



**CNR
ISMAR**
ISTITUTO
DI SCIENZE
MARINE

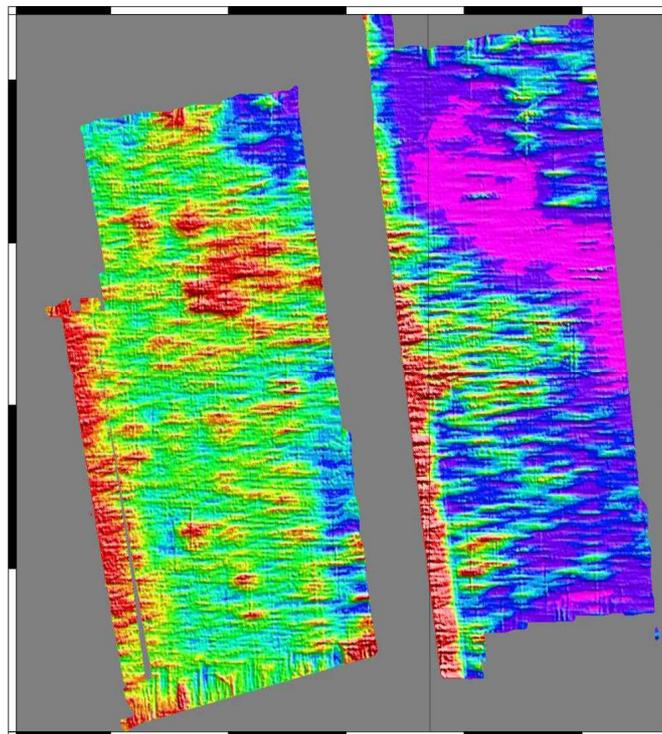
Laboratorio Geofisico, Sede di Bologna

Progetto TAO

Tecnologie per il monitorAggio cOstiero

Elaborazione dati morfo-stratigrafici in ambienti costieri per mezzo di algoritmi innovativi

Giuseppe Stanghellini, Camilla Bidini, Alessandra Mercorella, Luca Gasperini, Alina Polonia, Fabrizio Del Bianco*



Relazione Tecnica, Febbraio 2021

Indice

- 1.0 Introduzione
- 2.0 Aree di Studio
- 3.0 Strumenti
- 4.0 Organizzazione dei dati
- 5.0 Tecniche Innovative di Elaborazione
- 6.0 Risultati e Conclusioni
- 7.0 Bibliografia e Sitografia

1. INTRODUZIONE

Gli ambienti acquatici naturali caratterizzati da fondali poco profondi sono ecosistemi relativamente fragili che costituiscono importanti aree economiche e per questo soggetti a forte impatto antropico; ne sono un esempio i porti, le dighe ed i bacini idrici, laghi e lagune, tutti caratterizzati da *record* stratigrafici ben conservati e continui. In base a tali caratteristiche, questi ambienti risultano di grande interesse, sia per lo studio di processi oceanografici e geologici, che per indagini archeologiche e paleoambientali, trovandosi vicini ad insediamenti moderni e antichi. Tali ambienti devono essere preservati, e necessitano di un monitoraggio periodico al fine di mitigare gli effetti dei processi naturali e soprattutto dell'attività umana.

Le aree costiere sono fortemente influenzate da impatti naturali e antropici. Questa è la previsione allarmante di un numero crescente di scienziati e ONG ambientali (Padmalal and Maya, 2014; Gavriletea, 2017). Tra questi impatti, l'esaurimento della sabbia dovuto al ridotto apporto di sedimenti fluviali e l'estrazione di sabbia. La sabbia è, infatti, un bene vitale per le nostre economie moderne, poiché è la risorsa naturale alla base di qualunque infrastruttura, venendo utilizzata in numerose applicazioni (case, grattacieli, ponti, aeroporti, ecc.). Proprio per questo, rappresenta la risorsa naturale più consumata sul pianeta dopo l'acqua dolce. Diversi fattori contribuiscono alla scomparsa di molte spiagge in tutto il mondo, comprese le trappole di sedimenti costituite da dighe artificiali, l'estrazione incontrollata della sabbia e gli effetti combinati dell'innalzamento del livello del mare e del cedimento del suolo, e dalla subsidenza indotta dagli emungimenti in acquiferi costieri.

Sia a scala globale che a maggior ragione a scala italiana, con più di 7000 km di coste, e per la nostra regione (l'Emilia Romagna), le zone costiere sono le più esposte agli effetti combinati di cambiamenti globali e pressione antropica.

A parte le considerazioni politiche, la comprensione delle variabili ambientali e geologiche che controllano l'erosione rispetto alla deposizione nell'ambiente costiero è un passo fondamentale verso la conservazione di ecosistemi così importanti, che implica una combinazione di approcci investigativi, come la biologia, l'oceanografia fisica e chimica e la geologia. Il punto di partenza di ciascuno di questi studi è la conoscenza, a diversi livelli di accuratezza, dell'interfaccia sedimento-acqua. I cambiamenti di morfologia e riflettività acustica del fondo marino sono le variabili fondamentali per descrivere lo stato del sistema e monitorarne l'evoluzione (Gasperini, 2005). La caratteristica principale delle zone costiere è la batimetria estremamente superficiale e l'elevata variabilità laterale dei tipi di fondale, controllata da fattori geologico/biologici, come la granulometria media dei sedimenti, i livelli di erosione o diagenetica, presenza di caratteristiche bio-costruttive, ecc. la subsidenza indotta da cause naturali e antropiche (emungimento da acquiferi sotterranei, estrazione di idrocarburi) è un fattore importante e in rapida evoluzione nel causare instabilità delle zone costiere. Sebbene in circostanze particolari la mappatura del telerilevamento nelle aree costiere possa essere ottenuta utilizzando il rilevamento satellitare o aereo, i sondaggi sonori/ultrasonici convenzionali sono ancora più accurati, poiché le tecniche di telerilevamento sono limitate alle aree con acque poco profonde e limpide, senza contaminazione atmosferica. Una combinazione di indagini geofisiche di telerilevamento, geodetiche e convenzionali potrebbe essere un approccio ideale a questo particolare problema, e guidare gli interventi di mitigazione del rischio (van Rijn, 2011). Tuttavia, l'acquisizione di dati batimetrici e di riflessione sismica in acque poco profonde è difficile, perché la profondità media è spesso al di sotto del limite degli ecoscandagli convenzionali e dell'accessibilità della barca, e il rumore dovuto alle onde e alla turbolenza nella colonna d'acqua influisce fortemente sulla qualità delle misure. In questo modo i primi metri di profondità dell'acqua, i più dinamici in termini di processi erosivi e deposizionali, sono i meno indagati. L'introduzione di un sistema autonomo per l'esecuzione di indagini geofisiche ripetute delle aree costiere, in combinazione con tecniche di telerilevamento, fornirebbe un'interessante opportunità per raccogliere dati ad alta

risoluzione nelle aree costiere, aprendo le porte a indagini ripetute (4D). È questo uno dei principali obiettivi del Progetto TAO. Infatti, gli studi geofisici in ambienti con acque poco profonde (inferiori a pochi metri) non sono ad oggi una pratica molto consolidata, nonostante la loro importanza economica e sociale richieda lo sviluppo di nuove tecnologie e metodi che potrebbero essere offerti ad una gamma più ampia di ricercatori. I recenti progressi nel campo della robotica marina (*Remote Operating Vehicles, Autonomous Surface Vehicles*, ecc.) sono un'opportunità interessante in questo senso ([Stanghellini et al., 2020](#)), e aprono al monitoraggio e all'acquisizione ed analisi multidimensionale/multiparametrica di dati geofisici marini.

È in quest'ottica che ricade lo sviluppo tecnologico proposto nell'ambito del Progetto TAO, che ha come obiettivo primario combinare l'utilizzo di veicoli autonomi di superficie con lo sviluppo di sensori e tecniche di acquisizione innovative. Un esempio è l'utilizzo integrato tra veicoli autonomi e sistemi chirp-sonar, che generano un segnale modulato in frequenza altamente ripetibile, che permette una stima accurata della riflettività del fondale e che può essere utilizzato per individuare le proprietà geologiche che lo caratterizzano. Per mezzo di un veicolo autonomo, il cui sviluppo è previsto dal Progetto, integrato da sensori ecografici e stratigrafici innovativi è possibile acquisire sezioni del sottosuolo densamente spaziate, che in presenza di fondali poco profondi realizzano un *imaging* pseudo-3D e 4D della sotto-superficie ([Gasperini et al., 2020](#); [Gasperini et al., 2021](#)), per studiare le forzanti principali che contribuiscono alla continua modellazione di questi ambienti estremamente dinamici (onde, correnti, ecc..) e valutare l'efficacia delle opere di difesa.

In questo Rapporto Tecnico, presentiamo l'applicazione di algoritmi innovativi di elaborazione di dati acquisiti nelle aree campione del progetto TAO.

2. AREE DI STUDIO

In questa relazione tecnica, vengono illustrate le differenti tipologie di dati acquisiti durante i rilievi previsti dal Progetto TAO, e il risultato di elaborazioni innovative sviluppate al fine di ottenere informazioni significative riguardo la composizione del fondale e le sue caratteristiche morfologiche e sedimentarie. I dati acquisiti durante le campagne di rilievo provengono da tre siti di studio, scelti tra alcune delle località più importanti del litorale della costiera adriatica: Foce del Fiume Bevano (RA), Lido di Dante (RA), e Riccione (RN).

Le zone costiere relative alle località indagate sono parte integrante del litorale Emiliano-romagnolo, caratterizzate da fondali poco profondi e generalmente poco acclivi nei primi metri di spiaggia emersa e sommersa. Nonostante ciò, come illustrato in questo report, presentano caratteristiche ambientali e morfologiche piuttosto differenti che sono emerse in seguito alle indagini effettuate:

- 1) La Foce del Fiume Bevano (Figura 1) è situata nella fascia litoranea di dune costiere naturali comprese tra Lido di Dante e Lido di Classe, in provincia di Ravenna, e si colloca in una riserva naturale a pochi km da località molto importanti per il turismo balneare della riviera, per questo fortemente antropizzate. Questa zona del litorale è caratterizzata dalla prevalenza di un fondale sabbioso, con una profondità massima di 4 – 5 m.

