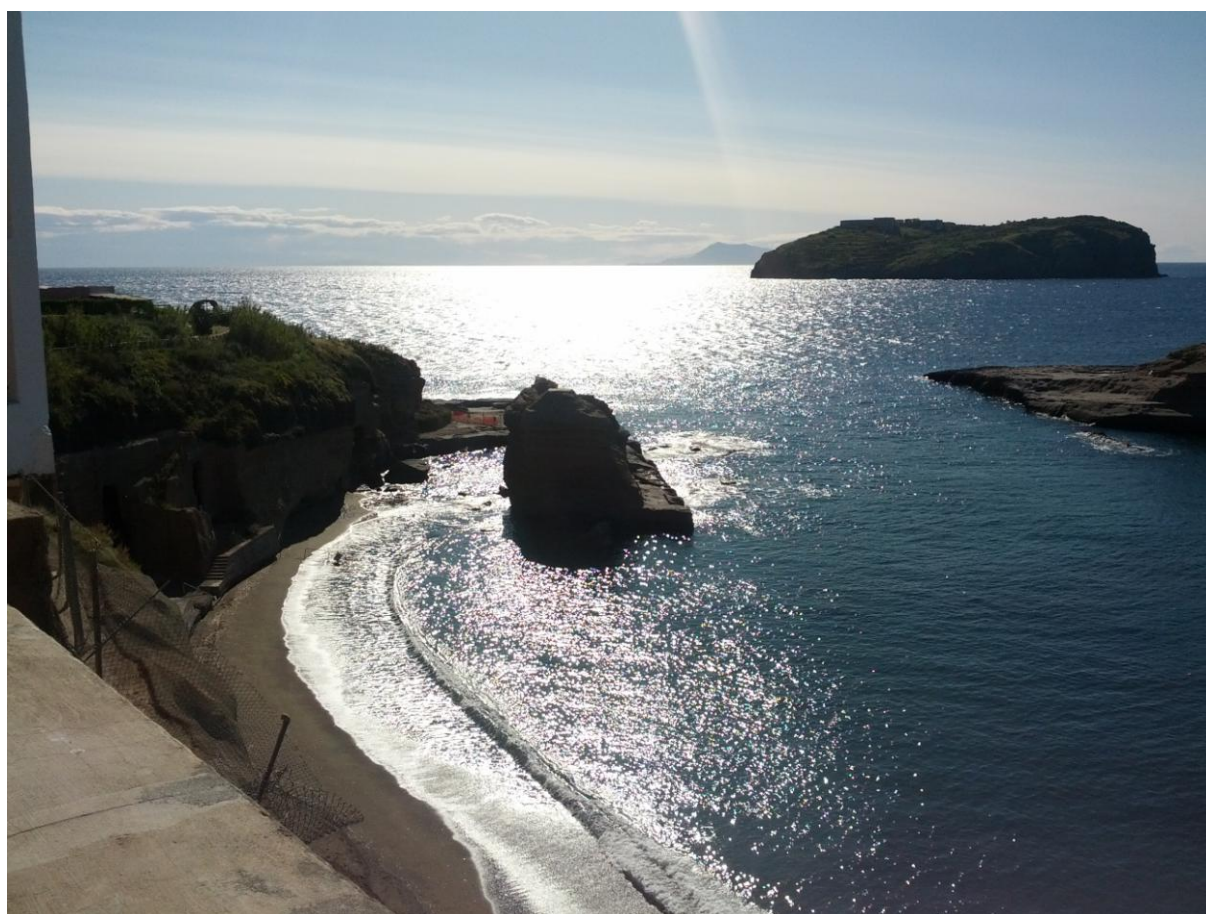


CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE
Istituto per l'Ambiente Marino Costiero



Prospezione sismica terra-mare: l'esempio di
Procida e Ventotene

TECHNICAL REPORT N. 02/IAMC/GF/2013



in copertina Vista della spiaggia di Cala Nave - Ventotene

A cura di:

Vincenzo Di Fiore¹, Gemma Aiello¹, Ines Alberico¹, Fabrizio Lirer¹, Nicola Pelosi¹, Michele Punzo¹, Daniela Tarallo¹, Laura Giordano¹, Francesco Paolo Buonocunto¹, Antimo Angelino¹, Michele Iavarone¹, Paolo Scotto di Vettimo¹, Salvatore Mazzola¹.

¹IAMC - CNR (Istituto per l'Ambiente Marino Costiero, Napoli)

INDICE

1. Introduzione	1
2. Breve inquadramento geologico	3
3. Metodologia e Strumentazione	6
4. Acquisizione dei dati	9
5. Elaborazione dei dati	11
5. Bibliografia	14

1. Introduzione

Una campagna di rilievi sismici è stata progettata per studiare gli ambienti di transizione terra-mare. Le aree scelte come test sono state l'isola di Procida, che fa parte del distretto vulcanico dei Campi Flegrei, e l'isola di Ventotene, appartenente all'arcipelago Pontino.

