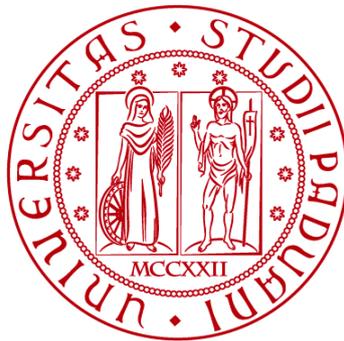


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio



TESI DI LAUREA

**LA MAPPATURA AD ALTA RISOLUZIONE
DEI CANALI DI VENEZIA NELL'AMBITO DEL PROGETTO
DI RICERCA "RITMARE"**

Relatore: Chiar.mo PROF. DANIELE PIETRO VIERO

Laureanda: LINDA BORGATO

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

INDICE

1	INTRODUZIONE.....	1
1.1	LA LAGUNA DI VENEZIA	1
2	STRUMENTI PER LA MAPPATURA DEL FONDALE	3
2.1	LA FISICA DEL SUONO NELL'ACQUA.....	3
2.2	ECOSCANDAGLIO MULTI-FASCIO	5
2.3	SISTEMA DI POSIZIONAMENTO	8
2.4	VISUALIZZAZIONE E POST-PROCESSING DEI DATI BATIMETRICI.....	10
2.5	ALTRI STRUMENTI	10
3	LA MAPPATURA DEL FONDALE DELLA LAGUNA DI VENEZIA	13
4	AMBITI DI STUDIO DERIVANTI DALLA MAPPATURA	21
4.1	VALUTAZIONE DEI METODI DI MAPPATURA DEI FONDALI MARINI PER LA CLASSIFICAZIONE DI HABITAT BENTONICI SUPERFICIALI.....	21
4.1.1	<i>Segmentazione manuale.....</i>	23
4.1.2	<i>L'ottimizzazione del raggruppamento di Jenks</i>	24
4.1.3	<i>Classificatore per massima verosimiglianza MLC.....</i>	24
4.1.4	<i>Analisi delle immagini basate su oggetti con eCognition</i>	25
4.1.5	<i>Analisi della texture con TexAn.....</i>	26
4.2	L'IMPRONTA UMANA SUL SISTEMA COSTIERO DELLA LAGUNA DI VENEZIA	29
4.3	GEOMORFOLOGIA DEGLI HABITAT BENTONICI NEL PORTO DI CHIOGGIA	34
4.4	RITROVAMENTO DI UN' ANTICA STRADA ROMANA	40
5	CONCLUSIONI.....	43
6	BIBLIOGRAFIA	45

1 Introduzione

Tra il 2012 e il 2016 il Ministero per l'Università e la Ricerca (MIUR) ha finanziato il progetto italiano quinquennale RITMARE, coordinato dal Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), con l'obiettivo di fornire all'Italia le capacità per far fronte alle sfide della globalizzazione e alla competitività, agli impatti del cambiamento climatico, al degrado dell'ambiente marino, alla sicurezza marittima e alla sostenibilità dell'approvvigionamento energetico.

Tra i numerosi ambiti in cui il progetto Ritmare ha trovato applicazione, la mappatura dei canali di Venezia è stata scelta come oggetto di questa tesi. Tra maggio e dicembre del 2013, un gruppo di oltre 25 scienziati del CNR-ISMAR di Venezia ha raccolto i dati di oltre 2500 km di canali per mezzo di un ecoscandaglio multi-fascio ad alta risoluzione, in inglese Multibeam Echosounder (da cui l'acronimo MBES).

Il MBES era montato sulla prua del motoscafo Litus, che ha trasportato nottetempo la squadra di scienziati, fotoreporter e marinai nella spedizione.

Lo scopo del lavoro di mappatura era l'osservazione della morfologia dei fondali, il ritrovamento di eventuali reperti e lo studio delle condizioni di vita della fauna e flora dell'ambiente marino. La mappa di Venezia avrebbe raccontato quindi le "memorie del sommerso". Considerando i report realizzati dagli scienziati del CNR che hanno preso parte alla ricerca, tra cui Fantina Madricardo, Federica Foglini, Aleksandra Kruss e Fabio Trincardi, nel presente studio bibliografico è stato riassunto il processo di mappatura e gli ambiti di studio che ne sono derivati per l'identificazione e la comprensione delle "memorie del sommerso".

1.1 La laguna di Venezia

La laguna veneta è nata attorno al 4000 a.C. in una zona dove migliaia di anni prima una grande prateria si estendeva fino all'attuale città di Ancona. Lo scioglimento dei ghiacciai ha provocato un riversamento d'acqua dalle Alpi verso la pianura, lento ma senza interruzioni, che raggiungeva il mare trascinando con sé ingenti quantità di detriti. Questo processo ha provocato la risalita del mare lungo la penisola, finché la costa ha finalmente raggiunto la sua posizione

