

CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE
Istituto per l'Ambiente Marino Costiero

Indagine di sismica marina multicanale a riflessione ad alta
risoluzione in prossimità della foce del Fiume Volturno
(Golfo di Gaeta)

RAPPORTO TECNICO

Michele Punzo¹, Vincenzo Di Fiore¹, Luciana Ferraro¹, Michele Iavarone¹, Fabrizio Lirer¹, Ennio Marsella¹, Nicola Pelosi¹, Paolo Scotto di Vettimo¹, Daniela Tarallo¹, Mattia Vallefucoco¹, Ines Alberico¹, Aniello Pietropaolo¹.

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



in copertina Foto aerea della Foce del Fiume Volturno (www.alimages.it)

INDICE

1. Introduzione.....	1
2. Scelta del sito.....	1
3. Strumentazione.....	4
4. Geometria d'acquisizione.....	10
5. Esempio di dato e metodologia.....	14

1. INTRODUZIONE

Il presente rapporto tecnico illustra le metodiche utilizzate per l'esecuzione di una prospezione di sismica marina multicanale eseguita in prossimità della foce del Fiume Volturno (Golfo di Gaeta) nell'ambito del progetto PON I-AMICA (Infrastruttura di Alta tecnologia per il Monitoraggio Integrato Climatico-Ambientale).

Il Progetto PON I-AMICA (<http://www.i-amica.it>), avviato nel gennaio 2012 nell'ambito del Programma Operativo Nazionale "Ricerca e Competitività 2007-2013", si caratterizza per la realizzazione di un'infrastruttura osservativa integrata climatico-ambientale per potenziare le "Regioni della Convergenza" (Campania, Calabria, Puglia, Sicilia) di strutture ed apparecchiature utili ad innalzare gli standard operativi del sistema della ricerca pubblica e favorendo lo sviluppo di attività imprenditoriali. L'Infrastruttura, che consentirà di fornire informazioni utili alle decisioni di politica ambientale e di gestione del territorio, si articola in quattro Obiettivi Realizzativi (OR).

In particolare, tra le attività previste nell'ambito dell'OR 4.4 "Processi di interfaccia biosfera-idrosfera e funzionalità degli ecosistemi costieri", si prevede l'esecuzione di rilievi geofisici terra/mare allo scopo di comprendere l'evoluzione della fascia costiera. A questo scopo l'area di studio scelta è quella prospiciente la foce del Fiume Volturno (Golfo di Gaeta), che già rientra nel settore di studio scelto per il monitoraggio stagionale previsto dallo stesso OR.

Nell'ambito di tale fase del progetto, il CNR-I.A.M.C. ha svolto, dal 23 al 26 Luglio 2012, una prima campagna marina di indagini geofisiche per la messa a punto del sistema di acquisizione e la realizzazione del profilo sismico marino multicanale ad alta risoluzione.

L'acquisizione ha avuto come obiettivo la ricostruzione sismostratigrafica di dettaglio del sottosuolo dell'area in esame (0-150 metri di profondità) al fine di comprendere l'evoluzione del sistema marino-costiero nel recente passato ed identificare i trend evolutivi della linea di costa nell'ultimo secolo.

2. SCELTA DEL SITO

L'obiettivo dell'indagine è stato l'acquisizione di un profilo sismico che, partendo dalla prossimità della scogliera sommersa, posta alla sinistra della foce del Fiume Volturno e distante circa 130 metri dalla linea di riva, si estende verso mare in direzione NE-SW (Figura 1).

Nelle valutazioni preliminari circa l'estensione e il posizionamento del profilo sismico, si è tenuto conto del fatto che lo stendimento (in giallo in Figura 1) dovrà poi essere successivamente prolungato sia verso terra che verso mare. I due elementi che sono stati considerati, quindi, ai fini della localizzazione della linea sismica sono stati:

- la necessità di prolungare il profilo verso NE, nella zona comprendente la battigia e la piana alluvionale (linea tratteggiata in blu in Figura 1);
- l'esigenza di dover estendere lo stendimento verso mare in direzione SW con l'obiettivo di raccordarsi il più possibile con linea sismica CHIRP M194A (linea in rosso in figura 1) acquisita dall'IAMC - CNR di Napoli nel corso della Campagna Oceanografica GMS2002_01.