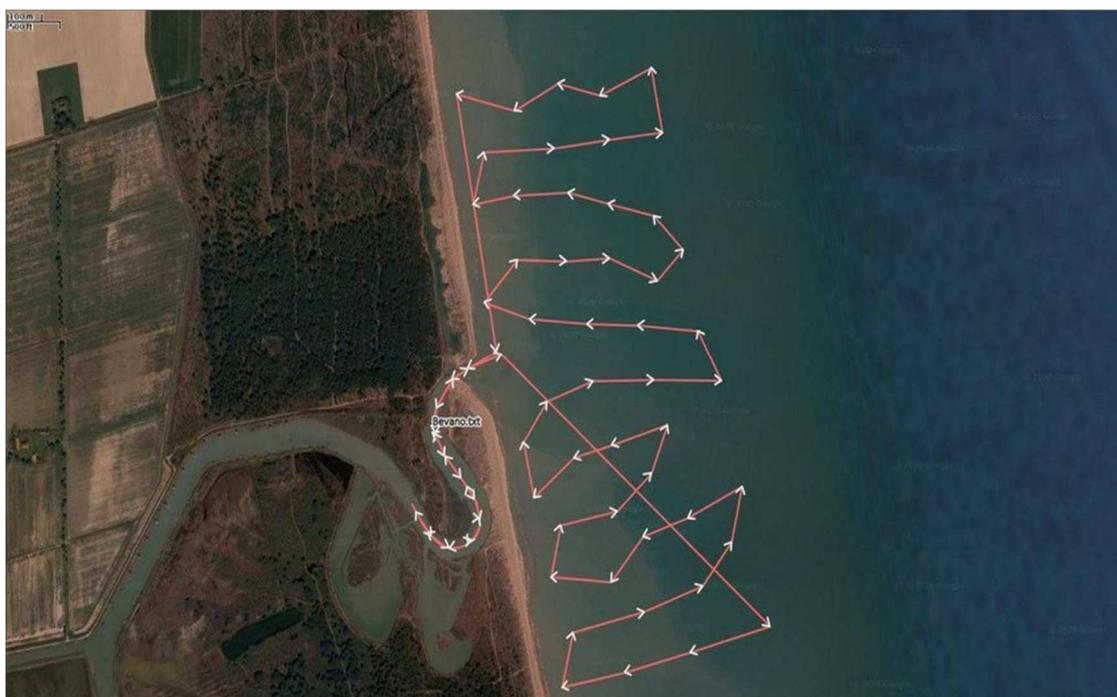


Figura 1. Rotte di navigazione del veicolo autonomo al sito Foce del Bevano realizzate per l'acquisizione dei dati geofisici. Base fotografica da OpenStreetMap (www.openstreetmap.org)

- 2) La fascia costiera antistante il Lido di Dante, a sud del Camping Ramazzotti, per un'area complessiva di circa 1,6 km² (Figura 2); in questo sito, sono presenti barriere semi-sommerse a protezione della costa, in un battente di acqua della profondità massima di 5 m.



Figura 2. Rotte di navigazione del veicolo autonomo al sito di Lido di Dante realizzate per l'acquisizione dei dati geofisici. Base fotografica da OpenStreetMap (www.openstreetmap.org)

- 3) La fascia costiera di Riccione, una località molto importante per il turismo balneare della riviera e per questo fortemente impattata; lungo il litorale vengono periodicamente effettuati interventi di ripascimento con sedimenti sabbiosi al fine di preservare la zona costiera dalla forte erosione; l'area di indagine relativa al sito di studio è visibile in Figura 3.

I rilievi si sono svolti mediante l'utilizzo del veicolo autonomo di superficie, realizzato nell'ambito del progetto TAO, che ha eseguito la raccolta dati seguendo rotte di navigazione preimpostate ed equipaggiato dalla specifica strumentazione geofisica realizzata nell'ambito del Progetto stesso, costituita da *Side-Scan Sonar*, *Ecografo a fascio singolo* e *Sub-bottom profiler* a tecnologia CHIRP (*chirp-sonar*), in grado quest'ultimo di penetrare le prime decine di metri all'interno della successione sedimentaria.



Figura 3. Rotte di navigazione del veicolo autonomo durante l'acquisizione dati relativa al sito di Riccione. Base fotografica da OpenStreetMap (www.openstreetmap.org)

I dati di Side-scan, di Single-beam e di Sub-bottom così ottenuti sono stati organizzati in un database (Capitolo 4) e hanno permesso la realizzazione delle mappe batimetriche e dei profili stratigrafici (Capitolo 5) relativi ai tre siti di studio.

3. STRUMENTI

3.1 Side Scan Sonar

Sul veicolo autonomo è installato un Side-Scan Sonar commerciale, lo Starfish 990F (Figura 4), prodotto dalla Tritech. Si tratta di uno strumento relativamente economico, portatile e leggero, ma con caratteristiche utili al raggiungimento degli obiettivi previsti dal progetto TAO, e cioè l'acquisizione di immagini acustiche del fondale marino ad una risoluzione simile a quella di un rilievo fotogrammetrico. Il flusso di lavoro per l'elaborazione dei dati acquisiti da questo strumento è stato formulato tenendo in considerazione le specificità dello strumento, come frequenza di emissione del segnale (900 kHz), che controlla la risoluzione dei dati, e la larghezza dello "swath", il cono di insonificazione che controlla la copertura laterale dello strumento. Questi parametri sono stati decisi sulla base delle esigenze specifiche di ogni sito in esame, e sulla ipotizzata utilità delle immagini side-scan a fare luce sui processi geologici in atto.



Figura 4. Il sistema Side-Scan sonar StarFish 990F della Tritech utilizzato nel corso dei rilievi

3.2 Ecoscandaglio/Ecografo a fascio singolo

I dati ecografici sono stati acquisiti utilizzando un ecoscandaglio a fascio singolo e incidenza normale accoppiato a un sistema di campionamento del segnale basato su tecnologie “open” sviluppate in ISMAR-CNR (Stanghellini et al., 2020). Anche i dati ecografici sono stati acquisiti secondo parametri definiti sulla base delle caratteristiche delle aree di indagine, in modo da ottenere una buona copertura del fondale relativamente agli obiettivi geologici. I dati acquisiti da un sistema ecografico a fascio singolo sono generalmente costituiti dalle misure dei tempi di percorrenza dell’impulso ultrasonico (200 kHz nel nostro caso) che l’impulso acustico impiega dalla sua emissione alla successiva riflessione dal fondale e quindi al suo ritorno al punto di emissione, cioè a quello che tecnicamente viene chiamato “tempo di volo”. Nel caso della strumentazione installata sul natante autonomo OpenSWAP (Stanghellini et al., 2020) la tipologia di dato registrato contiene in aggiunta a ciò anche tutto l’ecogramma temporale dalla emissione dell’impulso acustico alla sua ricezione, questo permette tramite opportuna elaborazione acustica di ottenere informazioni aggiuntive molto utili per la classificazione del fondale come la riflettività e di conseguenza, tramite opportuna fase di calibrazione, anche di granulometria.

I dati di acquisizione utilizzati dal “single-beam-echosounder” per le campagne di rilevamento oggetto di questa relazione sono riportati in Tabella 1.

frequenza emessa	200 kHz
lunghezza impulso	200 μ sec
n. di campioni	5000

Tabella 1

3.3 Sub-bottom profiler

I dati di sub-bottom sono stati acquisiti utilizzando un sub-bottom con tecnologia CHIRP, completamente programmabile, sviluppato nell'ambito del progetto TAO (Figura 5) ed integrato al veicolo autonomo di superficie.



Figura 5. Prototipo del trasduttore Sub-bottom Profiler integrato al veicolo ed utilizzato per le campagne di acquisizione TAO

La caratteristica peculiare del "sub-bottom" installato sul natante autonomo OpenSWAP è la completa programmabilità dell'ecogramma di emissione (impulso CHIRP) questo consente da un lato di avere il controllo sulla tipologia del segnale acustico emesso e quindi sulla sua potenziale energia di impatto sul fondale e dall'altro la possibilità di applicare metodiche di riduzione del dato acquisito che prendono in considerazione l'esatta forma d'onda dell'impulso emesso. Con una oculata scelta del procedimento matematico di estrazione dell'impulso dalle forme d'onda si ottiene come vedremo un notevole miglioramento della risoluzione e della ampiezza del segnale ricevuto. I dati di acquisizione utilizzati dal "sub-bottom-profiler" per le campagne di rilevamento oggetto di questa relazione sono di seguito riportati (Tabella 2).

frequenza emessa	2-7 kHz
lunghezza impulso	1-5 msec
n. di campioni	10000

Tabella 2

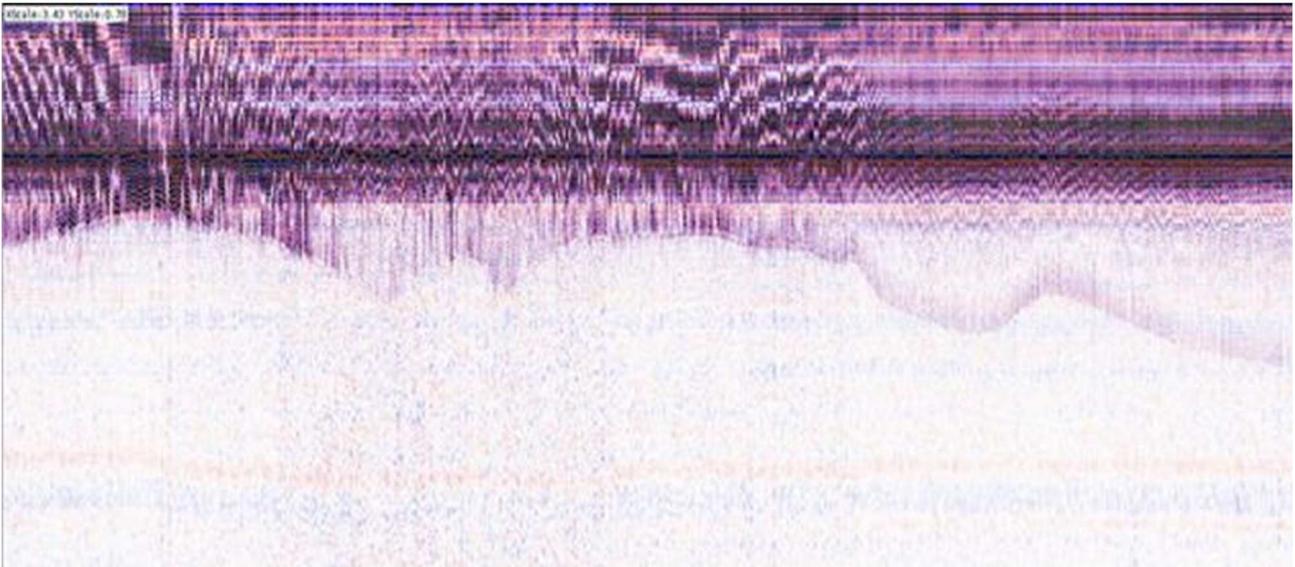


Figura 6. Esempio di dati si subbottom profiler CHIRP prima dell'applicazione dell'algoritmo di "dechirping". Come si può notare, la "leggibilità" è molto limitata sussistendo nel sismogramma gli effetti delle oscillazioni secondarie dovuti alla lunghezza dell'ondina sorgente.