attuale. La laguna come la conosciamo oggi però è il risultato del modellamento dell'ambiente da parte dei fiumi, del mare e del vento. I fiumi alpini, ovvero il Brenta e il Piave continuavano a trasportare verso il mare ghiaie, rocce e sabbie provenienti dalle Dolomiti. I detriti più pesanti si fermavano sulla pianura, mentre le sabbie, più leggere, raggiungevano il mare. La sabbia si depositava sui bassi fondali in seguito all'incontro tra la corrente del fiume e le onde. Il fenomeno proseguì per secoli formando un argine naturale che il vento asciugava, trasformandolo in un'isola lineare. Il tratto di mare compreso tra la foce e la nuova isola era protetto dalla forza delle onde, costituiva quindi uno stagno di acqua marina mescolata a quella dolce immessa dal fiume. Le due lagune neonate, formatesi in corrispondenza delle foci del Brenta e del Piave, si allargarono e si allinearono diventando una grande laguna unica. A stabilizzare infine i suoli emersi fu la vegetazione, che impedì alle sabbie di disperdersi al vento e alle barene di essere erose dalle maree.

Nel Quinto secolo d.C. la laguna veneziana costituì un rifugio temporaneo per gli abitanti delle città vicine per sfuggire alle orde barbariche che attaccarono l'Impero Romano d'Occidente. I rifugiati decisero di stabilirsi definitivamente sulle isole della laguna, prosciugarono i terreni e gettarono le fondamenta per gli edifici. La Laguna di Venezia non ha mai smesso di subire mutamenti naturali e antropogenici e tutt'ora è difficile ma necessario tenere traccia delle conseguenze a tali cambiamenti per garantire alla vita dell'essere umano sicurezza e possibilità di sviluppo, ma allo stesso tempo preservare gli habitat naturali.

2 Strumenti per la mappatura del fondale

2.1 La fisica del suono nell'acqua

I dispositivi che fanno viaggiare il suono nell'acqua si chiamano sonar [1]; è il caso per esempio del multi-beam echo-sounder MBES (ecoscandaglio multi-fascio) che ha reso possibile lo studio dei canali di marea della Laguna di Venezia per il progetto "Ritmare". Per la comprensione del funzionamento dei sonar è necessario capire come il suono si propaga nell'acqua. Il suono viaggia nell'acqua attraverso una serie di fronti di pressione, chiamati onde di compressione. Esse si muovono a una velocità locale, legata alla salinità, alla pressione e alla temperatura dell'acqua, ma indipendente dalle caratteristiche del suono stesso. La distanza fisica tra i fronti di pressione in un'onda sonora in movimento è la lunghezza d'onda, λ . Il numero di fronti di pressione che attraversano un punto stazionario dell'acqua per l'unità di tempo è la frequenza dell'onda, f . Queste grandezze sono in relazione tra loro attraverso la velocità del suono v che si misura in m/s (Equazione (1)):

$$v = f \cdot \lambda \quad (1)$$

Quando il suono incontra un cambiamento della velocità locale del suono, la sua lunghezza d'onda cambia ma la frequenza rimane costante. È per questo che le onde sonore sono descritte in termini di frequenza. L'energia acustica trasportata dall'onda sonora può essere misurata da un dispositivo chiamato idrofono. Esso misura le oscillazioni della pressione man mano che l'onda scorre. La dimensione delle oscillazioni si chiama ampiezza dell'onda, ed è legata all'energia acustica trasmessa nell'onda: più un'onda è ampia più energia trasporta. L'intervallo di tempo compreso tra due picchi di pressione si chiama periodo ed equivale all'inverso della frequenza (Figura 1).

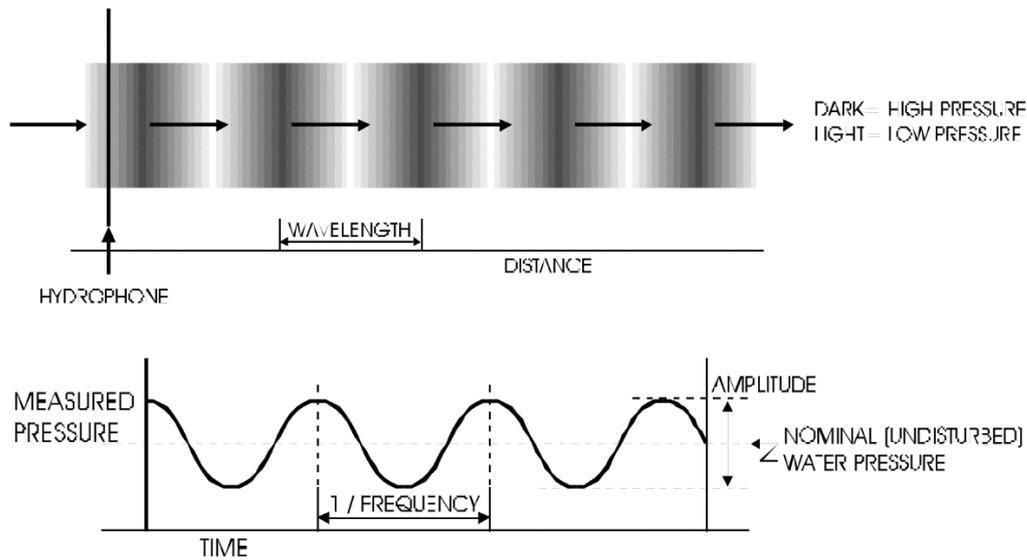


Figura 1: Componenti di un'onda acustica.