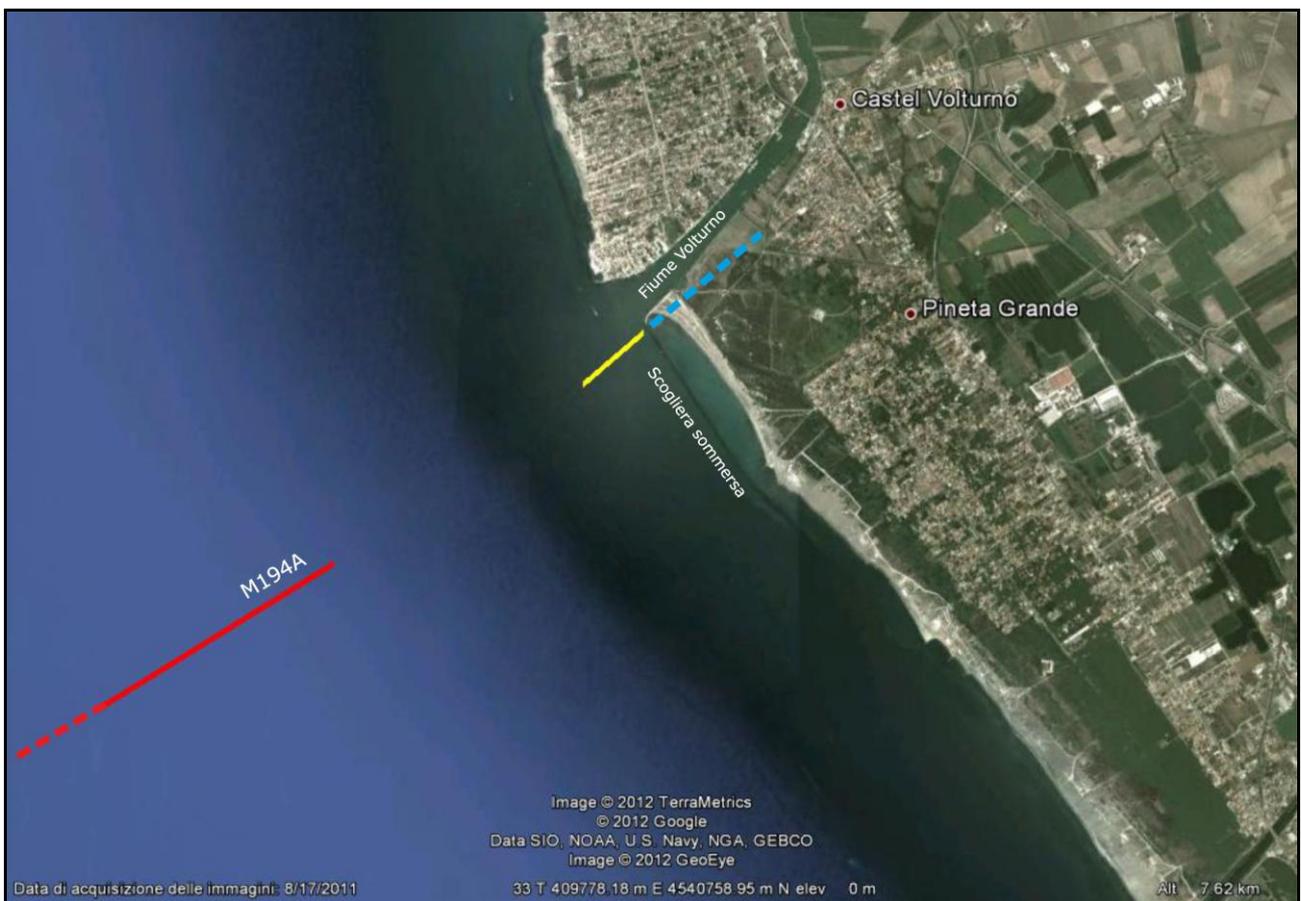


Figura 1: Localizzazione (linea in giallo) del profilo sismico acquisito e del suo probabile prolungamento a terra (linea tratteggiata in blu). Viene, inoltre, raffigurata la linea sismica Chirp M194A (linea in rosso).

La campagna di geofisica è stata preceduta da diversi sopralluoghi nell'area marina prospiciente la foce del Fiume Volturno, effettuati con il supporto di pescatori locali (Coop. La Flegrea), per pianificare le procedure tecnico-logistiche da seguire durante le fasi d'acquisizione. Tali lavori sono stati pianificati previa autorizzazione della Capitaneria di Porto di Pozzuoli e di Castel Volturno.

Il profilo sismico a riflessione è stato acquisito per un totale di 537,5 metri di stendimento ed è stato realizzato nel corso di tre giorni (23-24-25 luglio 2012) attraverso l'acquisizione di tre singoli transetti ognuno dei quali di lunghezza pari a 297.5 metri. I dati sono stati registrati impiegando la sorgente sismica marina Watergun.

Nella Tabella 1 è riportato il personale CNR - IAMC che ha partecipato alla campagna di geofisica

PERSONALE	AFFERENZA	COMPETENZE
Vincenzo DI FIORE	CNR-I.A.M.C.	Responsabile Scientifico Survey
Luciana FERRARO	CNR-I.A.M.C.	Responsabile OR 4.4 I-AMICA
Michele IAVARONE	CNR-I.A.M.C.	Acquisizione dati sismici
Fabrizio LIRER	CNR-I.A.M.C.	Coordinamento logistico e acquisizione dati
Ennio MARSELLA	CNR-I.A.M.C.	Responsabile
Nicola PELOSI	CNR-I.A.M.C.	Acquisizione dati sismici e posizionamento GPS
Michele PUNZO	CNR-I.A.M.C.	Acquisizione dati sismici ed elaborazione
Paolo SCOTTO DI VETTIMO	CNR-I.A.M.C.	Acquisizione dati sismici
Daniela TARALLO	CNR-I.A.M.C.	Acquisizione dati sismici ed elaborazione
Mattia VALLEFUOCO	CNR-I.A.M.C.	Acquisizione dati sismici

Tabella 1

Nella Tabella 2 è riportato il personale non CNR che ha partecipato alla campagna di geofisica

Luigi BOSCOLO	Cooperativa La Flegrea	Comandante peschereccio Consuelo – operazione di logistica a mare
Alessandro BOSCOLO	Cooperativa La Flegrea	Pilota peschereccio Consuelo e gozzo
Antonio ZUMBOLO	Cooperativa La Flegrea	Motorista peschereccio Consuelo – pilota gommone
Giovanni FIGLIANO	Cooperativa La Flegrea	Marinaio peschereccio Consuelo

Tabella 2

3. STRUMENTAZIONE

La strumentazione utilizzata per l'acquisizione del profilo sismico è costituita da 4 unità principali:

1. sistema d'acquisizione dati;
2. sistema di trasduzione;
3. sistema di immagazzinamento dati;
4. sistema di energizzazione.