I settori di transizione terra-mare sono sistemi dinamici in continua e rapida evoluzione, strettamente connessi ad un contesto ambientale molto più complesso di quello che solitamente viene rappresentato. Tali settori, infatti, sono interessati da processi idrodinamici sia di breve periodo (maree, correnti, onde e venti) che su grande scala temporale (ad esempio, il cambiamento di posizione del livello del mare). L'evoluzione di tali aree è collegata a processi morfodinamici che sono propri dell'ambiente costiero e che, nel caso specifico, si trovano a interagire con i complessi fenomeni vulcanici. In una simile situazione, la giusta e corretta conoscenza geologica è legata anche alla caratterizzazione sismica dei depositi superficiali in termini sismo-stratigrafici e delle proprietà fisico meccaniche (velocità delle onde sismiche, contrasti di impedenza, geometrie e spessori).

Il gruppo di geofisica del CNR-IAMC di Napoli (Istituto per l'Ambiente Marino Costiero), coordinato dal dott. Vincenzo Di Fiore, ha effettuato nelle suddette aree dei test di acquisizione sismica per testare la metodologia ed eventualmente affinare la tecnica per raggiungere risultati più attendibili. Nella presente relazione vengono illustrate le procedure e l'equipaggiamento impiegato per l'esecuzione di tali indagini geofisiche.

In particolare sono state svolte sia delle indagini sismiche a rifrazione che indagini MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves ovvero Analisi Multicanale delle onde superficiali di Rayleigh) al fine di individuare spessori e geometrie dei litotipi e le caratteristiche sismostratigrafiche degli stessi. A tali scopi, nei due siti presi in esame, è stato acquisito un profilo sismico (figura 1) continuo terra-mare dalla lunghezza di 152.5 metri. L'idea è stata quella di acquisire i dati simultaneamente sulla terra emersa e sul fondo mare. E' stato per questo motivo utilizzato un cavo sismico con idrofoni (bay-cable) collegato ad un cavo sismico terrestre. E' stato impiegato il Minibang come sorgente energizzante.

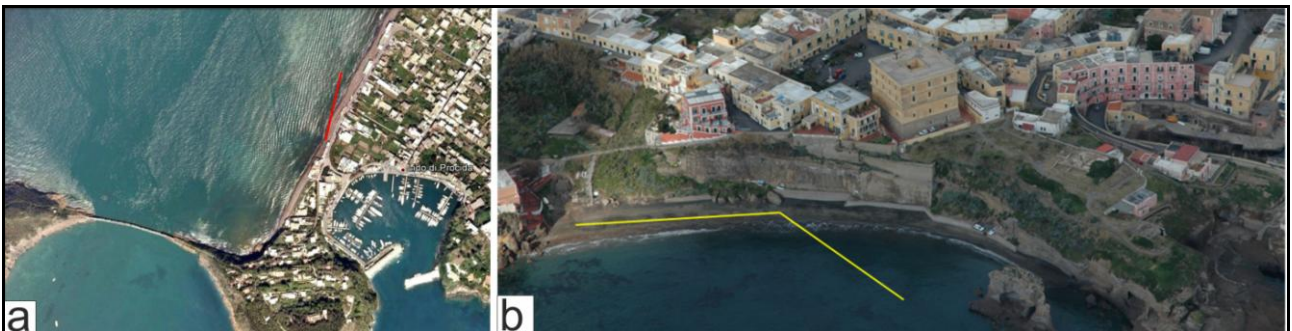


Figura 1: Dettaglio della localizzazione dei profili sismici acquisiti a Procida (a) e Ventotene (b).

Nella Tabella è riportato il gruppo di lavoro del CNR-I.A.M.C. che ha partecipato all'acquisizione dei dati geofisici:

PERSONALE	QUALIFICA	COMPETENZE
Vincenzo DI FIORE	Ricercatore	Responsabile Scientifico Survey
Salvatore MAZZOLA	Direttore IAMC	Research Management
Gemma AIELLO	Ricercatore	Acquisizione dati
Ines ALBERICO	Ricercatore	Acquisizione dati
Fabrizio LIRER	Ricercatore	Acquisizione dati
Nicola PELOSI	Ricercatore	Acquisizione dati e posizionamento GPS
Michele PUNZO	CTER	Elaborazione dati
Daniela TARALLO	Assegnista	Acquisizione dati ed elaborazione
Laura GIORDANO	Ricercatore	Research Management
Francesco Paolo BUONOCUNTO	Tecnologo	Acquisizione dati
Antimo ANGELINO	CTER	Acquisizione dati
Michele IAVARONE	OPT	Acquisizione dati
Paolo SCOTTO DI VETTIMO	CTER	Acquisizione dati

2. Breve inquadramento geologico

- PROCIDA

L'isola di Procida (figura 2), con il vicino isolotto di Vivara, è parte integrante del distretto vulcanico dei Campi Flegrei, l'ampia zona vulcanica posta a Nord-Ovest della città di Napoli. L'attività vulcanica dei Campi Flegrei è legata alle complesse fasi tettoniche estensionali plio-quadernarie che hanno accompagnato l'apertura del Mar Tirreno e la rotazione in senso antiorario della penisola italiana con conseguente assottigliamento del suo margine occidentale e subsidenza della piattaforma carbonatica (Scandone, 1979).