Mentre il suono si propaga, perde parte della sua energia acustica. Questo fenomeno si chiama attenuazione ed è dovuto al fatto che il trasferimento delle differenze di pressione tra le molecole non è efficiente al 100%. Quando l'onda si attenua, la sua ampiezza si riduce. Il livello di attenuazione di un'onda sonora dipende dalla sua frequenza: il suono a frequenza molto alta si attenua rapidamente, mentre il suono a frequenza estremamente bassa può viaggiare indisturbato per distanze maggiori.

L'andamento delle onde acustiche si interrompe bruscamente quando queste incontrano un mezzo diverso dall'acqua, come sabbia o roccia. Quando ciò avviene, una parte dell'energia si trasferisce nel nuovo materiale, un'altra viene riflessa dalla superficie del mezzo, il resto dell'energia si disperde nell'acqua. L'energia assorbita dal materiale e quella rimbalzata e tornata in acqua dipendono dall'angolo di incidenza dell'impulso sull'oggetto (Figura 2). La quantità di energia riflessa dalla superficie dell'oggetto colpito e riproiettata in acqua si chiama eco, e mantiene la frequenza dell'onda originaria.

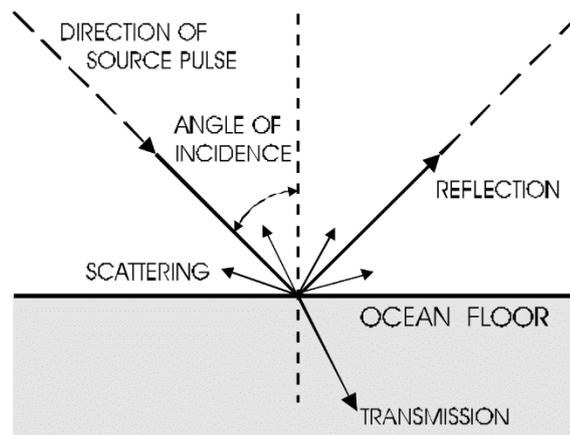


Figura 2: Componenti di un'onda acustica che rimbalza sul fondale marino

2.2 Ecoscandaglio multi-fascio

Il modello di ecoscandaglio multi-fascio ad alta risoluzione utilizzato per la mappatura è l'EM 2040 MKII, adatto ad acque poco profonde e a banda larga, fabbricato dall'azienda Kongsberg Maritime [2].

Il funzionamento dell'ecoscandaglio EM 2040 consiste nell'emettere onde acustiche a ventaglio multiple e simultanee in corrispondenza del suo ricetrasmittitore, in modo da coprire contemporaneamente lo spazio sottostante alla barca e ai lati. Le onde sonore colpiscono il fondale e rimbalzando sui sedimenti (o sul fondale stesso) tornano al ricevitore. Noti la velocità del suono nell'acqua, v , l'angolo assunto dalle onde acustiche di ritorno, il tempo impiegato dal suono per raggiungere il fondale e tornare indietro, t , l'unità di elaborazione dell'ecoscandaglio ricava la profondità del fondale z (Equazione (2)), detta batimetria:

$$z = \frac{1}{2} \cdot v \cdot t \quad (2)$$

L'impulso sonoro lanciato dal trasduttore di trasmissione si chiama ping [3]. Il numero di ping inviati in un secondo, insieme alla velocità della barca, determinano la risoluzione orizzontale delle immagini create. Se la barca si muove molto velocemente e il numero di ping al secondo è basso, i raggi che rimbalzano sul fondale nell'area coperta sono meno di quelli ottenuti da una barca che avanza lentamente e invia molti ping al secondo. In più, se il fondale è molto profondo, è necessario che la barca rallenti, oppure che vengano trasmessi più ping per produrre un'immagine di qualità, in quanto il segnale impiega più tempo a raggiungere il punto di rimbalzo e tornare al trasduttore.

L'ecoscandaglio multi-fascio si caratterizza per la sua capacità di mappare più punti del fondale con un solo ping. I punti intercettati da un ping sono allineati in una fascia perpendicolare alla direzione del moto della barca e costituiscono l'area di swath (Figura 3).