Il *sistema di acquisizione dati* è costituito da 3 sismografi modulari GEODE della Geometrics da 24 canali cadauno (Figura 2). Il Geode è un sismografo a 24 bit ad elevata dinamica (144 dB di range dinamico totale - 105 dB istantanei), ampia banda d'ingresso (1.75 Hz - 20 kHz), con passo di campionamento da 0.02 ms a 16 ms, che amplifica e digitalizza il segnale ricevuto dagli idrofoni e lo invia all'unità d'immagazzinamento dati. Ogni modulo è estremamente compatto (27 x 25 x 18 cm – circa 3 Kg) e può essere configurato da 3 a 24 canali. Più moduli geode possono essere collegati in serie da cavi di interfaccia digitali in modo da costituire sistemi fino a 1000 canali. Ogni modulo è alimentato autonomamente con batterie esterne da 12 Volt, con un consumo ridotto grazie ad un efficiente sistema di stand-by.



Figura 2. Sistema di acquisizione dati costituito da sismografi Geode.

Il *sistema di trasduzione* è costituito da tre cavi sismici marini da 24 canali. Gli idrofoni (Figura 3) (o geofoni a pressione) utilizzati sono dei sensori piezoelettrici che hanno la proprietà di dare luogo ad una differenza di potenziale elettrico proporzionale alla pressione istantanea dell'acqua. Questa differenza di potenziale generata è a sua volta proporzionale alla velocità di spostamento delle particelle d'acqua messe in movimento dal segnale acustico. Sono stati impiegati sensori con frequenza naturale di 10 Hz interdistanziati 2,5 metri. I tre cavi, sono stati adagiati sul fondale e prima di essere calati in mare, sono stati uniti in modo tale da realizzare un'unica linea idrofonica da 72 canali complessivi. I segnali elettrici



Figura 3. 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.

uscanti dagli idrofoni vengono inviati tramite i cavi sismici (streamer), nel quale sono incorporati, ad un sismografo che li digitalizza consentendone la successiva acquisizione.

Parte integrante del sistema di traduzione ed acquisizione sono anche 3 cavi di interfaccia digitale per connessione tra i moduli geode.

Il sistema d'immagazzinamento dati è rappresentato da un Laptop (Figura 4). Il laptop, collegato tramite rete locale Ethernet ai 3 Geodi, svolge il compito di archiviare i dati digitalizzati provenienti dai Geodi (in formato seg-2), di gestire i parametri d'acquisizione e consente di valutare interattivamente la qualità dei dati acquisiti.

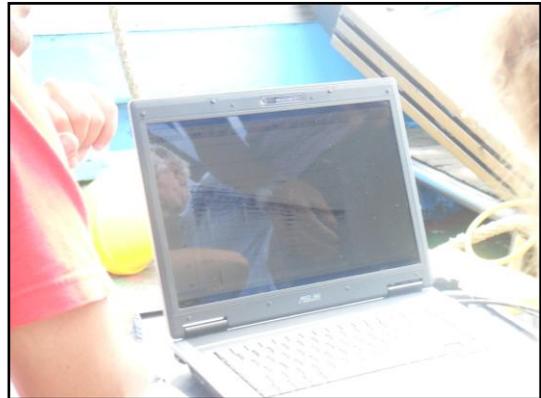


Figura 4. Sistema di registrazione: i dati di campagna vengono monitorati in tempo reale per controllarne la qualità.

Il sistema di energizzazione è costituito da una sorgente sismica Watergun SODERA Modello S-15 di 0.24 L. di volume (Figura 5) ed alimentato da bombole ad aria compressa. La sorgente utilizza aria compressa per

immettere energia nell'acqua circostante e presenta una sola camera in pressione, quella superiore. La camera inferiore è aperta ed a contatto con l'acqua. Al momento dello sparo, il movimento verso il basso del pistone provoca l'espulsione dell'acqua ed una successiva implosione con conseguente generazione dell'impulso acustico, virtualmente privo dell'effetto bolla e con un contenuto maggiore in alte frequenze.