4. ORGANIZZAZIONE DEI DATI

I dati raccolti durante le campagne di rilievo previste per il Progetto TAO sono stati raccolti e strutturati in un database in cui la prima e più naturale suddivisione è stata ottenuta a partire dai tre siti studio di Progetto:

- Riccione
- Foce del fiume Bevano
- Lido Di Dante

I dati ad oggi pervenuti per l'elaborazione e raccolti nel suddetto database sono relativi ai seguenti rilievi:

- Foce del fiume Bevano
SURVEY 1: BEVANO-2020-07
SURVEY 2: BEVANO-2020-09

- Lido Di Dante
SURVEY 1: LIDODIDANTE-2020-10

- Riccione
SURVEY 1: RICCIONE-2020-12

Durante ogni campagna di rilievo i dati sono stati raccolti dal veicolo autonomo di superficie equipaggiato con la strumentazione geofisica, citata nel precedente Capitolo, che ha permesso di ottenere dati di tipo *chirp*, *echo* e *side-scan*, inseriti nel database con una struttura "ad albero". Una volta ordinati i dati *raw*, si è proceduto all'elaborazione di questi secondo le procedure ampiamente spiegate nel Capitolo 3.

Infine, i prodotti delle elaborazioni sono stati organizzati con la medesima struttura dei dati *raw*, andando a costituire i dati processati a partire dai quali si sono ottenuti i profili stratigrafici e le mappe, rappresentative della morfologia del fondale.

5. TECNICHE INNOVATIVE DI ELABORAZIONE DI DATI MORFO-STRATIGRAFICI

5.1 Profili Stratigrafici

I profili sono stati ottenuti mediante i dati di sub-bottom, acquisiti utilizzando il sub-bottom con tecnologia CHIRP, integrato e programmabile, sviluppato nell'ambito del progetto TAO. Considerando le profondità di indagine e la tipologia di sedimento del substrato, sono stati scelti i parametri di acquisizione riportati in Tabella 3

Pulse length: 5 ms. Frequency: 2-7 kHz Ping Rate: 6 Hz
--

Tabella 3

Queste acquisizioni costituiscono uno dei primi esempi di dati provenienti da tale sensore, sviluppato ad-hoc per il progetto TAO, e devono essere validati anche dal punto di vista della qualità. Si tratta di dati di tipo RAW e scritti nel formato SEG-Y, non ancora sottoposti fase di "dechirp" (vedi Figura 6), mancanti cioè dello step iniziale del processo di elaborazione che "deconvolve" il segnale emesso dal segnale ricevuto, rendendo visibili il fondale e gli strati sedimentari a maggiori profondità.

L'operazione di "dechirp" è stata effettuata applicando un algoritmo messo a punto sulle caratteristiche di ampiezza, frequenza e rumore dei dati in oggetto ed ha permesso di "comprimere" gli impulsi acustici riflessi alle varie discontinuità stratigrafiche (contrasti di impedenza acustica) e consentito l'interpretazione dei profili stratigrafici.

In Figura 7 è visibile una sezione elaborata del profilo sismico a riflessione relativo alla zona "Foce del Bevano" in cui è stato evidenziato il fondale e alcuni riflettori interni. Come si vede, le procedure di elaborazione dei dati descritte nelle sezioni successive hanno permesso di ottenere immagini acustiche di ottima qualità della sotto-superficie marina, con penetrazione di qualche metro e risoluzione verticale centimetrica. Queste immagini rappresentano vere e proprie sezioni geologiche, che possono essere interpretate sulla base di analogie con gli affioramenti rocciosi, e forniscono informazioni preziose circa i processi sedimentari alla base della deposizione/erosione dei sedimenti.

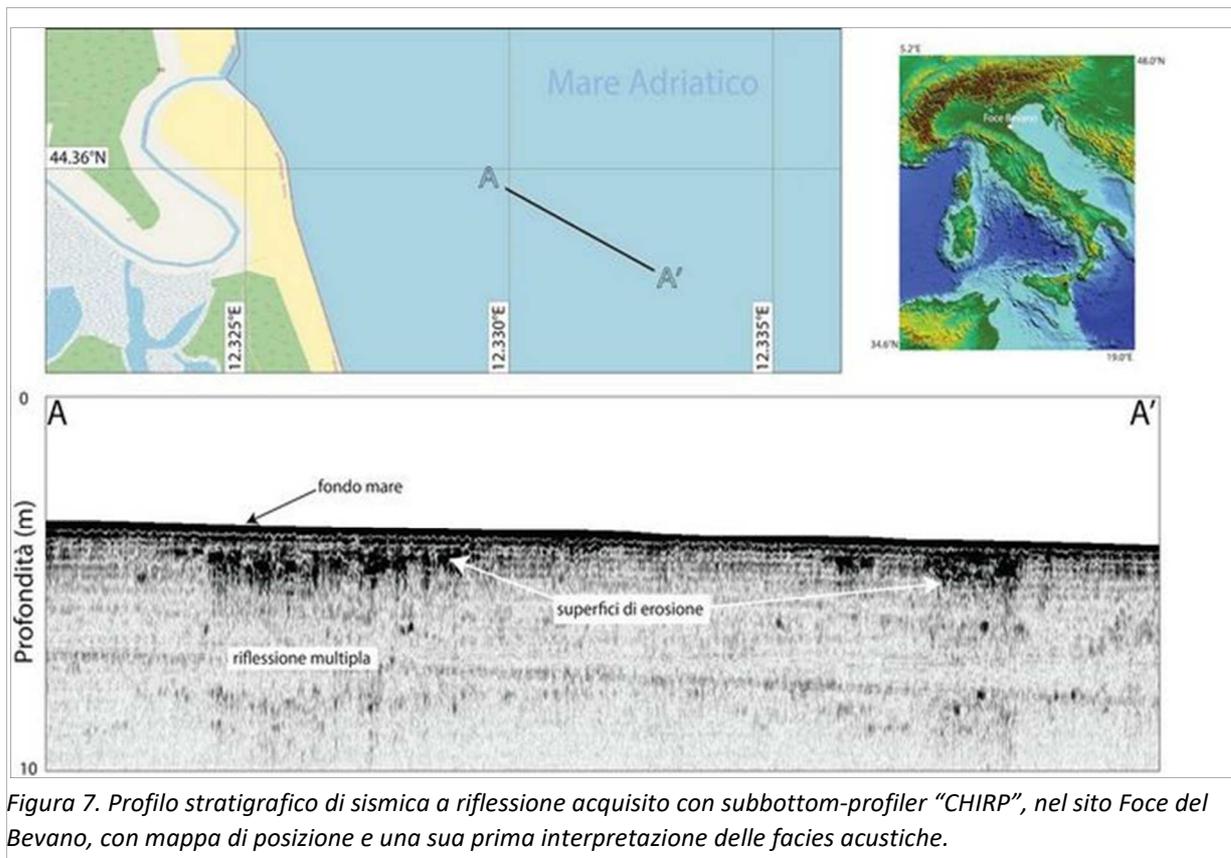


Figura 7. Profilo stratigrafico di sismica a riflessione acquisito con subbottom-profiler "CHIRP", nel sito Foce del Bevano, con mappa di posizione e una sua prima interpretazione delle facies acustiche.

5.2 Operazioni di filtraggio dei dati

La messa a punto del flusso di elaborazione è stata suddivisa in due fasi: la prima di riduzione dell'impulso "chirp" e la seconda di elaborazione vera e propria.

5.2.1 Ottimizzazione e Riduzione della lunghezza dell'impulso (*dechirping*)

È stata sviluppata, utilizzando l'ambiente OpenSource Octave, compatibile ad alto livello con il pacchetto commerciale Matlab¹ e di seguito descritta.

Vengono consegnate, assieme ai risultati della elaborazione dei dati e cioè alle mappe morfo-stratigrafiche, anche le procedure in linguaggio Octave/Matlab che sono state utilizzate a tal fine. Si riassume di seguito il flusso di elaborazione per la fase di dechirp, utilizzata da tali procedure.

I) Debias del segnale (il segnale acquisito presenta uno spostamento verso l'alto delle ampiezze ricevute pari ad un valore digitale di 2048)

II) Filtraggio con filtro passa banda (il segnale acquisito presenta rumore incoerente a varie frequenze lontane da quelle emesse, probabilmente rientrando dal sistema natante)

III) Generazione della rappresentazione digitale della forma d'onda rappresentante l'impulso modulato in frequenza (CHIRP) emesso dal sistema, per fare questo sono stati utilizzati i parametri presenti nel file SEG Y di acquisizione che descrivono le caratteristiche dell'impulso emesso.

IV) Cross-correlazione della rappresentazione digitale della forma d'onda dell'impulso con la forma d'onda risultante dai precedenti passi

V) Generazione della *minimum-phase wavelet* e cross-correlazione di essa con la forma d'onda risultante dai precedenti passi.

5.2.2 Elaborazione finale delle immagini stratigrafiche

La procedura di "dechirp" permette di agire sull'ecogramma, che è stato filtrato dal rumore presente favorendo la successiva elaborazione (di seguito descritta) e l'interpretazione del relativo profilo sismico:

I) Operazione di "swell correction" integrata in SeisPrho: rimozione dell'effetto dell'onda di movimento verticale (*heave*);

II) Applicazione della funzione di TVG (time-variant gain) per migliorare la resa grafica dei profili (Figura 7);

III) Operazione di "flattening", che ha permesso di riportare tutto alla profondità del bottom-detection, escludendo la colonna d'acqua;

IV) Rendering grafico: per cui a partire dal profilo sismico vengono generate delle *bitmap*.