L'attività vulcanica avvenuta sull'isola di Procida è strettamente legata a quella verificatasi nella parte occidentale dei Campi Flegrei. In questo settore, le eruzioni avvennero fra 40.000 e 14.000 anni fa, epoche che corrispondono rispettivamente all'età dei prodotti di Vivara e Torregaveta. Le eruzioni furono per lo più esplosive, anche se di moderata energia dal momento che i prodotti non si

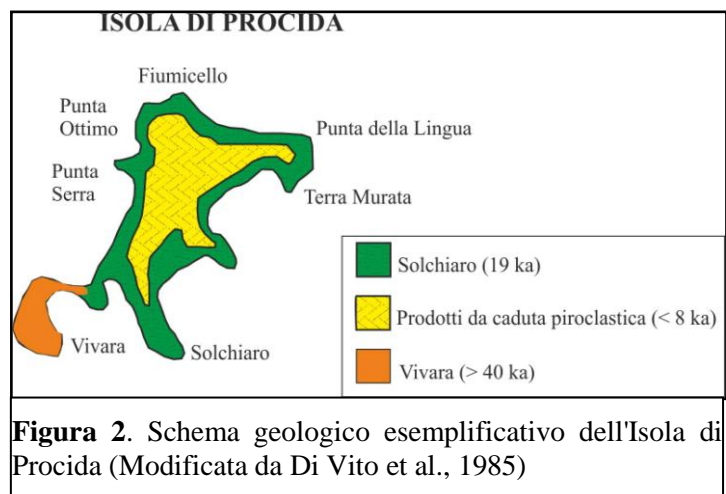


Figura 2. Schema geologico esemplificativo dell'Isola di Procida (Modificata da Di Vito et al., 1985)

ritrovano a distanze maggiori di qualche km. Il vulcano più antico si eleva sul mare come un cono isolato e forma l'attuale isolotto di Vivara. Anche i duomi di lava di Punta Ottimo e S. Martino-Acquamorta si formano nel periodo più antico, insieme al cono di scorie di Miliscola-Monte Grillo, ora parzialmente distrutto. Sopra questi prodotti, si trovano numerosi strati di pomice depositati da eruzioni localizzate su Ischia. Intorno a 31.000 anni fa avviene l'eruzione di Fiumicello, il cui centro di emissione è probabilmente a Procida, dove si ritrovano anche i depositi con il massimo spessore. I prodotti consistono in strati di ceneri grigie e lapilli neri e si vedono anche a Monte di Procida. Dopo quella di Fiumicello, un'altra eruzione ricopre l'area con uno strato di pomice e il deposito di un flusso piroclastico. Questi prodotti costituiscono oggi l'isolotto di S. Martino e si ritrovano anche a Torregaveta, dove risultano erosi dal soprastante deposito della Breccia Museo. Le più recenti eruzioni sono state quelle della Breccia Museo (circa 18.000 anni; Perrotta e Scarpati, 1995) e Solchiaro (17.000). Il deposito della Breccia Museo si vede principalmente lungo la falesia di Acquamorta e a Procida, ed è composto da clasti di natura e dimensioni molto eterogenee, sia vulcanici che sedimentari. Sulla terra ferma, l'ultima eruzione prima del Tufo Giallo Napoletano è quella di Torre Gaveta (14.000 anni).

- VENTOTENE

Le isole di Ventotene e S. Stefano rappresentano il raggruppamento orientale dell'arcipelago pontino. Esse costituiscono la parte emersa di un grande vulcano-strato con un diametro basale di circa 15-20 km (figura 3). Il centro eruttivo del vulcano si trova localizzato ad ovest dell'isola di Ventotene, come testimoniato anche dalla giacitura immergente verso NE dei prodotti vulcanici (Bergomi et alii, 1969).