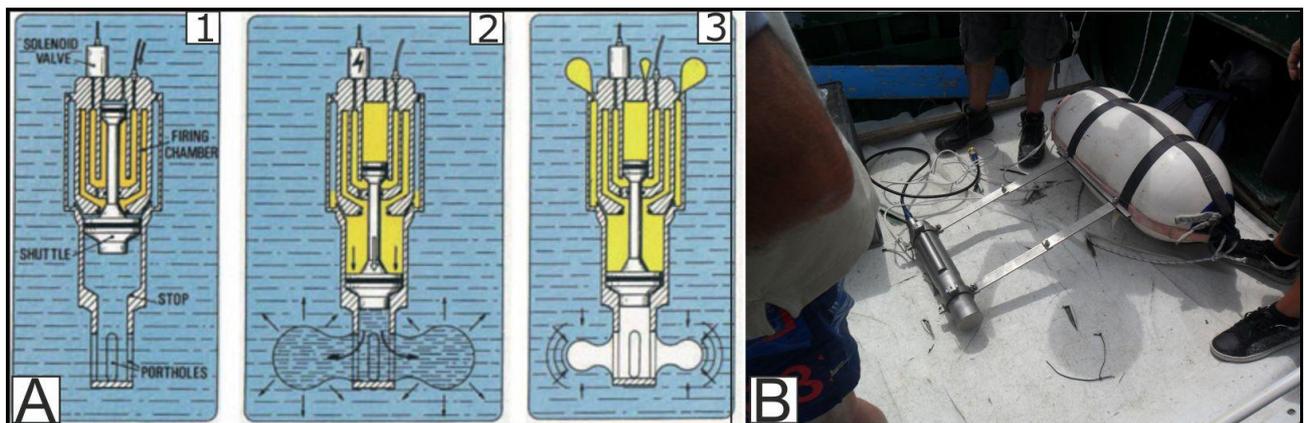


Figura 5. A) Fasi operative della sorgente sismica Water-gun (Copyright: Sercel): 1) fase di carico; 2) fase di sparo con formazione delle bolle d'aria; 3) collasso delle bolle con brusca implosione dell'impulso con conseguente generazione dell'impulso acustico. B) Particolare del Watergun utilizzato per l'acquisizione sismica multicanale.

Il sistema di acquisizione e quello di energizzazione sono stati installati su due imbarcazioni differenti, per tale motivo il sistema di trigger è stato realizzato attraverso una trasmissione radio (Figura 6). In corrispondenza di ciascun punto di scoppio, la camera del Watergun è stata riempita alla pressione di 100 bar. Dopo il caricamento, il gun controller (installato sul gozzo) invia un impulso elettrico alla valvola a

solenioide del Watergun, sincronizzando l'apertura della camera di scoppio; contemporaneamente invia (via radio) il segnale di tempo zero al sistema di registrazione (installato sul peschereccio) determinandone l'avvio dell'acquisizione. In questo modo la registrazione ha inizio all'esatto istante in cui la sorgente viene attivata. Operativamente il sistema offre la possibilità di ottenere un'emissione di aria circa ogni 5 secondi.

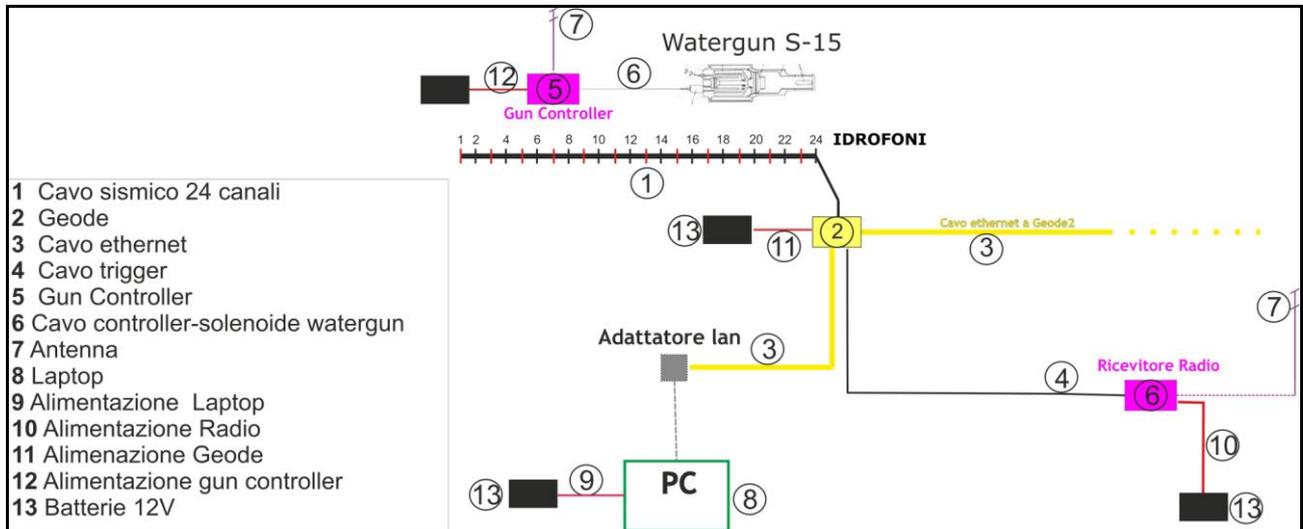


Figura 6. Schema esemplificativo delle componenti della stazione di controllo.

Dato che l'acquisizione è stata realizzata in più giornate, l'esatto posizionamento dei profili tra loro è stato garantito dall'utilizzo di Sistemi Satellitari e G.P.S. attraverso i quali è stato possibile, nei giorni successivi, riallinearsi allo stendimento acquisito il giorno precedente.

Alla fine di ogni giornata lavorativa, inoltre, sono stati lasciati in mare lungo il profilo boe e gavitelli. Tali segnali sono stati utilizzati per marcare ulteriormente alcune posizioni cardine dello stendimento, quali prima ed ultima posizione di scoppio e primo ed ultimo idrofono di ogni cavo sismico.