¹link al sito: <https://it.mathworks.com/downloads/>

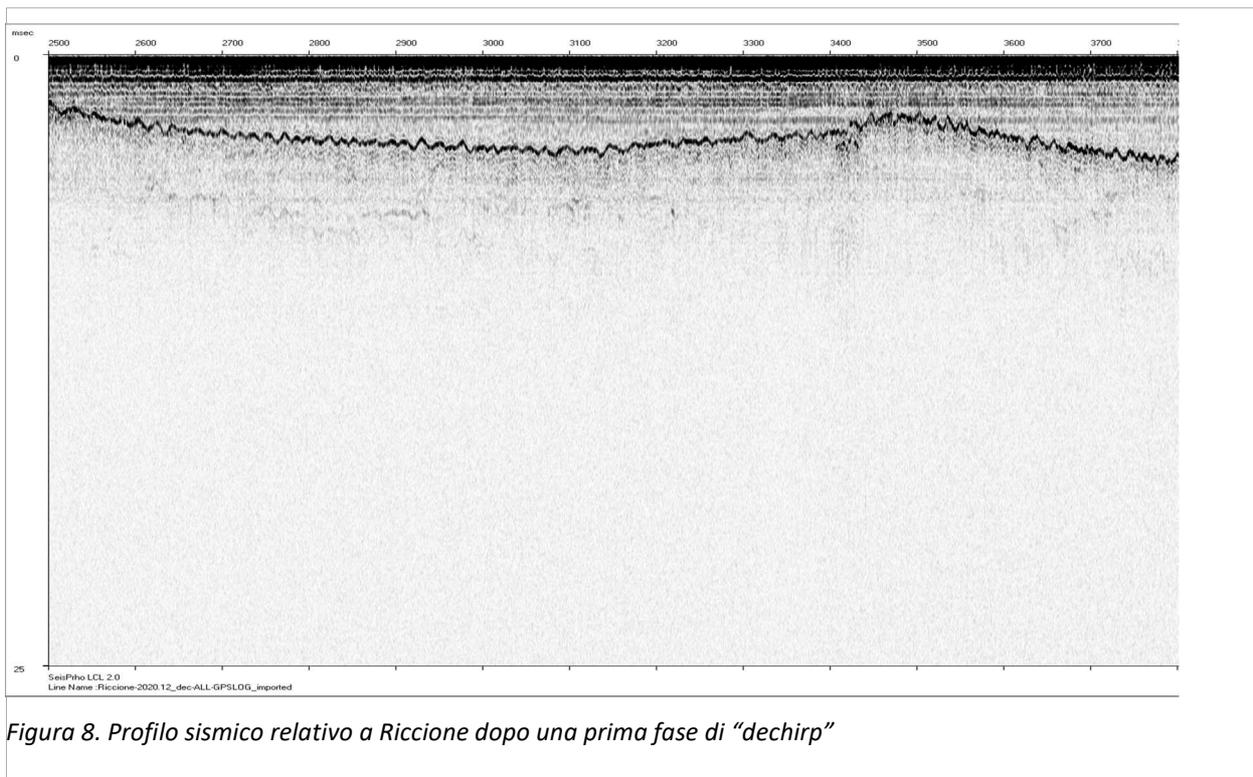


Figura 8. Profilo sismico relativo a Riccione dopo una prima fase di “dechirp”

I profili sismici riprodotti in Figura 8 e Figura 9 comprovano la validità degli algoritmi di elaborazione sviluppate nell’ambito del Progetto, e permettono di verificare come esse permettano di ottenere profili stratigrafici in cui appare chiara la successione degli strati più profondi rispetto all’interfaccia acqua-sedimento. La penetrazione del segnale all’interno del sedimento è molto variabile in funzione delle litologie e della presenza di fluidi o superfici di diagenesi precoce all’interno del substrato.

In condizioni “normali”, e con le granulometrie osservate nella fascia batimetrica in esame, possiamo aspettarci delle penetrazioni fino a una decina di metri al di sotto del fondale.

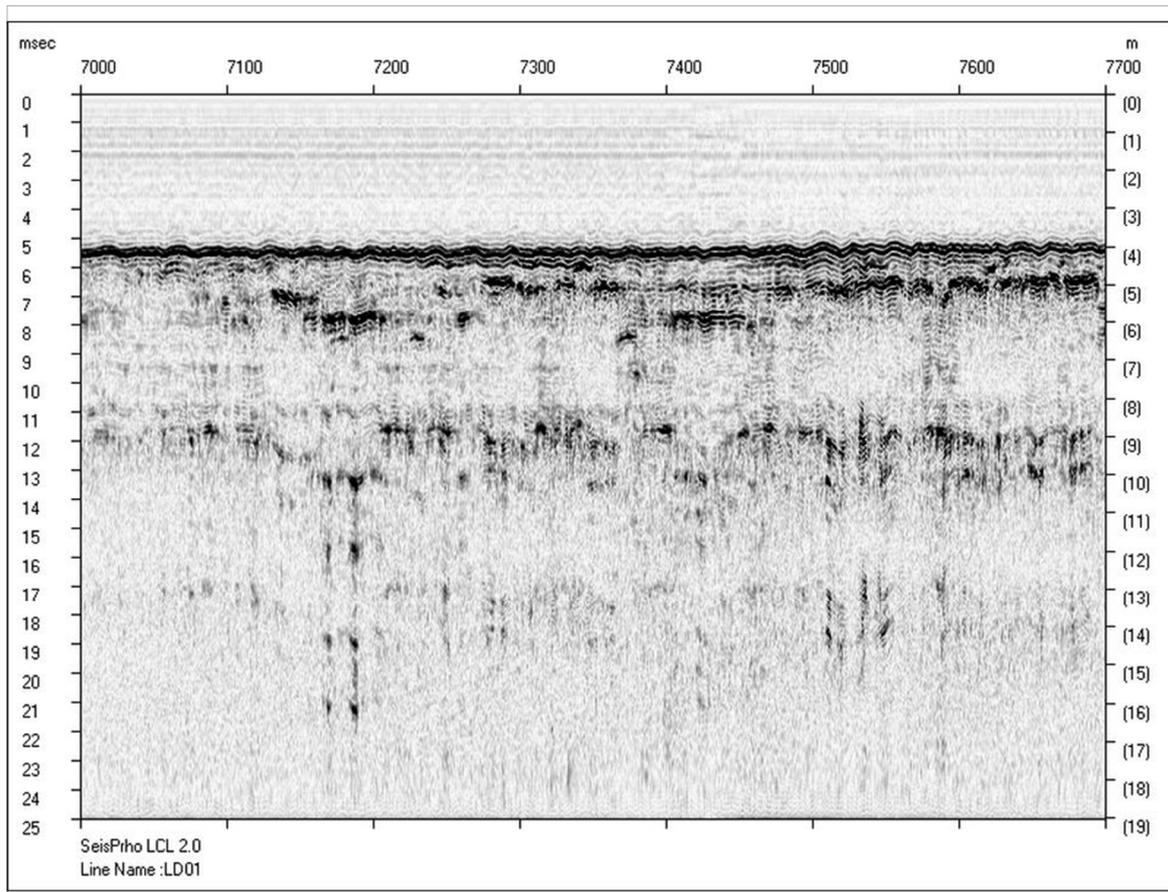


Figura 9. Esempio di profilo sismico acquisito al Lido di Dante dopo elaborazione.

Infine, sempre utilizzando il software SeisPrho² (Gasperini and Stanghellini, 2009), è stata applicata la funzione “time slice” all’estensione “.REF” dei dati elaborati. Questo ha consentito di ottenere informazioni sulla riflettività dei sedimenti che è in relazione a uno dei parametri fondamentali delle indagini geofisiche, la granulometria dei depositi sedimentari (Gasperini, 2005).

Si è proceduto come segue:

- 1) per ciascuna *time-slice* è stata stabilita la profondità alla quale visualizzare i dati di riflettività (slice level - samples) e la lunghezza della finestra temporale da integrare intorno alla profondità definita (average - samples) nella rappresentazione. L’unità di scelta dei parametri in questo caso è rappresentata dal numero di campione del file SEG-Y;
- 2) i file ASCII ottenuti sono stati elaborati con scripting BASH, attraverso l’uso del software GMT³ (Wessel et al. 2019);
- 3) Il risultato, in forma di grid numeriche in formato NetCDF, è stato reso graficamente in forma di rilievi codificati in colore, generando delle mappe di riflettività.

In Figura 10 sono riportati degli esempi di mappe di riflettività relative al sito di Lido Di Dante, ricavate ogni 50 ms. (operazione di *time slice*) e che permettono di visualizzare quattro intervalli temporali all’interno della “finestra” 450 – 650 ms.

La procedura di costruzione delle “Time-Slices” ha consentito di osservare eterogeneità laterali nella distribuzione dei corpi sabbiosi, indicative probabilmente di dinamiche sedimentarie differenti.

²scaricabile dal sito: <http://software.bo.ismar.cnr.it/seisprho>

³link al sito: <https://www.generic-mapping-tools.org/download/>

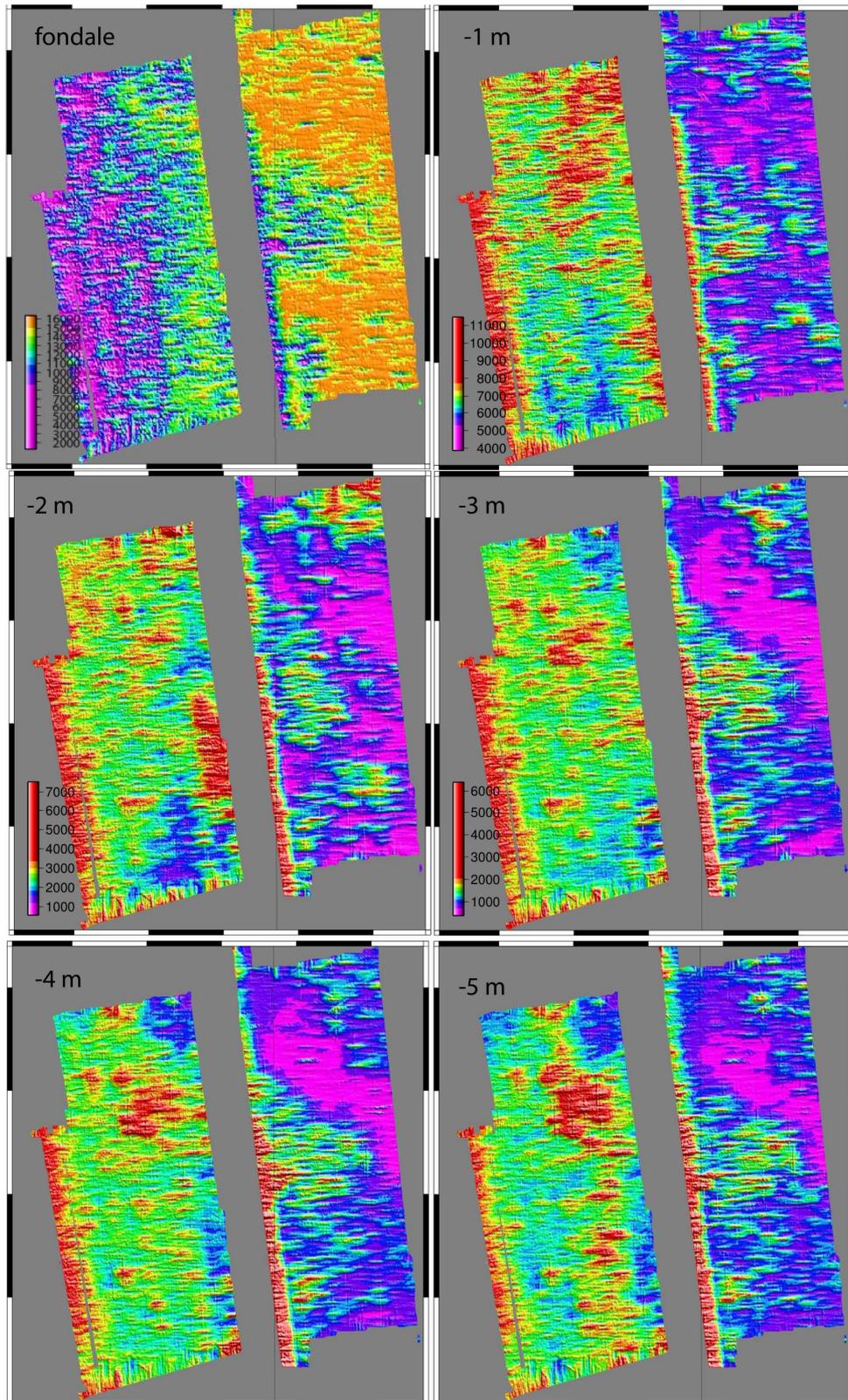


Figura 10. Sezioni del sotto-fondale (Time-Slices) a diverse profondità, dalla superficie a -5 metri. Sono rappresentate le variazioni laterali di riflettività, che sono sensibili alla granulometria media dei sedimenti: alta riflettività corrisponde a granulometrie più grossolane (sabbie, probabilmente in questo caso)

La rappresentazione in forma “time-slice” della riflettività del sottofondo marino consente di apprezzare la distribuzione laterale di questo parametro, sensibile alla variazione granulometrica del sedimento. Si tratta di immagine analoghe a quelle ottenute nelle TAC (tomografia assiale computerizzata), e interpretabili nello stesso modo.