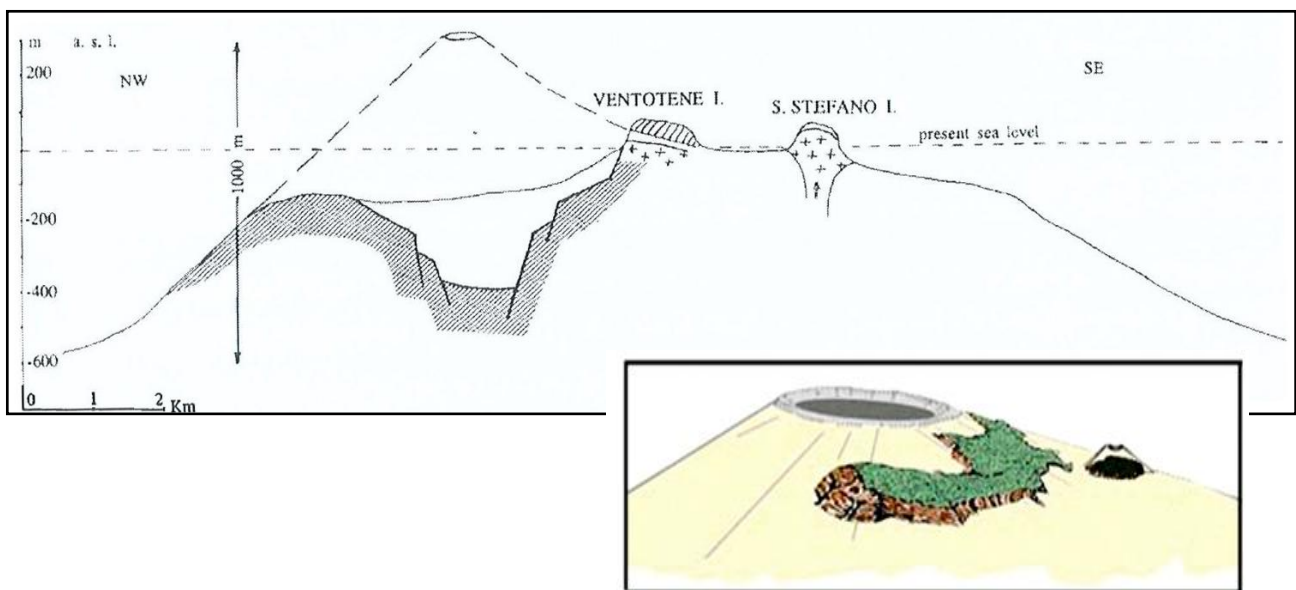


Figura 3: Schema geologico esemplificativo delle isole di Ventotene e S.Stefano

La sequenza vulcanica ha alla base trachibasalti depositi in ambiente subacqueo con varie colate con spessori massimi rilevabili di 50 m, al di sopra dei quali giacciono dei tufi sabbiosi intercalati a livelli di pomice e piccoli lapilli, sovrastati infine da un tufo ben cementato. Misure di età assolute hanno datato ad 1.7 milioni di anni circa i trachibasalti di Ventotene (Bergomi et alii, 1969).

Le eruzioni di tipo esplosivo hanno generato depositi da caduta, i quali testimoniano eventi di tipo pliniano, sub-pliniano o stromboliano; altre hanno generato flussi piroclastici e surge che si sono propagati su un'area poco estesa; altre ancora, invece, si riconoscono in una successione di prodotti da caduta, seguiti da depositi di flusso piroclastico.

L'ultima eruzione avvenuta a Ventotene è stata di tipo esplosivo e i prodotti piroclastici eruttati formarono un deposito dallo spessore complessivo di oltre 30 m chiamato Tufo di Parata Grande, dal nome della località dove è visibile la migliore sezione stratigrafica. Probabilmente questa esplosione distrusse parte della struttura vulcanica, favorendone la successiva demolizione per erosione (Perrotta et alii, 1996).

Da un punto di vista morfologico, l'isola di Ventotene è caratterizzata dalla presenza di spettacolari falesie che presentano un'immersione verso est-nord-est. La morfologia dell'isola è condizionata dai litotipi affioranti; infatti la costa occidentale dell'isola, che va da Punta dell'Arco a Punta Eolo, è costituita da falesie in tufo che raggiungono un'altezza di 100m, a causa dell'immersione dei depositi verso NE, mentre la costa orientale, che comprende Calabattaglia, Calanave e Calarossano, è interessata da falesie meno acclivi, anche grazie al terrazzamento cui è stata sottoposta già in epoca romana. Lungo tutto il perimetro dell'isola sono frequenti piccole lingue di spiaggia, dette "Pocket beach", delimitate da promontori, delle quali la più grande di queste cale è Cala Nave.

3. Metodologia e strumentazione

Il metodo sismico esplora il sottosuolo attraverso lo studio della propagazione delle onde elastiche generate da sorgenti di energia controllate e rilevate da sensori, chiamati geofoni. Le onde si propagano in profondità e in presenza di superfici di discontinuità, dovute a contrasti di impedenza acustica, subiscono fenomeni di riflessione, rifrazione e diffrazione. Nella sismica a terra si possono usare sorgenti impulsive quali, per esempio, detonazione di cariche esplosive poste all'interno di pozzetti, i cannoncini o la mazza battente, oppure sorgenti non impulsive come i vibratorii. I geofoni rilevano l'arrivo delle onde sismiche, sfruttando lo spostamento relativo di una bobina mobile, sospesa mediante molle all'interno di un contenitore, rispetto a un magnete solidale con il terreno. I metodi sismici tradizionali si dividono in due categorie: metodi sismici a rifrazione e metodi sismici a riflessione. I primi, in particolare, permettono di ricostruire il campo di velocità delle onde sismiche che è funzione delle proprietà elastiche e delle geometrie e strutture delle formazioni rocciose e dei terreni. Accanto ai metodi sismici tradizionali a rifrazione e riflessione esistono altri metodi come ad esempio quelli che sfruttano la propagazione delle onde superficiali (ad es. MASW).

Per ottenere informazioni sulle eterogeneità presenti nel sottosuolo nei siti test di Procida e Ventotene, sono state utilizzate le tecniche di sismica a rifrazione e MASW.

La realizzazione di un'indagine in zona di transizione ha reso indispensabile la messa a punto di un sistema di acquisizione opportunamente configurato per la registrazione simultanea terra-mare. La continuità terra-mare del profilo è stata ottenuta allestendo un sistema assemblato costituito da due componenti principali:

- Un sistema di acquisizione per la registrazione in terra costituito da 24 geofoni verticali;
- Un sistema di acquisizione per la registrazione in mare costituito da un bay cable analogico a 24 canali adagiato sul fondo del mare.;

Entrambi i sistemi sono stati interfacciati con un sismografo Geode della Geometrics. Un Laptop, che costituisce un'unità di visualizzazione, elaborazione ed archiviazione dati, è poi collegato tramite rete locale Ethernet ad entrambi i Geodi (figura 4). Tale configurazione ha permesso di realizzare un'unica linea idro-geofonica in grado



Figura 4. Sistema di registrazione: i dati di campagna vengono monitorati in tempo reale per controllarne la qualità.

di registrare simultaneamente dati terra/mare mantenendo costante la copertura. Le operazioni di registrazione sono state interamente gestite dal sistema terrestre.