Le operazioni di acquisizione sono avvenute tramite l'utilizzo di tre mezzi nautici: un peschereccio, un gozzo ed un gommone. Nelle tabelle seguenti sono riassunte le caratteristiche tecniche principali delle imbarcazioni.

MOTO-PESCHERECCIO Consuelo	
Dimensioni	
Lunghezza	13,08 metri
Larghezza	3,95 metri
Stazza lorda	9,98 TSL
Pescaggio	1,75 metri
Motori e navigazione	

Motore	Fiat Aifo 821 M/220 hp
Velocità	9,4 nodi
Comunicazioni e posizionamento	
Sistema VHF icom IC-M 411	
Sistema GPS FURNO GP-32	
	

Tabella 3: Dati tecnici del peschereccio

GOZZO	
Dimensioni	
Lunghezza	7,65 metri
Larghezza	2,22 metri
Stazza lorda	2,97 TSL
Pescaggio	0,30 metri
Motori e navigazione	
Motore	Nanni diesel 70 CV
Velocità	5,5 nodi
Comunicazioni e posizionamento	
GPS Lowrance Expedition C	



Tabella 4: Dati tecnici del gozzo

GOMMONE	
Dimensioni	
Lunghezza	5,40 metri
Larghezza	1,90 metri
Pescaggio	10 cm
Stazza lorda	0,750 TSL
Motori e navigazione	
Motore	Yamaha 75 CV
Velocità	37 nodi



Tabella 5: Dati tecnici del gommone.

Non trattandosi di imbarcazioni dedicate a questo tipo di rilievi, tutta la strumentazione necessaria allo svolgimento delle attività di acquisizione è stata installata a bordo dei natanti per l'occasione. La maggior parte della strumentazione sismica è stata rimossa alla fine di ogni giornata lavorativa per poi essere nuovamente allestita la mattina successiva.

Per ottimizzare le operazioni di acquisizione sono state adoperate anche le attrezzature normalmente utilizzate per la pesca; come ad esempio i due cavi d'acciaio situati nella zona poppiera del peschereccio e normalmente utilizzati per la pesca a strascico (Figura 7).



Figura 7. A) Particolare del verricello a due tamburi che comanda i due cavi d'acciaio. B) Veduta dell'arcone di poppa.

Tali cavi (dal diametro di 11 mm), indipendenti tra loro, allacciati a un verricello azionato da un sistema idraulico, hanno permesso di filare in mare complessivamente circa 600 metri di cavo.

Per i nostri scopi, alle estremità dei due cavi sono state montate due ancore dal peso di circa 90 Kg.

La procedura utilizzata è stata quella di calare in mare la prima ancora una volta arrivati sul punto di inizio acquisizione. Filando il primo cavo d'acciaio e sfruttando il sistema di pulegge installate sull'arcone di poppa (Figura 8), il peschereccio si muove lungo il profilo ed arrivato a circa 300 metri dal primo punto viene calata la seconda ancora. Il peschereccio, così vincolato su due punti dello stendimento, ha creato



Figura 8. Fase dell'acquisizione. Una volta calata in mare la prima ancora, il peschereccio, filando in mare il cavo d'acciaio, si muove verso il secondo punto dello stendimento per calare la seconda ancora.

con i cavi d'acciaio una "linea di fede" utilizzata come guida sia per lo stendimento del cavo sismico che per le operazioni di energizzazione.

Durante l'indagine sono state impiegate due squadre; una ha operato alla stazione di controllo alla quale viene inviato l'input per lo shot, dove si controllano e si registrano i dati ricevuti; l'altra invece ha operato sul gozzo per la gestione delle operazioni in mare (energizzazione, posizionamento e recupero del cavo sismico).

4. GEOMETRIA D'ACQUISIZIONE

Il rilievo sismo-stratigrafico è stato progettato per ottenere la caratterizzazione dei depositi marini recenti (quaternari) allo scopo di consentire uno studio dettagliato stratigrafico-strutturale dell'area in esame e per fornire indicazioni sugli stili deformativi.

A differenza delle prospezioni sismiche marine di tipo convenzionale che registrano solo onde compressive, o onde P, al fine di ottenere una maggiore discriminazione delle unità geologiche, l'indagine è stata progettata in modo tale da registrare anche le onde di taglio, o onde S. Per tale motivo il *bay-cable* da 72 canali è stato adagiato sul fondale dato che le onde S non si propagano nei fluidi (Figura 9). L'impiego di una geometria ibrida marino/terrestre ha richiesto l'utilizzo di tre imbarcazioni: una a supporto della sorgente (gozzo), l'altra di appoggio alla strumentazione di registrazione (peschereccio) e la terza a sostegno durante le operazioni di stesura e recupero del cavo sismico (gommone).