La sperimentazione effettuata, soprattutto al Lido di Dante, ha permesso di apprezzare il potenziale di questo tipo di rappresentazione dei dati, che sarà validato attraverso analisi di campioni di sedimento nelle fasi successive del progetto.

5.3 Realizzazione mappe batimetriche

Al fine di ottenere mappe batimetriche rappresentative della morfologia del fondale è stato necessario elaborare gli ecogrammi relativi alle riflessioni acustiche da cui sono stati estratti e geo-referenziati dei punti profondità. Per prima cosa si è controllato manualmente ogni profilo sismico dopo *dechirping*, individuando la profondità del fondale (operazione di *bottom-tracking*); per farlo, si è selezionato il punto sulla verticale corrispondente alla durata del segnale acustico sorgente, e misurando il tempo impiegato a raggiungere il fondale e a tornare in superficie al ricevitore. Tale tempo di transito, detto TWT (*two-way traveltime*) è stato convertito in profondità, considerando un valore per la velocità del suono in acqua pari a 1495 m/s, che rappresenta un valore medio nelle aree in esame nelle condizioni di rilievo.

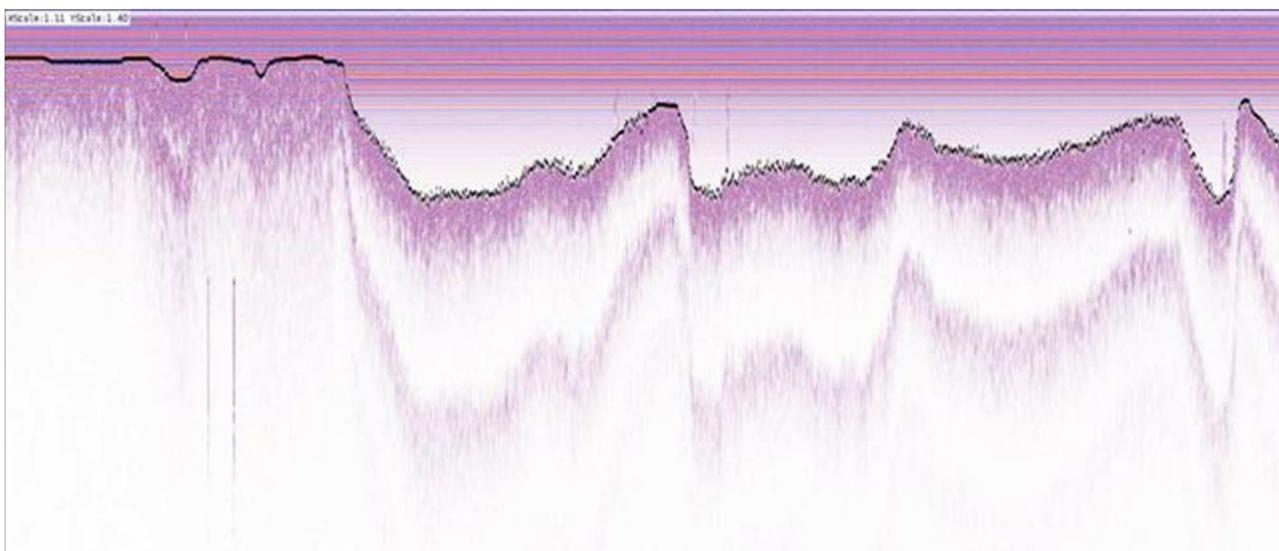


Figura 11. Profilo ecografico acquisito nell'area Foce del Bevano

Il profilo ecografico visibile in Figura 11 è relativo alla zona di *Foce del Bevano*, e mostra una qualità dei sufficientemente buona da permettere l'individuazione del fondale con grande precisione, nonostante, ad esempio nella parte iniziale del profilo, l'eco del fondale si confonda con l'ondina di emissione e i rimbalzi sulla chiglia del veicolo e sulla interfaccia acqua-aria.

Si sono ottenute mappe batimetriche (Figura 12 e Figura 13) dai dati puntuali elaborati secondo la seguente procedura:

- 1) controllo qualità dei dati acquisiti in formato SEG-Y;
- 2) digitalizzazione del fondo automatica seguita da controllo manuale, al fine di ottenere la corretta individuazione del fondo ed estrarre i punti profondità;
- 3) georeferenziazione dei punti estratti al punto 2);
- 4) conversione dei TWT in profondità (m);
- 5) applicazione delle correzioni di marea con dati ottenuti dal portale di ISPRA;

I dati puntuali di profondità, in forma di file ASCII lat,lon,depth, separati da spazio, sono stati filtrati e "grigliati" utilizzando l'algoritmo "*nearneighbor*" implementato nel pacchetto di GMT 6.0 (Wessel et al. 2019).

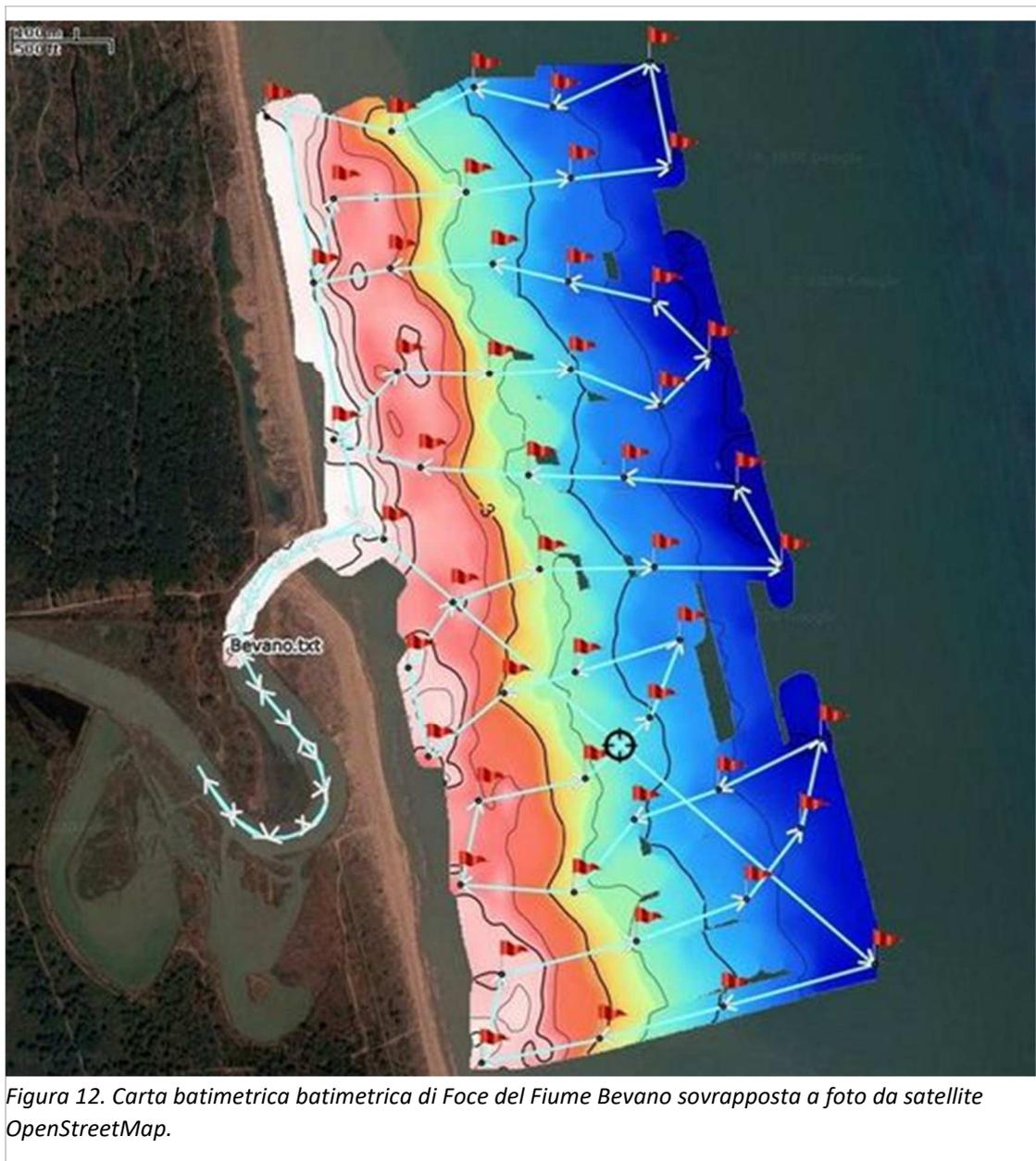


Figura 12. Carta batimetrica batimetrica di Foce del Fiume Bevano sovrapposta a foto da satellite OpenStreetMap.

I dati estratti presentavano coordinate doppie e triple per punti successivi, dovute tasso di aggiornamento GPS inferiore rispetto a quello di emissione degli impulsi ecografici. Si è quindi provveduto a compilare una routine in *python* per l'interpolazione delle coordinate doppie assumendo una velocità costante tra i punti vicini con coordinate diverse.