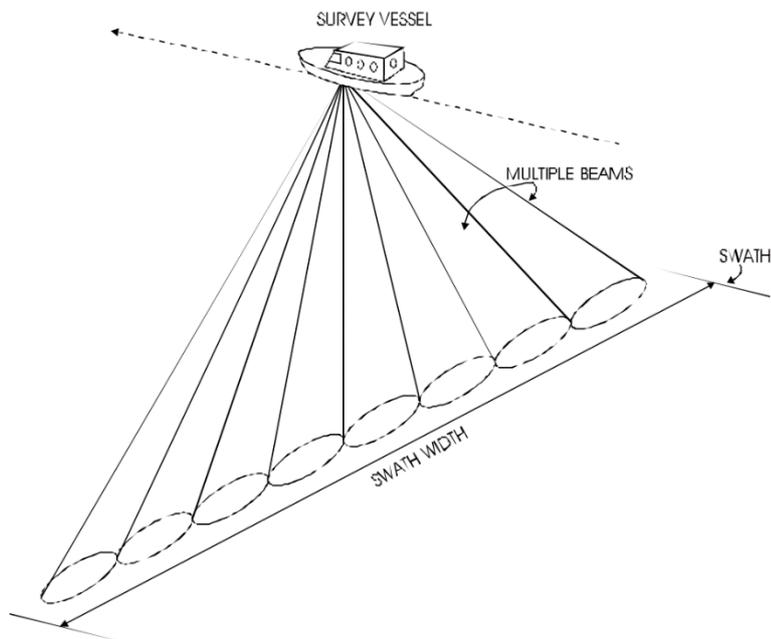


Figura 3: Rappresentazione della swath di un ecoscandaglio multifascio

Grazie all'elevato grado di precisione dell'MBES è possibile creare mappe batimetriche tridimensionali del fondale marino (Figura 4).

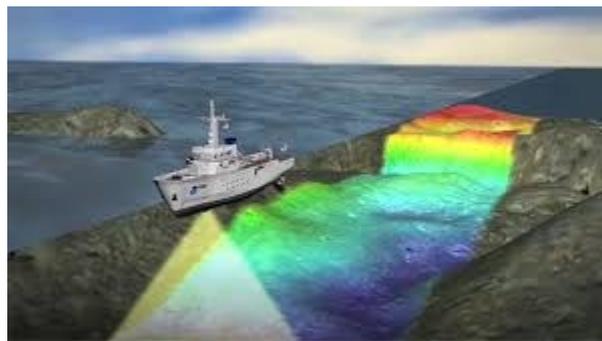


Figura 4: Rappresentazione del funzionamento dell'MBES, al passaggio della barca viene evidenziato l'andamento batimetrico del fondale, risultato dell'elaborazione dei dati acquisiti tramite l'MBES

Il segnale riflesso dal fondale e rilevato dal trasduttore ricevente viene quantificato attraverso la retrodiffusione. L'intensità di retrodiffusione dipende dall'oggetto colpito sul fondale: il rimbalzo del suono su materiali rigidi e/o piatti è più forte che su materiali morbidi e/o irregolari.

Il mosaico di retrodiffusione permette di visualizzare la consistenza dei fondali dell'area indagata, e assieme alla mappa batimetrica costituiscono la base per lo studio degli habitat presenti.

Il sistema di base dell'EM 2040 MKII ha quattro unità:

- Il trasduttore di trasmissione: trasforma l'energia elettrica in sonora e indirizza l'impulso verso il fondale
- Il trasduttore di ricezione (idrofono): il segnale acustico colpisce il fondale (o un sedimento) e rimbalza, tornando indietro verso un amplificatore, e poi al ricevitore, che lo trasmette a sua volta all'unità di elaborazione.
- Un'unità di elaborazione: nota la velocità del suono nell'intera colonna d'acqua, vengono determinate la profondità e la posizione del segnale di ritorno tramite l'angolo di ricezione e il tempo di viaggio.
- Una stazione idrografica: per la visualizzazione delle mappe batimetriche ricavate

Una delle peculiarità di questo strumento è la possibilità per l'operatore di scegliere la frequenza più adatta al fondale che sta ispezionando, in un intervallo che va da 200 kHz a 700 kHz per acque poco profonde. La scelta della frequenza rappresenta un punto chiave della rilevazione perché ne determina l'accuratezza. La frequenza deve essere scelta in base alla distanza che le onde sonore devono compiere per raggiungere il fondale. Con una bassa frequenza, le onde sonore possono compiere distanze maggiori e poiché viaggiano in linea retta penetrano il mezzo senza attenuarsi. Con un'alta frequenza, le onde sonore arrivano alla superficie degli oggetti con un angolo maggiore, quindi aumenta la probabilità che vi rimbalzino, determinando una risoluzione migliore delle immagini. Per ottenere una risoluzione dettagliata è quindi necessario usare alte frequenze, che però sono adatte soltanto a fondali poco profondi, in quanto percorrendo lunghe distanze rischierebbero di attenuarsi senza restituire alcun eco per creare l'immagine. Per la mappatura della Laguna di Venezia la frequenza operativa è stata impostata a 360 kHz.

L'EM 2040 possiede una swath duale per ogni ping. Raddoppiando quindi la densità sonora è possibile rilevare i dati mantenendo una velocità doppia di navigazione. L'ecoscandaglio utilizzato ha 800 raggi, 400 per ogni swath.

Questo strumento è inoltre modulare, caratteristica che permette all'utente di adattare le larghezze di raggio ai requisiti operativi.

La ventola di trasmissione è divisa in tre settori che eseguono il ping contemporaneamente ma a frequenze separate. Ciò garantisce un forte smorzamento di interferenza multi-rimbalzo.