Nello specifico, la strumentazione utilizzata per la prospezione sismica è composta da

N. 2 sismografi GEODE Geometrics (figura 5), da 24 canali cadauno, dalle seguenti caratteristiche:

- Escursione dinamica 144 dB, 110 dB istantanea a 2 ms;
- Distorsione 0.0005% a 2 ms, 1.75 – 208 Hz;
- Banda d'ingresso: da 1.75 Hz a 20 kHz;
- Passo di campionamento: da 0.02 ms a 16 ms;
- Filtri analogici anti-aliasing a 90 dB della frequenza di Nyquist;
- Filtri digitali low-cut, high-cut, notch a 24-48 dB/oct;
- lunghezza di registrazione: 64000 campioni;
- Interfaccia PC: Connessione tramite rete Ethernet;
- Salvataggio dati in formato SEG-2;



Figura 5. Sismografo GEODE interfacciato con un Laptop.

- N. 24 geofoni Geospace 10 Hz verticali (mod. GS-20DX) (figura 6a);
- N.1 cavo sismico marino multicanale (figura 6b e 6c) (bay-cable) che presenta le seguenti caratteristiche:

- Numero di canali: 24;
- Lunghezza: 60 metri;
- Distanza idrofoni: 2.5 metri;
- Frequenza naturale: 10 Hz;
- Tow leader: 60 metri.

- N.2 cavi sismici Geospace, 12 take-out con spaziature a 5 m;
- N.1 cavo di interfaccia digitale, 125 m, per la connessione dei due geodi;

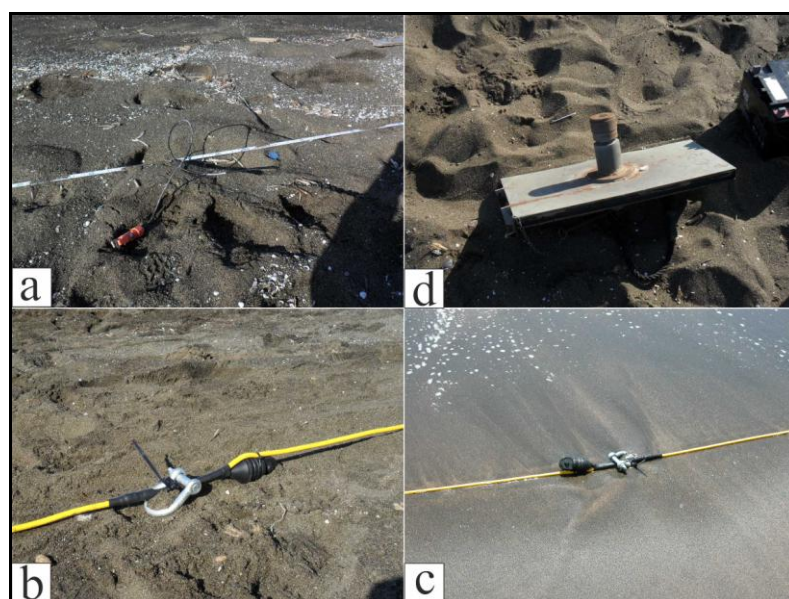


Figura 6. Alcuni componenti dell'unità di registrazione dei dati sismici. A) geofono; B-C) Idrofono. Al cavo sismico (in giallo) sono stati legati, in corrispondenza di ogni idrofono, dei maniglioni di 300 g. per meglio favorirne la discesa in profondità. D) Sorgente sismica Minibang.

Il sistema di energizzazione è costituito da una sorgente sismica a cannoncino modello Minibang (figura 6d). La sorgente utilizza cartucce industriali tipo calibro 8; la canna del cannoncino viene introdotta ad una profondità di circa 30 cm in un piccolo foro precedentemente preparato con una piccola trivella a mano. Per evitare il rinculo ed avere la massima propagazione dell'energia prodotta dall'esplosione della cartuccia, la base di supporto del cannoncino è trattenuta solidale al terreno dal peso dell'addetto allo scoppio che vi deve salire sopra (figura 7).



Figura 7. Fase di energizzazione mediante la sorgente sismica a cannoncino *Minibang*.

Il sistema di trigger consiste in un circuito elettrico che viene aperto nell'istante in cui il cannoncino sismico spara il colpo, consentendo di produrre un impulso che viene inviato al sistema di acquisizione determinandone l'avvio dell'acquisizione. In questo modo la registrazione ha inizio all'esatto istante in cui la sorgente viene attivata.

Alcune immagini relative all'allestimento dei profili sismici a Procida (figura 8) e Ventotene (figura 9).



Figura 8. Alcune immagini relative alla stesa del profilo sismico a Procida.



Figura 9. Alcune immagini relative alla stesa del profilo sismico a Ventotene.