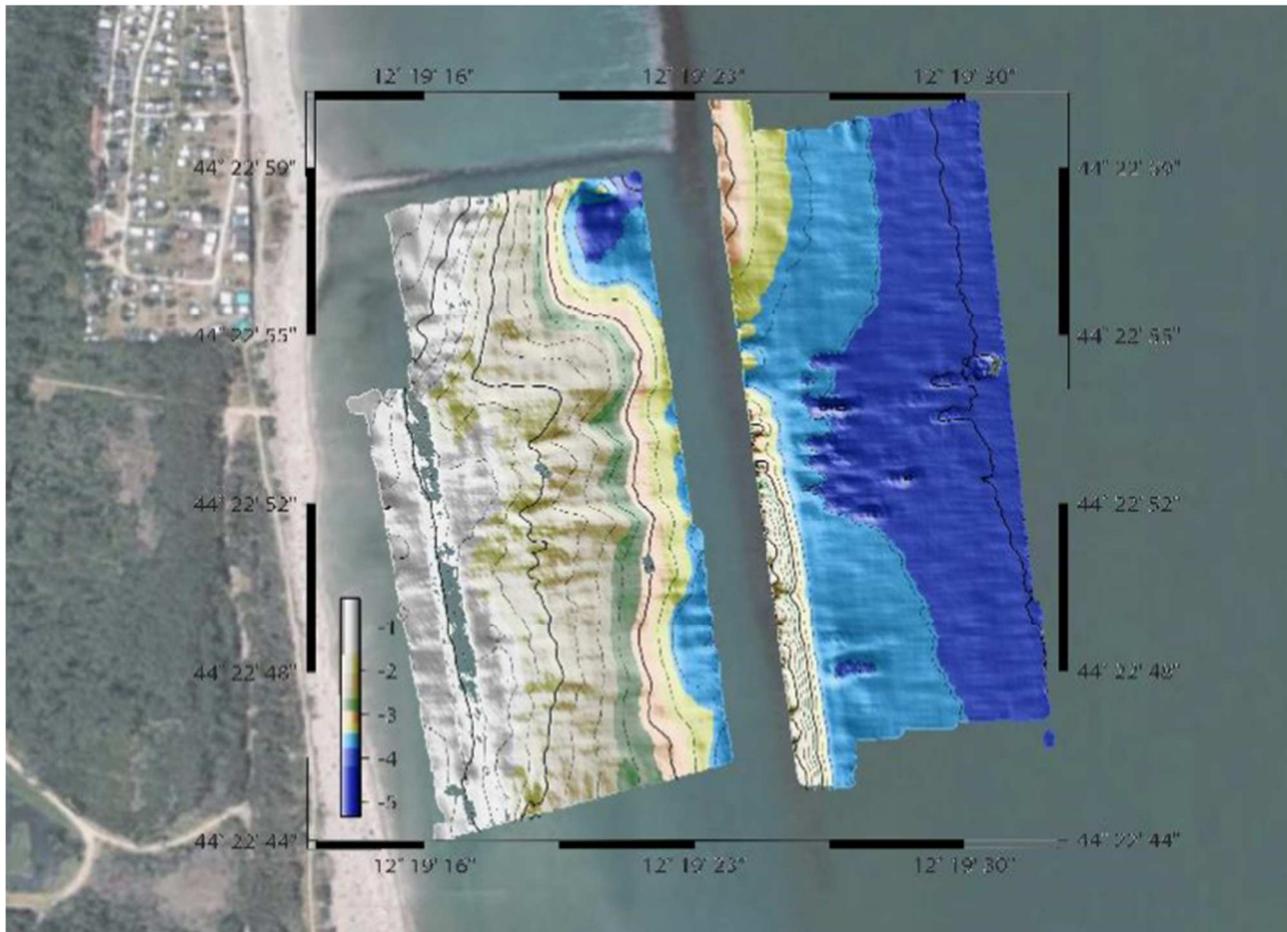


Figura 13. Carta Morfobatimetrica a rilievo ombreggiato compilata con i dati ecografici acquisiti nell'area Foce del Bevano. Base: foto satellitare da OpenStreetMap (www.openstreetmap.org). Linee di livello ogni 25 cm.

5.4 Dati Side-Scan Sonar

I dati di Side Scan Sonar sono stati acquisiti con lo StarFish 990F della Trittech⁴. La frequenza di lavoro di questo side è di 990 KHz si tratta quindi di uno strumento con un'alta risoluzione. In presenza di alte frequenze acustiche risulta difficile generare impulsi ad alta energia per cui come effetto collaterale dell'aumento delle componenti in frequenza dell'impulso acustico emesso si ha una diminuzione dell'energia emessa, questo comporta di conseguenza più difficoltà ad acquisire un segnale privo di rumore incoerente rientrante dall'ambiente circostante. L'apertura del fascio è stata quindi limitata a 10 metri per lato, così da acquisire solo il dato di buona qualità e limitare il rumore sulle parti laterali del fascio. Questo ovviamente costringe ad allungare il tempo di acquisizione se si vuole ottenere una copertura totale del fondo.

Il software di acquisizione utilizzato è quello sviluppato dalla Trittech specificatamente per questa tipologia di strumenti ed il formato di output è il loro formato proprietario; in Figura 14 è riportata una "schermata" del software Trittech durante l'acquisizione.

Il software riceve il segnale del trasduttore side-scan, le informazioni di posizionamento dal GPS ed il dato di profondità derivante dall'ecoscandaglio. Purtroppo tale software non prevede la possibilità di registrare anche le informazioni rotazionali istantanee del sensore (nel caso di una imbarcazione *yaw*, *pitch* e *roll*), informazioni preziosissime per la correzione dell'errore di movimento del sensore dovuto al moto ondoso.

⁴link al sito: <https://www.tritech.co.uk/product/starfish-990f-high-resolution-side-scan-sonar-shallow-water0>

Nelle mappe prodotte si è quindi dimostrato impossibile correggere completamente l'effetto del moto ondoso.

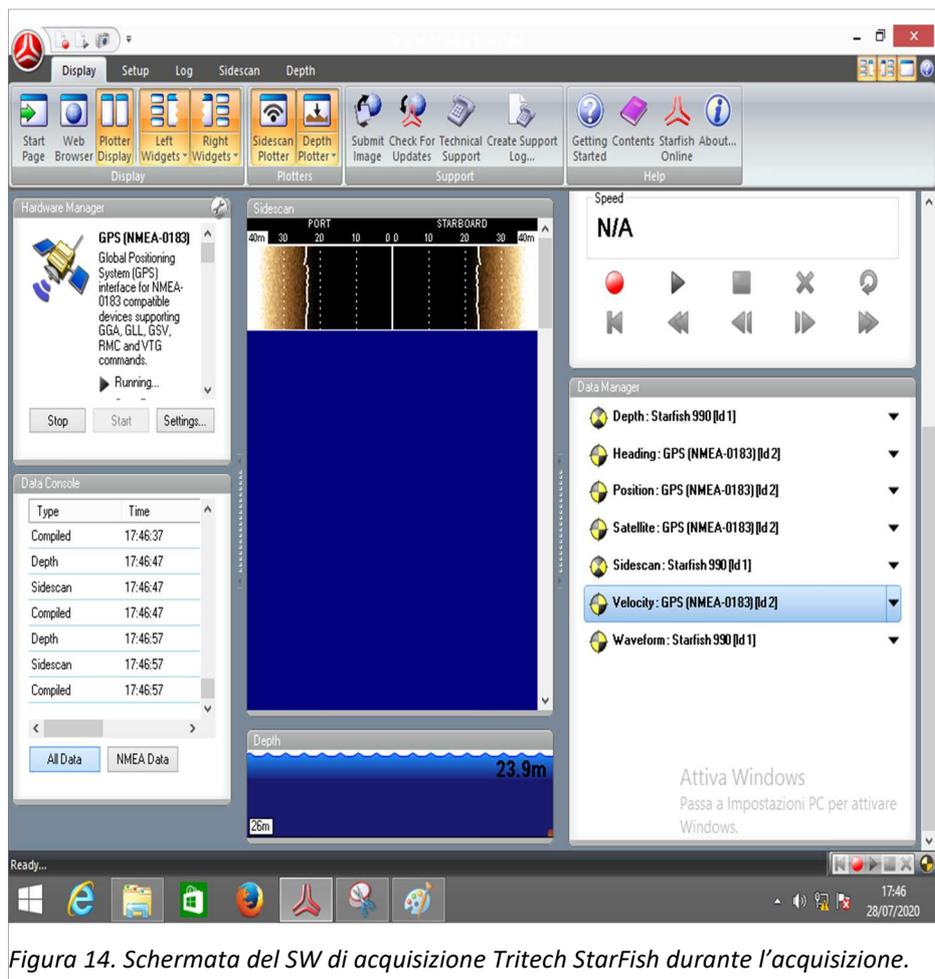


Figura 14. Schermata del SW di acquisizione Tritech StarFish durante l'acquisizione.

Il software Tritech permette di esportare i dati in formati standard quali CSV e XTF, così da poter essere importati da altri pacchetti di elaborazione. Per questo progetto, sono stati testati tre diversi software di elaborazione, così per verificarne le performance in funzione dell'interpretazione finale e del *time-consuming* delle procedure di analisi e restituzione dei dati.

Il primo è Caris Hips&Sips⁵, un software commerciale per il quale ISMAR-CNR ha una licenza, che si è però rivelato inadatto a trattare il dato side-scan sonar in quanto le correzioni che è possibile apportare sono molto limitate e il risultato finale non è di facile lettura ed interpretazione. Un altro software testato è stato SwanMosaic, della Communication Technology di Cesena (<https://www.comm-tec.com/>). Questo software, permette di caricare agilmente le strisciate side-scan sonar ma ha alcune limitazioni importanti, ovvero non dà la possibilità di correggere per "slant range" e oscillazioni statiche dovute a rollio e beccheggio (Figura 15)

⁵link al sito: <http://www.teledynecaris.com/en/products/hips-and-sips/>

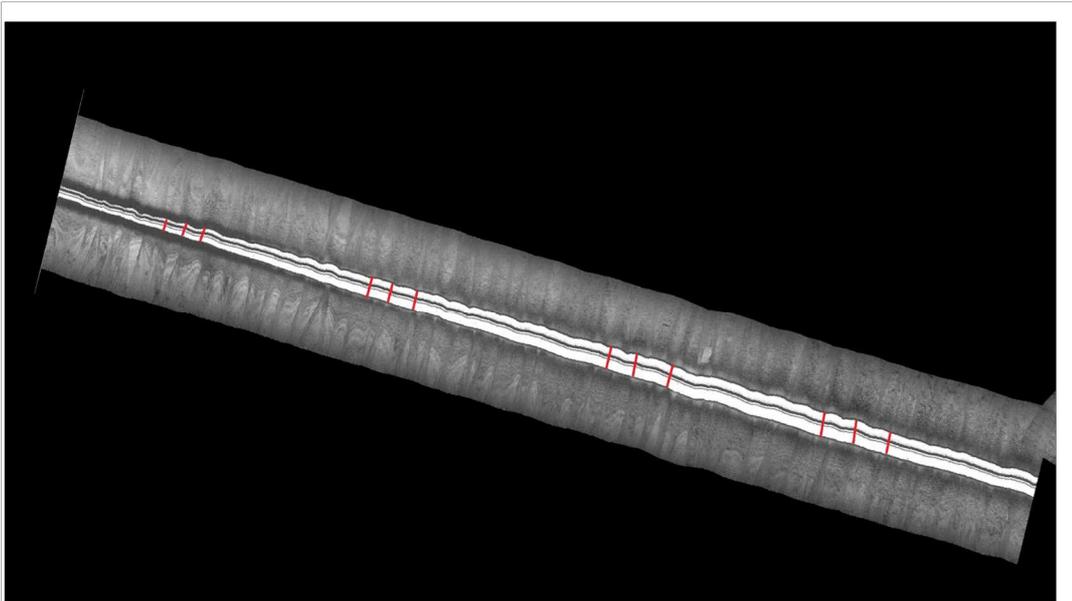


Figura 15. Esempio di acquisizione senza correzione di "slant range" applicata. Le linee rosse evidenziano il problema della cattiva compensazione del movimento di rollio.