Lo strumento è caratterizzato anche da degli stabilizzatori di movimento (Figura 5):

- Stabilizzatore dei raggi al rollio (*roll*): $\pm 15^\circ$
- Stabilizzatore dei raggi a movimento di beccheggio (*pitch*): $\pm 10^\circ$
- Stabilizzatore dei raggi all'imbardata (*yaw*): $\pm 10^\circ$

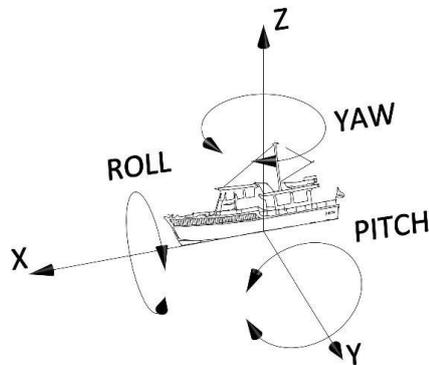


Figura 5: Movimenti a cui è soggetta la barca che interferiscono con la corretta acquisizione del segnale di ritorno dell'MBES

2.3 Sistema di posizionamento

Seapath 300 della Kongsberg (Figura 6) è un sistema di sensori che hanno lo scopo di trovare il posizionamento ottimale per una barca su cui si operano attività di rilevamento idrografico, dragaggio, ricerca oceanografica, rilievo sismico, costruzioni sottomarine o stabilizzazioni di antenna, combinando tecnologie inerziali a segnali satellitari GPS [4]. Nel caso sotto studio la barca che necessita un posizionamento accurato è il motoscafo Litus, al quale è stato integrato il sistema Seapath 300 che ha facilitato la mappatura misurando con estrema precisione i movimenti della prua, di rollio, di beccheggio e sollevamento in tempo reale. Il sistema ha trasferito i dati relativi a questi movimenti direttamente al MBES che, tenendone conto, ha potuto misurare correttamente le profondità.

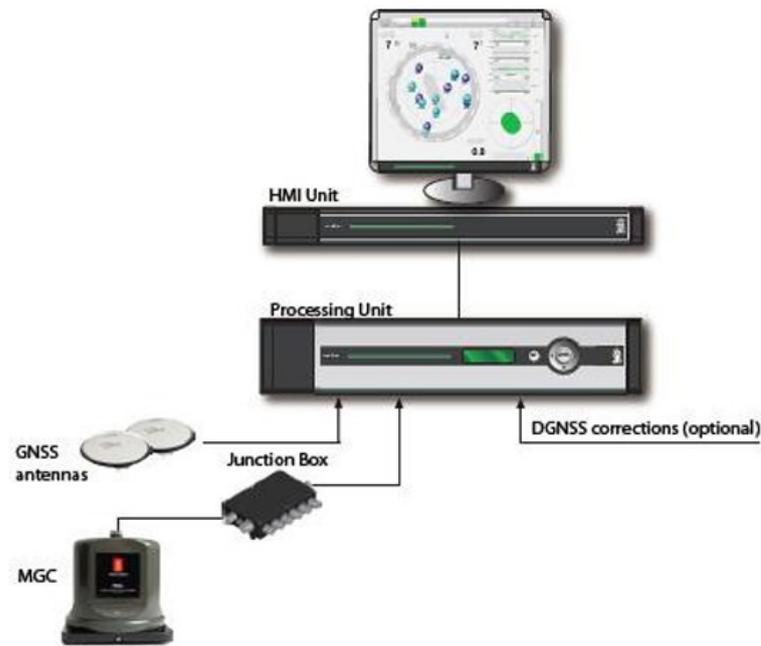


Figura 6: Componenti dello strumento Seapath 300 Kongsberg [5].

- Unità HMI e monitor: la *Human-Machine Interface* (HMI), ovvero l'Interfaccia Uomo-Macchina, nel caso del Seapath 300 è collegata allo schermo che consente all'utente di interagire con il dispositivo e visualizzarne i dati rilevati.
- Unità di processo: unità nella quale avviene il vero e proprio processo di calcolo della posizione unendo le informazioni ricavate dalle antenne satellitari e dal MGC, trasferendole poi all'unità di visualizzazione HMI. Assieme a quest'ultima, l'unità di processo va installata in un luogo chiuso all'interno della barca, al riparo da vibrazioni pesanti, dalla polvere e dall'energia statica, mantenendo una temperatura media di 20° C.
- Antenne GNSS: le antenne GNSS, collegate cioè al *Global Navigation Satellite System*, sono due. Devono essere protette dall'illuminazione diretta dei raggi radar e da altre antenne riceventi, per non alterare il segnale.
- MGC: l'MGC, ovvero *Motion Sensor and Gyro Compass* è una bussola giroscopica che può essere utilizzata come IMU, ovvero come Unità di Misurazione Inerziale. Il MGC è l'elemento chiave del sistema Seapath 300, poiché misura direttamente i movimenti della barca.

Al classico sistema Seapath 300 è stato aggiunto un sensore di moto MRU 5 e un'antenna GPS duale.

- MRU 5: specificamente progettato per le misurazioni del moto in applicazioni marine, è un sensore inerziale che ha come output diretti il rollio e il beccheggio assoluti

2.4 Visualizzazione e post-processing dei dati batimetrici

Hips and Sips è un software della CARIS per l'elaborazione dei dati idrografici che permette la visualizzazione tridimensionale dei risultati. Nel caso in esame Hips and Sips è stato usato per lo studio della batimetria e dei dati di retrodiffusione, rielaborando i dati ricavati dal MBES e tenendo conto dei profili di velocità del suono, delle correzioni delle maree e degli strumenti di controllo di qualità [6]. Il procedimento seguito per la batimetria e la retrodiffusione è quello standard di Caris Hips and Sips, in seguito illustrato (Figura 7).