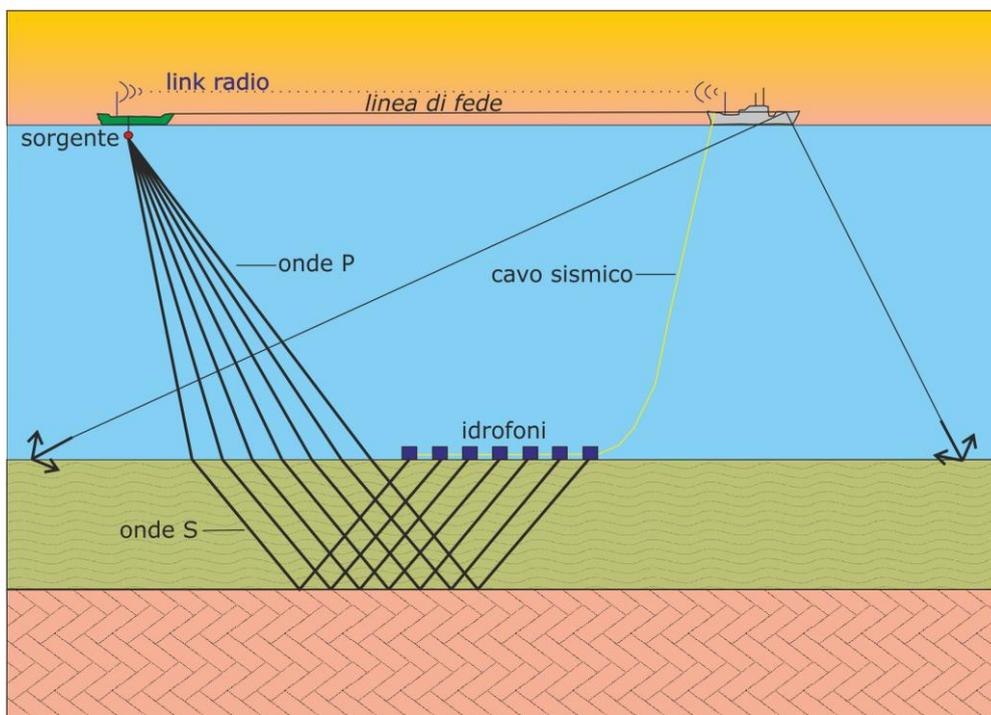


Figura 9. Modello schematico della configurazione sorgente/ricevitori.

Per ogni giornata lavorativa, le operazioni effettuate nel corso dell'acquisizione possono essere riassunte sinteticamente in tre fasi come di seguito riportato:

FASE 1. Arrivo sulla sponda del Fiume Volturno e preparazione della strumentazione (Figura 10). Trasferimento dei natanti nella zona di acquisizione ed installazione della "linea di fede".



Figura 10. Arrivo sul sito: organizzazione e mobilitazione della strumentazione.

FASE 2. (Figura 11). Immersione degli idrofoni dal gozzo secondo l'allineamento garantito dalla linea di fede. Montaggio sul peschereccio del sistema di acquisizione e di registrazione ed allestimento sul gozzo del sistema di energizzazione. Gli idrofoni sono adagiati sul fondo del mare ad una profondità che varia, avanzando da NE verso SW, da 2.6 metri a 6.2 metri. Le energizzazioni sono state eseguite ad una profondità di 0.5 metri dalla superficie del mare.



Figura 11. Alcune fasi dell'acquisizione. A) Calata in mare del Watergun. B) Squadra impegnata sul gozzo nell'allestimento del "gun controller"; C) Squadra impegnata sul peschereccio nel montaggio della stazione d'acquisizione.

FASE 3. Acquisizione della linea sismica (Figura 12), lunga 297,5 metri, con intertraccia 2,5 metri ed intervallo di scoppio di 2,5 metri.



Figura 12. Acquisizione linea sismica. (A) Assicurati alla “linea di fede” si procede con l’energizzazione. (B) Controllo e registrazione dei dati.

L’attività di geofisica svolta ha previsto l’acquisizione di tre profili sismici per un totale di 537,5 metri di indagini.

L’acquisizione è stata eseguita utilizzando uno stendimento di 72 canali (pari a 3 geodi) che è stato traslato per due volte lungo il profilo (figura 13) lasciando un geode in comune (24 canali) con l’array precedente.

I profili sismici sono stati acquisiti con una geometria di tipo “off-end push increase”.

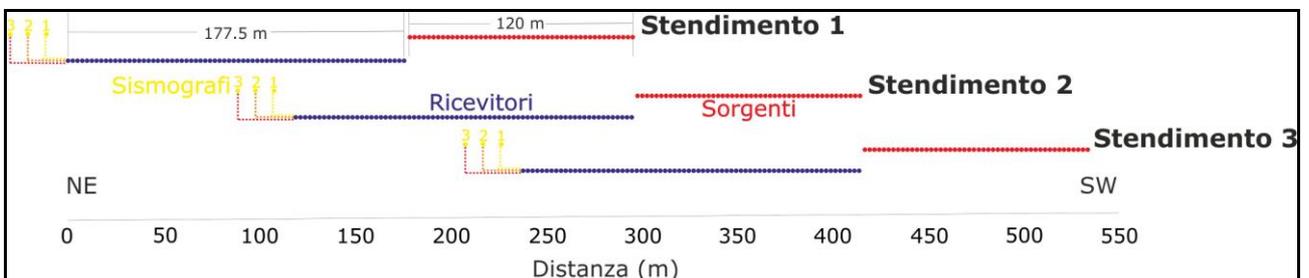


Figura 13. Schema di acquisizione. I punti blu rappresentano i sensori; quelli gialli i sismografi: ad ogni sismografo sono collegati 24 ricevitori. I punti rossi sono relativi alle posizioni di energizzazione.