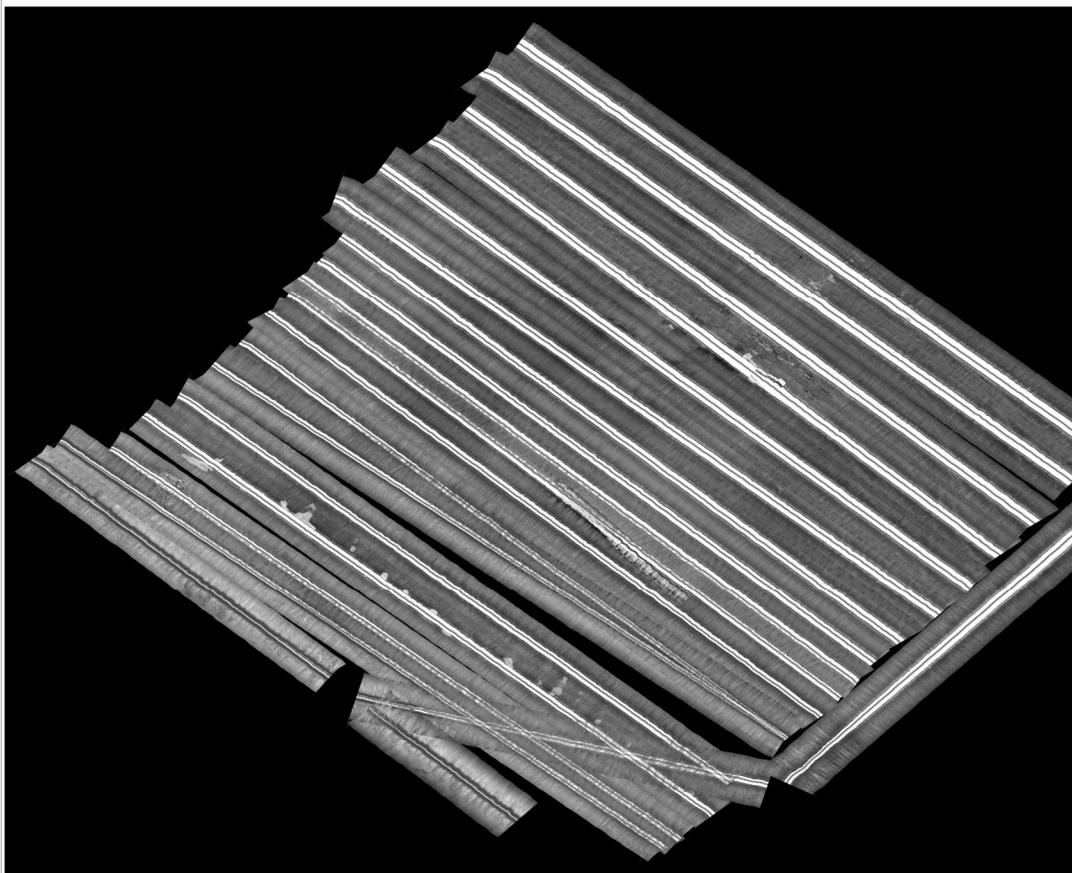


Figura 16. Mosaico delle "strisciate" side-scan sonar nell'area di Riccione.

Nonostante i problemi riscontrati, le immagini *side-scan* rimangono molto utili ai fini di riconoscere le forme di fondo diagnostiche dei processi sedimentari in atto (superfici di erosione, *dune*, *ripple-marks*, ecc..) come si nota dai “mosaici” di Figura 16 e 17.

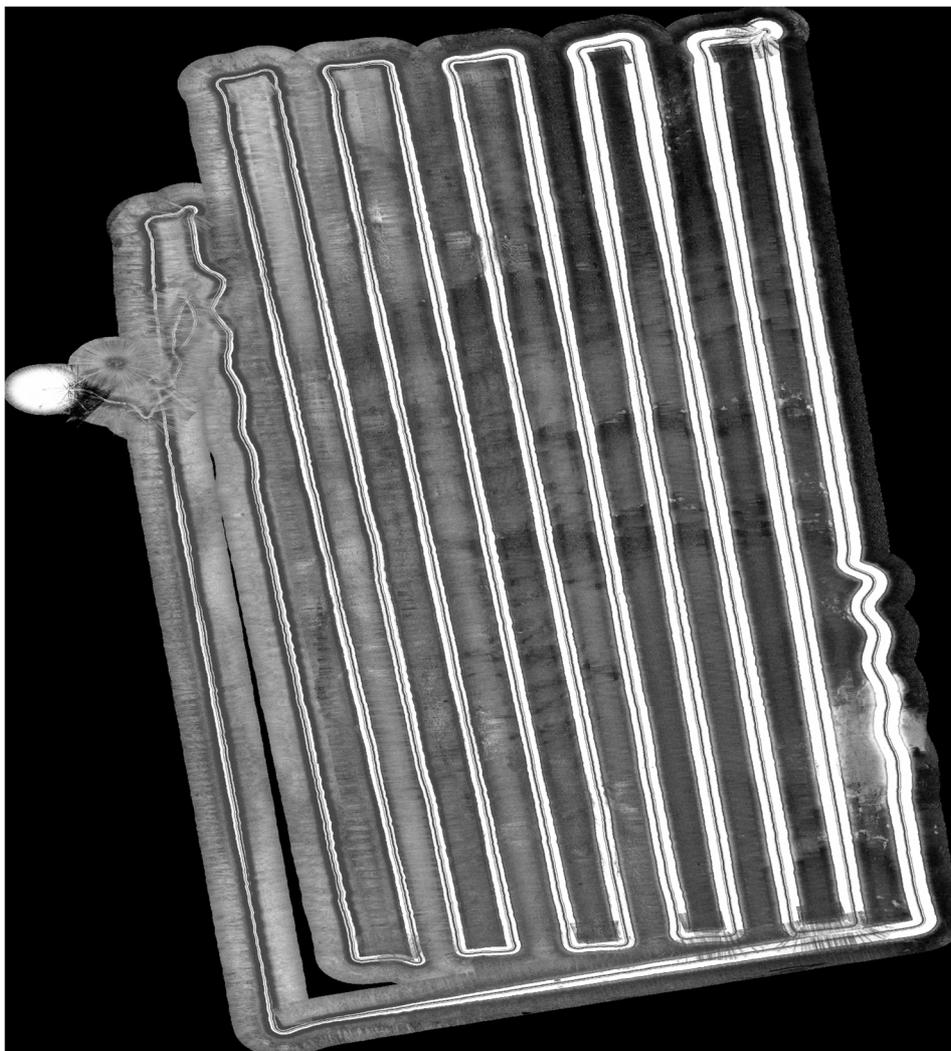


Figura 17. Mosaico delle “strisciate” *side-scan sonar* nell’area di Lido di Dante.

Il terzo software del quale abbiamo verificato l’efficacia è Seaview⁶, della MogaSoftware. Questo è un software commerciale per il quale è stata richiesta una licenza di valutazione della durata di circa due mesi. Il software ha una grande varietà di filtri che consentono di correggere e migliorare il segnale del *side-scan*; riesce inoltre a compensare i movimenti dello strumento stesso, anche se in modo non perfetto a causa dell’assenza di informazioni di *yaw*, *pitch* e *roll* (come precedentemente fatto notare). Inoltre, grazie a Seaview, si è riusciti a correggere i dati (Figura 18) e creare il mosaico con le strisciate acquisite presso il sito Foce del Bevano, le cui linee di navigazione risultavano mancanti del dato di navigazione. Questo problema è stato probabilmente causato da una mancata comunicazione tra il software di acquisizione ed il software di controllo del mezzo.

⁶link al sito: <https://www.mogasw.com/seaview/mosaic/>

Per risolvere l'inconveniente, è stato utilizzato il file di navigazione registrato dal natante autonomo OpenSWAP e convertito in un file di formato .CSV, contenente i valori di data, tempo, profondità, latitudine e longitudine. Il software di elaborazione del dato side-scan, Seaview, ha consentito di accoppiare il CSV della navigazione alle linee side che ne erano sprovviste, usando come dato comune l'orario, come visibile in Figura 18.

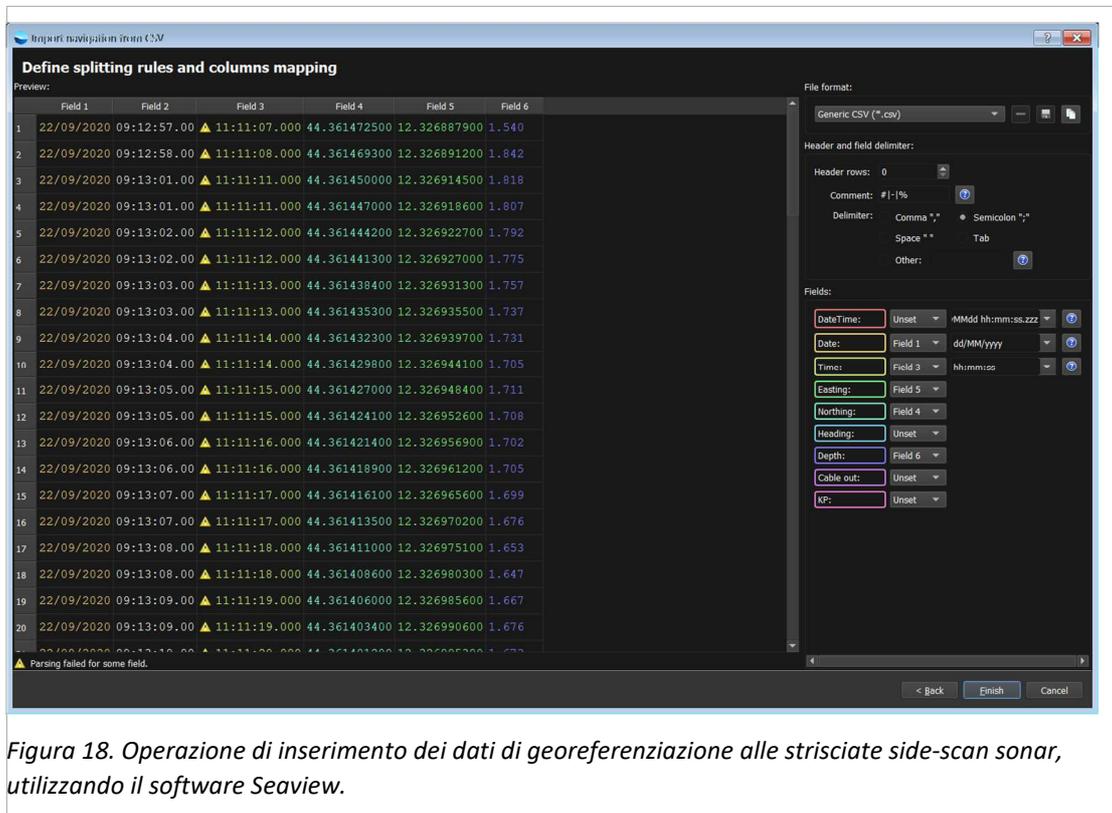


Figura 18. Operazione di inserimento dei dati di georeferenziazione alle strisciate side-scan sonar, utilizzando il software Seaview.