Nel prossimo paragrafo l'elaborazione da parte del software per il caso in esame è descritta in modo dettagliato.

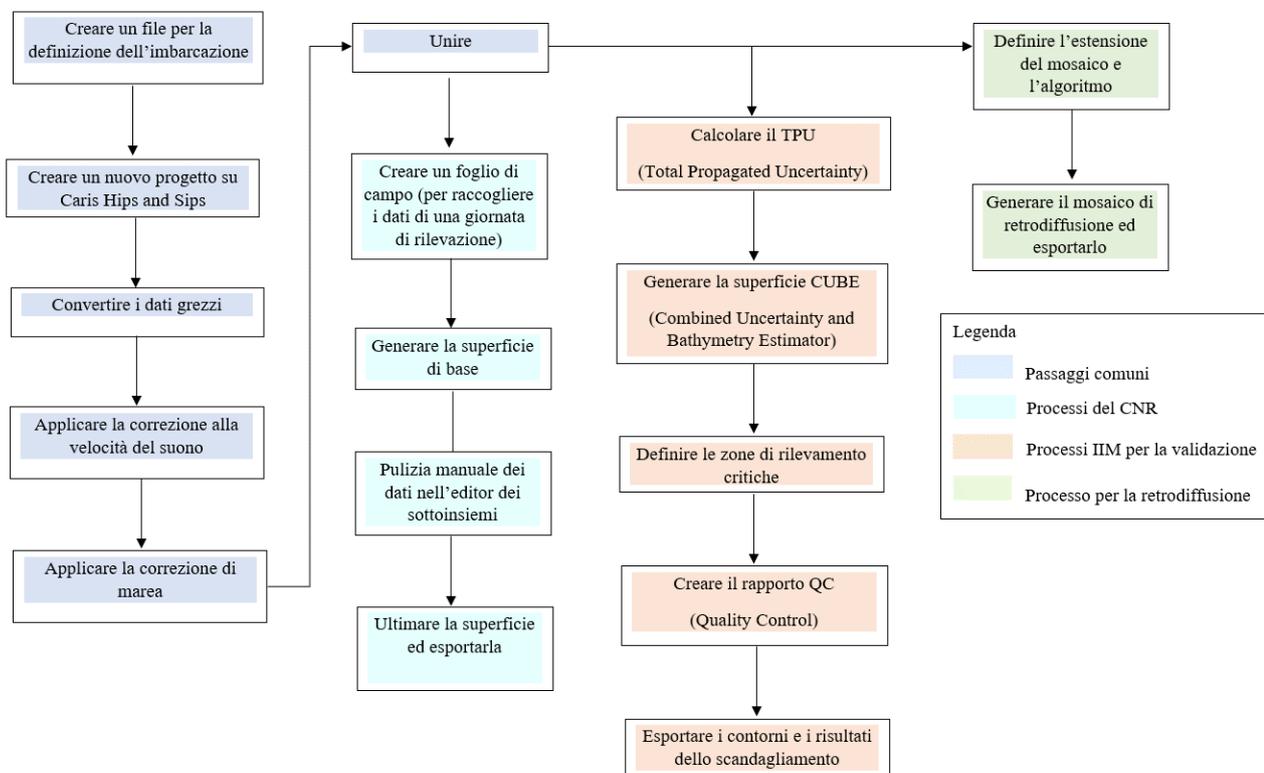


Figura 7: Procedimento di rielaborazione dei dati acquisiti dall'MBES su Caris Hips and Sips per l'esportazione dei dati di retrodiffusione.

2.5 Altri strumenti

Strumenti per la misurazione della velocità e generazione dei profili:

- I. Valeport mini SVS: sensore per la misura continua della velocità del suono, viene attaccato vicino ai trasduttori dell'MBES.
- II. Smart-X AML: questo strumento genera i profili di velocità del suono

GPS Fugro: utilizzato per conoscere le coordinate della posizione della barca nel processo di mappatura è stato utilizzato il GPS (Global Positioning System). Ha un'accuratezza di 0.2 m.

Modello idrodinamico SHYFEM

Lo SHYFEM (Shallow water HYdrodynamic Finite Element Model) è un modello per la correzione dei dati nel caso di escursione di marea e per la simulazione della circolazione dell'acqua nella laguna [7] sviluppato dal CNR-ISMAR di Venezia. Si tratta del modello ottimale per il caso in esame poiché, come suggerisce il nome, è adatto ad acque poco profonde. La sua peculiarità è che risolve le equazioni idrodinamiche tridimensionali usando il metodo degli elementi finiti sulle maglie destrutturate, che caratterizzano le aree con geometrie e batimetrie complesse, come nel caso della Laguna. Tali maglie permettono di ottenere una rappresentazione delle aree che sono oggetto di studio con una soluzione discontinua, in modo da ottenere una maggiore risoluzione solo dove necessario e facilitare la computazione dei risultati.