4. Acquisizione dei dati

Il profilo sismico ad alta risoluzione acquisito a Procida ha un andamento NE-SW ed è stato registrato sulla spiaggia della Marina Chiaiolella; quello registrato a Ventotene, con andamento NE-SW è situato sulla spiaggia di Cala Nave. Entrambi i profili hanno una lunghezza di 152,5 m.

Per entrambi i profili sismici, l'idea principale era quella di acquisire una linea che attraversasse la zona di transizione senza perdita di copertura, pertanto sono stati utilizzati sia geofoni che idrofoni.

I geofoni sono stati posizionati sulla spiaggia mentre gli idrofoni sono stati sistemati sul fondo mare, fino ad una profondità di circa 2 metri. La continuità del profilo terra-mare è stata ottenuta collegando il bay-cable col cavo sismico terrestre.

La geometria d'acquisizione è stata la stessa sia per Procida che per Ventotene (figura 10).

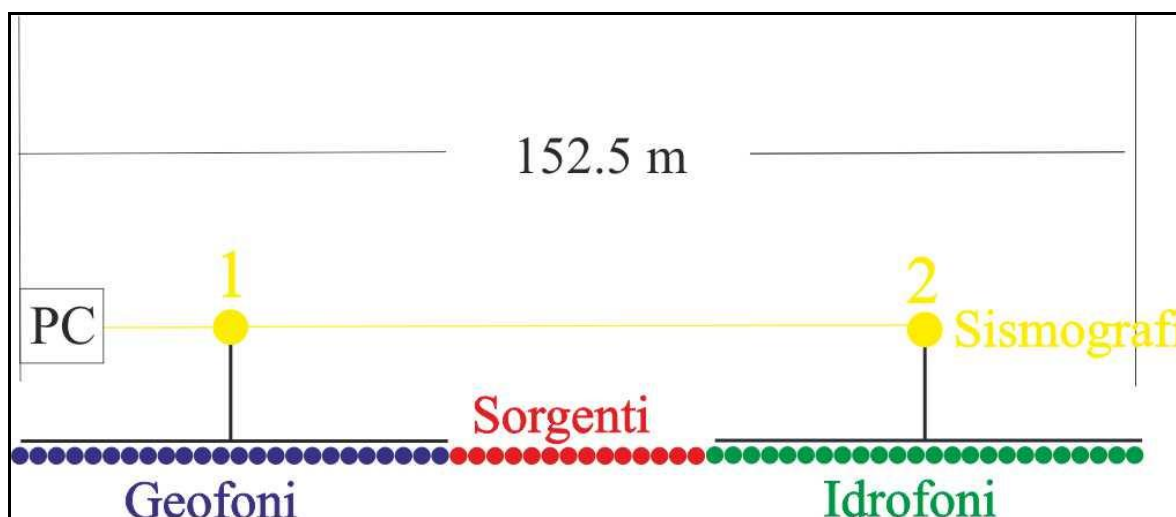


Figura 10. Schema di acquisizione utilizzato per l'acquisizione del profilo sismico terra-mare. I punti blu rappresentano i geofoni, i punti verdi gli idrofoni e quelli gialli i sismografi. Ad ogni sismografo sono collegati 24 ricevitori: un pc è collegato tramite rete locale Ethernet ad entrambi i Geodi. I punti rossi sono relativi alle posizioni di energizzazione.

Il sistema d'acquisizione impiegato è stato di 2 sismografi a 24 canali GEODE. I sensori impiegati hanno una frequenza naturale d'oscillazione di 10 Hz. Il profilo sismico è stato acquisito con una geometria di tipo "long offset shot": tale strategia d'acquisizione, che ha previsto l'impiego di uno stendimento di sensori con spaziatura regolare di 2,5 metri, ha previsto l'esecuzione di energizzazioni simmetricamente esterne rispetto i due stendimenti geofonico/idrofonico. Le energizzazioni sono state realizzate impiegando il fucile sismico (Minibang). L'interdistanza tra le energizzazioni è stata di 2,5 m: per migliorare il rapporto segnale/rumore per ogni posizione sono stati realizzati due scoppi.

I parametri di acquisizione, riassunti nella tabella 2, hanno permesso una massima ridondanza del dato del 1400%.

PROFILO SISMICO	
lunghezza	152,5 metri
Sorgente sismica	Minibang cal. 8
Spaziatura sorgenti	2.5 m
Spaziatura Ricevitori	2.5 m
Numero canali	48 geofoni/idrofoni a 10 Hz
Numero sorgenti	14
Finestra temporale	2 sec
Campionamento temporale	1 ms

Talella 2

5. Elaborazione dei dati

L'analisi multicanale delle onde superficiali di Rayleigh – MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) – è un'efficiente metodologia sismica per la determinazione delle velocità delle onde di taglio V_s . Tale metodo utilizza le onde superficiali di Rayleigh registrate da una serie di geofoni lungo uno stendimento rettilineo e collegati ad un comune sismografo multicanale. Le onde di Rayleigh, durante la loro propagazione vengono registrate lungo lo stendimento di geofoni e vengono successivamente analizzate attraverso tecniche computazionali basate su un approccio di riconoscimento di modelli multistrato di terreno.