In questo modo, è stato possibile recuperare tutto il dato acquisito e costruire il mosaico con il corretto posizionamento (Figura 19). Come si vede in questo caso la completa copertura non è garantita a causa delle linee di navigazione molto distanti tra loro.

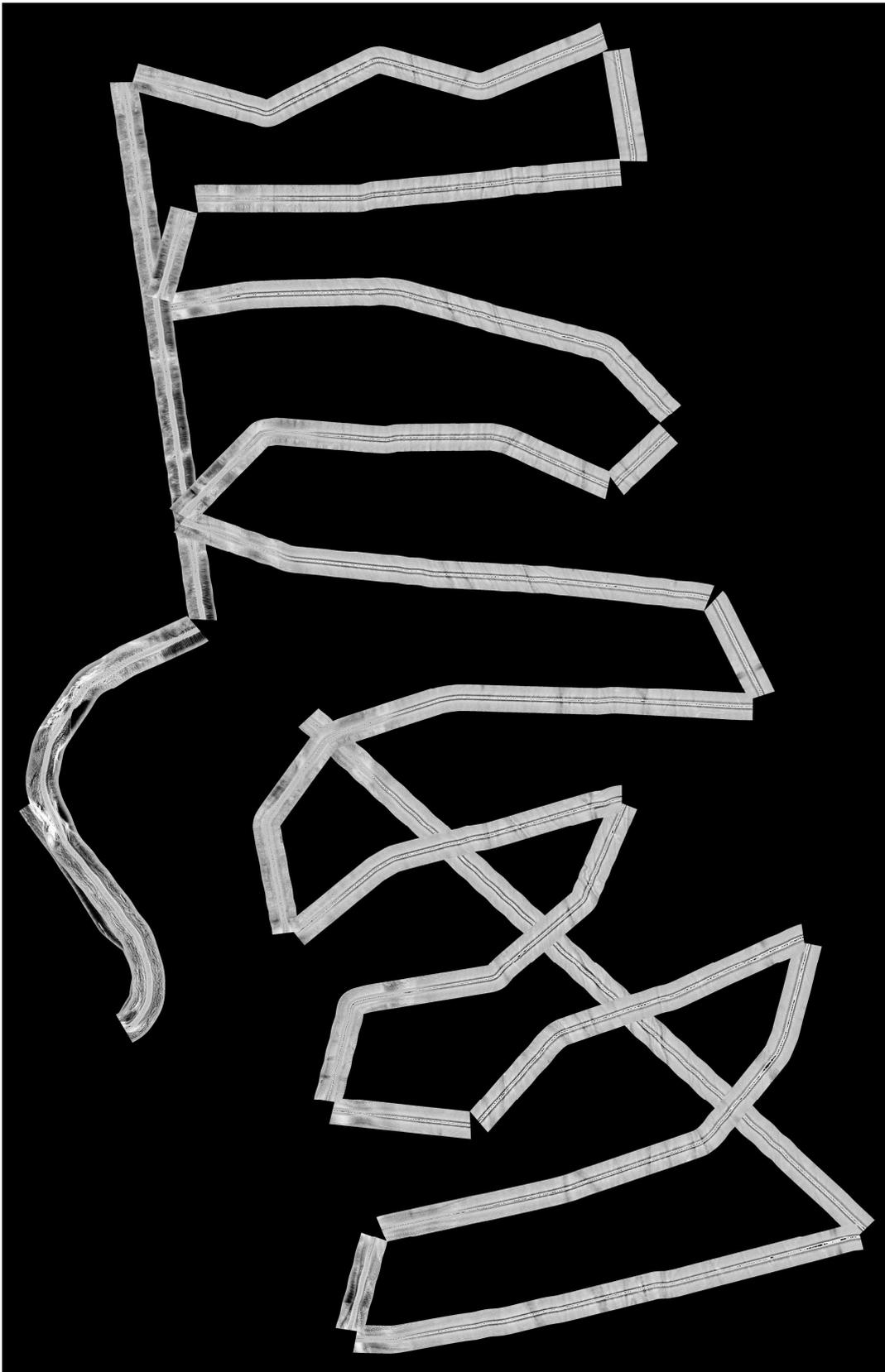


Figura 29. Mosaico delle "strisciate" side-scan sonar ottenute utilizzando il software Seaview della Foce del Bevano.

6. RISULTATI E CONCLUSIONI

Il lavoro oggetto di questo Rapporto Tecnico è consistito nel verificare la validità di algoritmi di elaborazione di dati morfostratigrafici marini ed elaborare soluzioni innovative che potessero fornire elementi importanti alla realizzazione degli obiettivi del progetto TAO. Abbiamo lavorato su dati acquisiti in tre siti lungo il litorale Emiliano-Romagnolo, *Foce del Fiume Bevano* (RA), *Lido di Dante* (RA), e *Riccione* (RN).

Oltre ai dati più convenzionali di batimetria e riflettività del fondale, abbiamo ottenuto “immagini acustiche” di grande dettaglio del sottofondo marino, fino a profondità di qualche metro al di sotto della superficie acqua-sedimento, dati che permettono una rappresentazione pseudo-3D dei depositi sedimentari, con la possibilità di valutare geometrie deposizionali e facies sismiche. La possibilità di ripetere rotte preordinate con precisione molto elevata, una caratteristica alla quale TAO sta lavorando con successo, aprirà le porte all’esecuzione di rilievi ripetuti (rilievi 4D), che permetteranno di pianificare operazioni di monitoraggio della fascia costiera.

Abbiamo potuto constatare che l’utilizzo della strumentazione geofisica, ecografo, chirp-sonar e side-scan sonar, a bordo del veicolo autonomo di superficie, ha ridotto significativamente il tempo di acquisizione e, grazie all’accuratezza del DGPS, ha garantito un buon controllo e recupero (dove necessario) del dato di posizionamento. Ciò risulta fondamentale perché la rapidità ed il basso costo sono fattori importanti per lo svolgimento di questo tipo di indagini: infatti l’approccio qui utilizzato ha permesso di svolgere una serie di rilievi periodicamente ed in modo efficace e tale metodologia permetterebbe di descrivere le evoluzioni dell’interfaccia acqua-sedimento nel tempo. Le mappe batimetriche e di riflettività, prodotti finali di questo lavoro, se combinate tra loro permettono di osservare lo stato morfologico del fondale e di intuire eterogeneità laterali nei depositi sabbiosi presenti.

Proprio per tutti questi fattori, l’approccio utilizzato nell’ambito del Progetto TAO semplifica notevolmente l’operazione di raccolta dati e l’interpretazione dei risultati: potrebbe quindi costituire una metodologia efficace per descrivere la distribuzione degli accumuli sabbiosi. Tuttavia, i dati già raccolti e soprattutto le prime osservazioni basate sulle mappe di riflettività, sarebbero da integrare con un ulteriore dato costituito dai campionamenti diretti di benthos e sedimento, che aggiungerebbero informazioni stratigrafiche fondamentali ai fini dell’interpretazione geologica e ambientale del fondale.

In conclusione, interpretare gli effetti dei processi sedimentari che potrebbero essersi verificati risulta fondamentale al fine di individuare, monitorare e quindi preservare al meglio i depositi sabbiosi, risorse preziose soprattutto per le porzioni di litorale indagato in quanto soggetto ad erosione, e riteniamo che i dati ottenuti costituiscano un elemento importante al conseguimento di questo obiettivo.

Tutti i dati elaborati e le procedure di elaborazione sono disponibili in forma digitale per gli scopi del Progetto TAO.

7. Bibliografia e Sitografia

Gasperini, L., Alfredo Marzocchi, Stefano Mazza, Roberto Miele, Matteo Meli, Hassan Najjar, Alessandro M Michetti, Alina Polonia (2020a). Morphotectonics and late Quaternary seismic stratigraphy of Lake Garda (Northern Italy). *Geomorphology*, 371, 107427.

Gasperini, L., Extremely shallow-water morphobathymetric surveys: the Valle Fattibello (Comacchio, Italy) test case. *Marine Geophysical Researches* (2005) 26:97–107 DOI 10.1007/s11001-005-3710-0.

Gasperini, L. & Stanghellini G., (2009). SEISPRHO: An interactive computer program for processing and interpretation of high-resolution seismic reflection profiles, *COMPUTERS & GEOSCIENCES*, 35, 1497-1507.

Gasperini, L., Ligi, M., Stanghellini, G. (2021). Pseudo-3D techniques for analysis and interpretation of high-resolution marine seismic reflection data *Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata*, in press.

Gaviletea, M.D. (2017). Environmental Impacts of Sand Exploitation. Analysis of Sand Market. *Sustainability, Sustainability*, 9 (2017), p. 1118

Padmal, D., Maya, K. (2014). *Sand Mining, Environmental Impacts and Selected Case Studies*. Springer Dordrecht Heidelberg New York London.

Stanghellini, G., Del Bianco, F., Gasperini, L. (2020a). OpenSWAP, an Open Architecture, Low Cost Class of Autonomous Surface Vehicles for Geophysical Surveys in the Shallow Water Environment. *Remote Sensing*, 12(16), 2575.

van Rijn L.C., 2011. Coastal erosion and control. *Ocean & Coastal Management*, 54, Issue 12,867-887

Wessel, P., Luis, J. F., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H. F., & Tian, D. (2019). The Generic Mapping Tools version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20, 5556–5564. <https://doi.org/10.1029/2019GC008515>.

Siti WEB:

Caris Hips&Sips: <http://www.teledynecaris.com/en/products/hips-and-sips/>

GMT: <https://www.generic-mapping-tools.org/download/>

Matlab: <https://it.mathworks.com/downloads/>

OpenStreetMap (www.openstreetmap.org)

Seaview: <https://www.mogasw.com/seaview/mosaic/>

SeisPrho: <http://software.bo.ismar.cnr.it/seisprho>

Starfish: <https://www.tritech.co.uk/product/starfish-990f-high-resolution-side-scan-sonar-shallow-water0>