ArcGIS

Il software ArcGIS è stato utilizzato per la creazione e l'utilizzo delle mappe digitali del terreno e la gestione delle informazioni geografiche ottenute a partire dai dati di scandagliamento.

3 La mappatura del fondale della laguna di Venezia

Nella mappatura della Laguna di Venezia che è oggetto di studio, le aree di rilevamento sono state suddivise in 17 settimane di acquisizione, ripartite in base alle condizioni meteo.

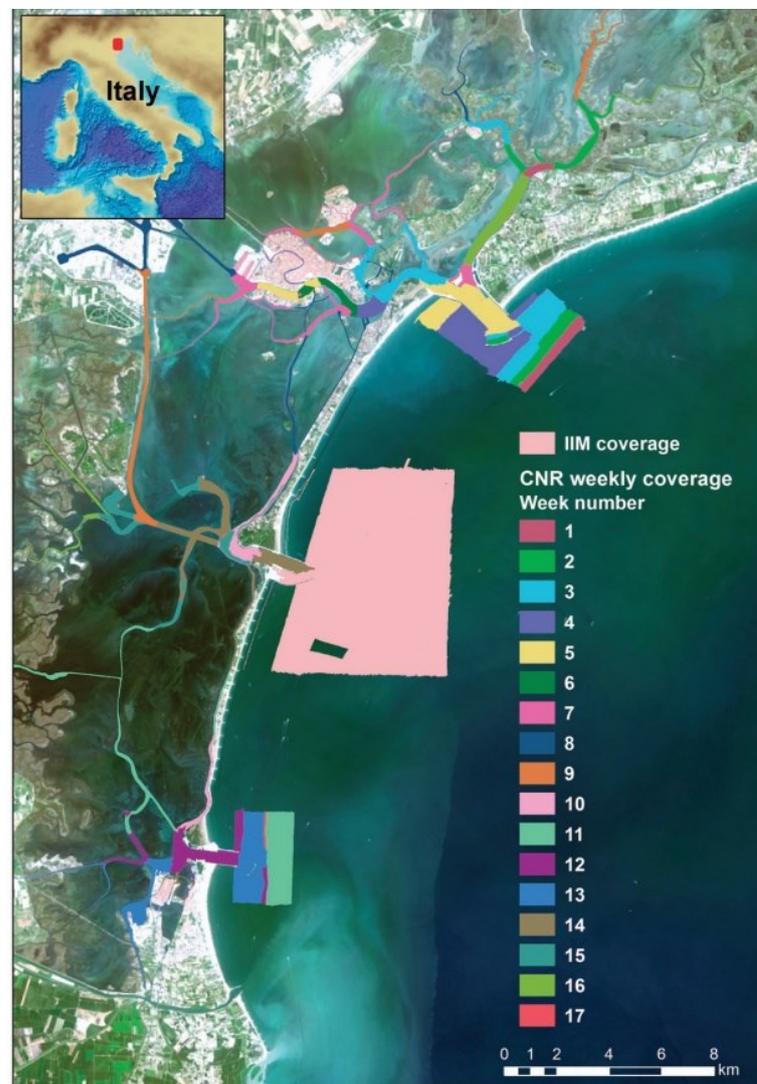


Figura 8: Aree di lavoro numerate e suddivise cromaticamente in base alla settimana di acquisizione. Il poligono rosa chiaro individua l'area censita dall'Istituto Idrografico della Marina (IIM).

Le 17 aree di acquisizione per ogni settimana di lavoro sono state scelte in base alle condizioni meteoriche. Il motoscafo Litus, con lunghezza di 10 m e profondità di pescaggio di 1.5 m, era mantenuto in posizione dal sistema Seapath 300, fornito dal GPS Fugro. Sul motoscafo era anche montato l'MBES impostato a una frequenza di 360 kHz. L'MRU 5 e i sistemi di correzione del Seapath 300 hanno raggiunto una precisione di rollio e beccheggio di 0.02° e una precisione di heading di 0.75°.

L'MRU 5 ha però una regolazione lenta, perciò quando la barca virava rapidamente di 90° si osservava un errore dovuto a un'imprecisa compensazione del sollevamento. Questo effetto è stato minimizzato attendendo la stabilizzazione del sistema MRU 5 prima di procedere con la rilevazione, ma non è stato possibile annullarlo ovunque.

Il sensore Valeport mini SVS misurava la velocità del suono e per mezzo dell'AML Smart-X ne sono stati prodotti e raccolti i profili. I dati sono stati registrati, visualizzati e controllati in tempo reale dal software di acquisizione dei dati Kongsberg SIS (Seafloor Information System). Per prevenire gli errori sono stati calibrati i sensori di correzione del movimento, tenendo conto anche dell'influenza di possibili raggi esterni.