La geometria d’acquisizione, che ha previsto l’impiego di uno stendimento di idrofoni con spaziatura regolare di 2,5 metri, è consistita nell’esecuzione di energizzazioni esterne dello stendimento idrofonico regolarmente spaziate ogni 2,5 metri. Per ogni posizione di energizzazione la pressione di esercizio è stata di 100 bar.

Tale strategia d’acquisizione ha permesso d’ottenere un’interdistanza tra i CDP (Common Depth Point) di 1,25 m e quindi un’elevata ridondanza dei dati. La geometria d’acquisizione utilizzata, consentendo un fitto campionamento spaziale e temporale in un ampio intervallo di offset, permetterà una ricostruzione di dettaglio dell’assetto geologico-strutturale dell’area indagata.

Nella Tabella 6 sono riportati i dati relativi alla geometria d’acquisizione del profilo sismico.

	Profilo Sismico
Lunghezza	537.5 m
Sorgente sismica	Watergun S-15
Distanza idrofonica	2.5 m
Spaziatura sorgenti	2.5 m
Numero energizzazioni	145
Pressione d'esercizio	100 bar
Profondità d'esercizio	0.5 m
Numero canali complessivi	168 idrofoni a 10 Hz
Finestra temporale	2000 ms
Campionamento temporale	0.5 ms.
Spaziatura CDP	1.25 m
Massima copertura CDP	48
Numero CDP	312

Tabella 6: parametri della geometria d'acquisizione.

Le tracce totali acquisite sono state 10440; la geometria d'acquisizione utilizzata ha consentito di avere un'elevata copertura CDP con un valore massimo di 48 tracce (Figura 14).

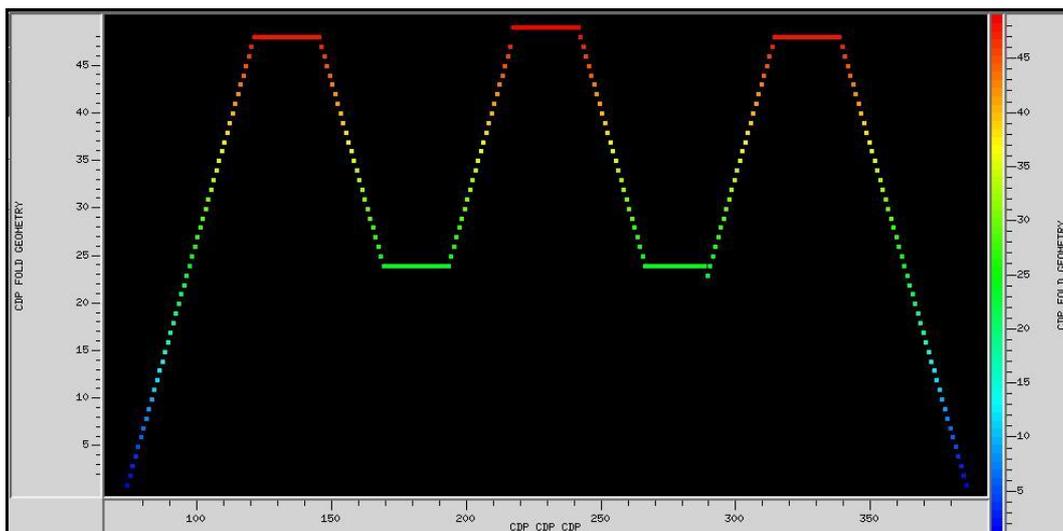


Figura 14. Copertura dei CDP per il profilo sismico.

5. ESEMPIO DI DATO E METODOLOGIA

L'analisi preliminare dei dati sismici acquisiti a Castel Volturno ha messo in evidenza una buona qualità del dato. Le fasi primarie sono ben evidenti, rispetto al rumore sismico ambientale, anche per ricevitori a grande distanza dalla sorgente (Figura 15).