L'intera procedura per una MASW consiste di 4 passi fondamentali (Park et al., 1999):

1. Ripetute acquisizioni multicanale dei segnali sismici (figura 11 e 12), generati da una sorgente energizzante artificiale (Minibang), lungo uno stendimento rettilineo di geofoni.

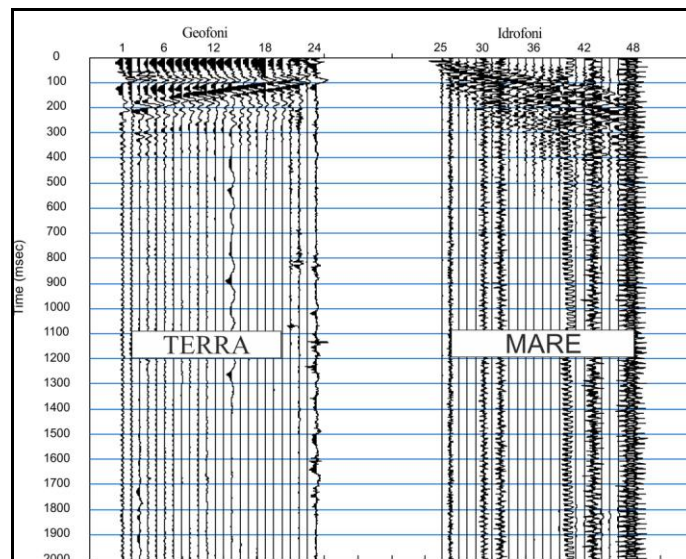


Figura 11. Esempio di *Common Shot Gather* acquisito a Ventotene.

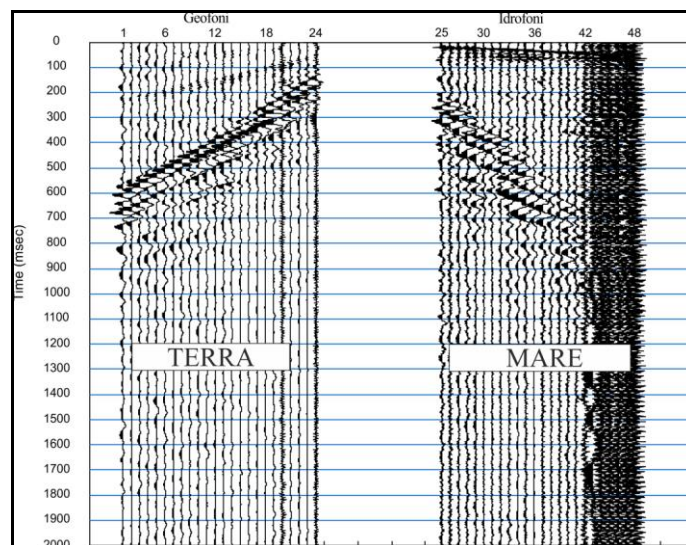


Figura 12. Esempio di *Common Shot Gather* acquisito a Procida.

2. Estrazione del modo fondamentale dalle curve di dispersione delle velocità di fase delle onde superficiali di Rayleigh (figura 13);

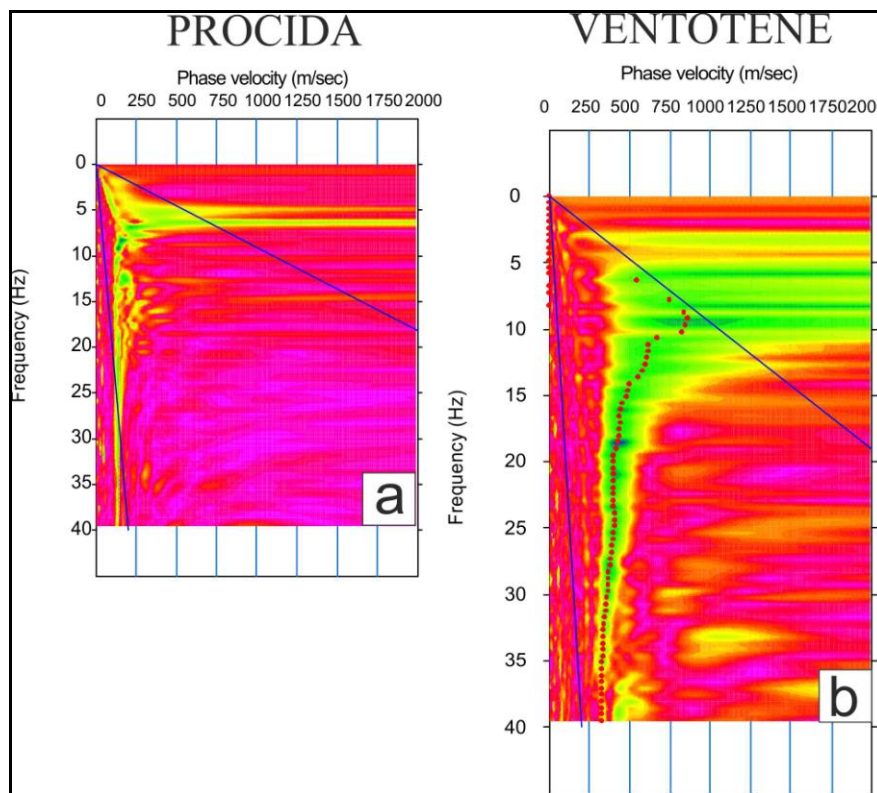


Figura 13. Alcuni esempi di curve di dispersione della velocità di fase in funzione della frequenza delle onde superficiali di Rayleigh. E' possibile distinguere il "modo fondamentale" delle onde di superficie, in quanto le onde di Rayleigh presentano un carattere marcatamente dispersivo che le differenzia da altri tipi di onde (onde riflesse, onde rifratte, onde multiple).

3. "Picking" sullo spettro di frequenza. In questo modo viene attribuito ad un certo numero di punti una o più velocità di fase per un determinato numero di frequenze.

4. Inversione della curva di dispersione per ottenere un modello medio di velocità delle onde sismiche di taglio con la profondità, rappresentativo dell'area investigata.

Quando vengono generate onde sismiche usando una sorgente impattante vengono generate sia onde di volume (P e S), sia onde di superficie (Rayleigh e Love), che si propagano in tutte le direzioni. Alcune di queste onde vengono riflesse e disperse quando incontrano oggetti superficiali o poco profondi e diventano rumore. Inoltre, vengono quasi sempre rilevate vibrazioni da rumore ambientale proveniente dal traffico veicolare e in generale, dall'attività umana. Il vantaggio principale dell'approccio multicanale della tecnica MASW sta nella sua intrinseca capacità di distinguere tutte queste onde dovute al rumore e di isolarle dalle onde superficiali di Rayleigh evidenziando solo il modo fondamentale di oscillazione dei terreni. L'isolamento del modo fondamentale di oscillazione si basa su molteplici caratteristiche sismiche dei segnali.

Parallelamente all'elaborazione delle onde superficiali è possibile eseguire un'analisi a rifrazione del dato acquisito. La prima fase dell'elaborazione a rifrazione consiste nella lettura dei tempi relativi alle onde dirette e rifratte. La lettura dei tempi di primo arrivo è eseguita su tutte le tracce dei profili sismici acquisiti. Il controllo sulla qualità delle letture è generalmente ottenuto graficando i primi arrivi in funzione della posizione sul terreno (dromocrone) ed utilizzando le regole di parallelismo e reciprocità descritte da *Ackerman (1986)*.

Le letture delle fasi dirette e rifratte, dopo essere state accuratamente verificate, vengono poi invertite sulla base di un modello iniziale di velocità 1D che viene discretizzato in piccole celle a velocità o gradiente costante. La stima iniziale delle velocità del sottosuolo è stata ottenuta mediante le procedure tradizionali di analisi di rifrazione (*Burger, 1992*). La dimensione delle celle della maglia e, di conseguenza, la risoluzione del modello di velocità dipende dalla geometria di acquisizione (numero di energizzazioni e numero di ricevitori) e dalla copertura del raggio. Maggiore è il numero di raggi che si incrociano maggiore è la probabilità di ottenere una soluzione stabile. Poiché la copertura del raggio diminuisce con l'aumentare della profondità, anche la significatività del modello di velocità diminuisce con la profondità (*Stefani, 1995*). Generalmente, la massima profondità che può essere investigata dal metodo tomografico è pari a $1/3 - 1/4$ della lunghezza del profilo.

Il modello di velocità iniziale è poi iterativamente corretto per determinare la migliore distribuzione velocità sulla base del confronto tra i tempi di arrivo misurati e quelli teorici basati sul modello di velocità "a priori" del sottosuolo. Tramite il modello di velocità in ingresso, vengono creati i tempi di arrivo teorici per ciascuna coppia sorgente-geofono via raytracing. L'algoritmo, procedendo con un approccio iterativo ai minimi quadrati, utilizza lo scarto tra il tempo misurato e quello calcolato per modificare le velocità nelle celle interessate dal raytracing finché l'errore RMS (Root-Mean Square) relativo alla differenza tra i tempi di percorso osservati e calcolati viene minimizzato.

Il risultato è un'immagine bidimensionale che mostra la distribuzione delle velocità sismiche del sottosuolo.

Bibliografia

Ackermann H. D., Pankratz L. W. and Dansereau D. (1986). Resolution of ambiguities of seismic refraction traveltimes curves. *Geophysics*, Vol. 51, N. 2; P. 223-235.

Bergomi C., Catenacci V., Cestari G., Manfredini M., Manganelli V. (1969) - Note illustrative del Foglio 171 Gaeta e vulcano di Roccamonfina. Servizio Geologico d'Italia.

Burger, H. R. (1992). *Exploration Geophysics of the Shallow Subsurface*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 489 pp.

Park C. B., Miller R. D., Xia J.; 1999: Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64, 3, 800-808.

Perrotta A. and Scarpati C., 1995, The eruption of the Breccia Museum, *J. Volcanol. Geoth. Res.*

Perrotta A., Scarpati C., Giacomelli L., Capozzi A.R., 1996. Proximal depositional facies from a caldera-forming eruption: the Parata Grande Tuff at Ventotene Island (Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 71(2-4), 207-228

Scandone P., 1979, Origin of the Tyrrhenian Sea and Calabrian Arc. *Boll. Soc. Geol. It.* 98, 27-34.

Stefani, J. P. (1995). Turning-ray tomography. *Geophysics*, 60, 1917-1929.