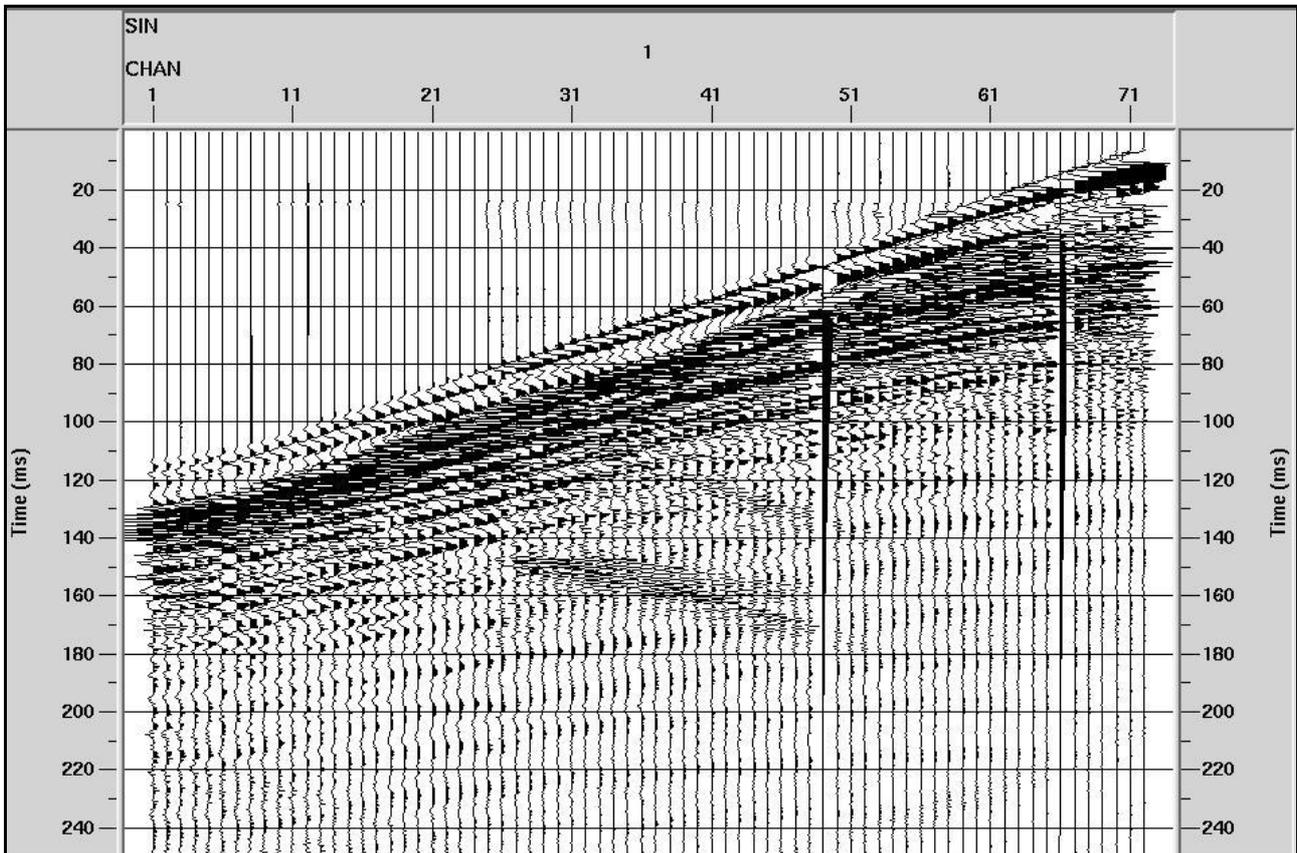


Figura 15. Esempio di Common Shot Gather acquisito a Castel Volturno.

La geometria d'acquisizione utilizzata ha consentito di campionare, in un ampio intervallo di offset (da 2.5 fino a 297.5 m), sia eventi riflessi sia onde rifratte che penetrano in profondità grazie ai grandi offset acquisiti, e quindi permetterà di elaborare efficacemente i dati sia in chiave di sismica a riflessione che a rifrazione.

Questa elaborazione combinata migliora la qualità del prodotto finale e inoltre fornisce all'interprete informazioni complementari (ovvero sezioni stack e immagini tomografiche), che facilitano la successiva interpretazione geo-strutturale del dato geofisico.

L'elaborazione a riflessione verrà eseguita attraverso il software commerciale ProMAX 2D della Landmark.

L'individuazione della sequenza di elaborazione ottimale da applicare al dato, al fine di ottenere il miglior risultato in termini di immagine sismica, verrà tarata in base alla qualità ed alle caratteristiche del dato registrato in campagna. L'elaborazione verrà articolata in tre fasi: 1) pre-processing; 2) analisi di velocità e stacking; 3) post-stack.

Inizialmente il dato, raggruppato per punto di energizzazione comune (Common Shot Gather - CSG), verrà trattato al fine di incrementare il rapporto segnale-rumore. A questo scopo verranno eliminate le tracce morte o caratterizzate da un bassissimo rapporto segnale/rumore e saranno eseguiti dei test di filtraggio per attenuare il rumore ambientale. L'applicazione della deconvoluzione (spiking e/o predittiva) sarà utile per aumentare il contenuto in frequenza del segnale (e conseguentemente la risoluzione verticale) ed per attenuare le riverberazioni e le multiple, a favore degli eventi riflessi primari.

Parallelamente all'elaborazione delle fasi sismiche a riflessione verrà anche eseguita un'analisi a rifrazione del dato acquisito. Tale fase consisterà nella lettura dei tempi relativi alle onde dirette e rifratte. Tali letture, dopo essere state accuratamente verificate, verranno poi invertite sulla base di un modello iniziale di velocità 1D. Il risultato sarà un'immagine bidimensionale che mostra la distribuzione delle velocità sismiche del sottosuolo. I tomogrammi oltre a fornire informazioni aggiuntive per l'interpretazione dei dati in chiave geo-strutturale, verranno anche impiegati nella sequenza di elaborazione a riflessione.

Nella successiva fase d'elaborazione, i dati verranno raggruppati per punto comune di riflessione (CDP) per eseguire l'analisi di velocità, necessaria per la correzione di Normal Moveout (NMO) e la successiva sommatoria (stack) delle tracce sismiche con gli eventi riflessi in fase.

Le sezioni stack potranno poi essere trattate con dei processi di filtraggio spaziale per migliorare l'informazione coerente e ridurre il rumore casuale.

Infine, per aumentare la corrispondenza tra la sezione sismica e la realtà geologica investigata, sarà possibile applicare algoritmi di migrazione post-stack.