Il motoscafo procedeva con la velocità media di 4 nodi, e per mantenere la velocità costante si è spesso scelto di navigare durante la notte, evitando l'intenso traffico diurno. Il software Caris Hips and Sips è stato utilizzato per elaborare i dati ricavati con l'MBES, seguendo i passaggi standard (Figura 8). Alla fine di ogni settimana di acquisizione è stato creato un diverso progetto Caris. Le superfici finali combinate (le DTM) e i dati di retrodiffusione sono stati quindi divisi in 17 parti riferite ciascuna a una settimana di acquisizione. La circolazione delle acque nella Laguna di Venezia indotta dalle maree, dal vento e dai flussi di calore e di sale, è stata simulata nel modello SHYFEM, che riproduce la complessa geometria e batimetria della laguna usando maglie triangolari di forme e dimensioni diverse, discontinue e numerate. La colonna d'acqua è stata discretizzata in 22 livelli verticali con spessore sempre maggiore a partire da 1 m per i primi 16 strati fino ad arrivare a 7 m per i livelli più profondi. Per la correzione della variazione del livello legato alla marea e la simulazione dei moti di marea sono stati usati i dati ricavati dalla mappatura effettuata nel 2002 dal Magistrato delle Acque di Venezia. Sono state assunte 93 stazioni di marea virtuali distribuite uniformemente nell'area di studio, che determinavano il livello dell'acqua orario. Questi dati sono stati integrati al modello idrodinamico SHYFEM per correggere le variazioni di livello dovute dalla marea. Per ogni foglio di campo di Caris è stata utilizzata una stazione virtuale. In ogni stazione di marea le correzioni sono state calcolate considerando il livello dell'acqua simulato dal modello idrodinamico SHYFEM (Figura 9), applicato all'intera Laguna di Venezia. Tutte le correzioni sono riferite al dato locale "Punta Salute 1897".

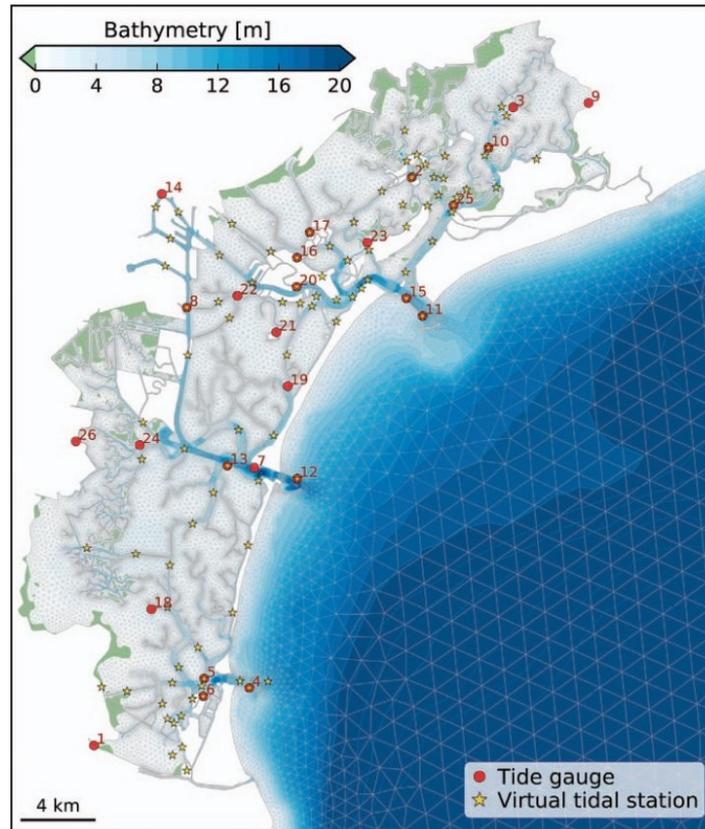


Figura 9: Griglia destrutturata del modello SHYFEM con la batimetria interpolata sulle maglie triangolari. I puntini rossi rappresentano gli indicatori di marea usati nel modello di validazione e le stelle gialle individuano le stazioni di marea virtuali per le correzioni di marea.

La TPU, Total Propagated Uncertainty è stata calcolata nel software Caris Hips and Sips e il valore risultante combina gli errori dovuti alle caratteristiche dell'MBES, le incertezze di posizionamento e alla misura del tempo. La TPU può essere divisa in componente orizzontale (hzTPU) e verticale (dpTPU) e nel caso in esame sono stati trovati i valori medi $hzTPU = 0.4$ m e $dpTPU = 0.1$ m relativi all'intero set di dati. Tuttavia questa valutazione è limitata poiché si riferisce a valori medi rilevati in un intervallo di tempo esteso (sei mesi) con l'utilizzo di stazioni discrete per la correzione degli errori di marea.

L'Istituto Idrografico Italiano ha rielaborato i dati batimetrici per la sicurezza della navigazione. Per mezzo di Hips and Sips è stata quindi prodotta la Superficie CUBE (Combined Uncertainty and Bathymetry Estimator), ovvero la superficie di incertezza con una risoluzione di 1 m, sfruttando le informazioni acquisite dai dispositivi sperimentali.

Attraverso lo strumento di disambiguazione sono state determinate le migliori ipotesi di profondità in ciascun nodo allo scopo di generare la superficie più accurata. Questa superficie, dotata delle informazioni sulla propagazione dell'incertezza orizzontale e verticale, è stata trasferita al database dell'Istituto Idrografico Italiano per essere usata nelle carte nautiche ufficiali della Laguna.

I mosaici di retrodiffusione sono stati creati in Caris Hips and Sips attraverso lo strumento di codifica Geocoder. Quest'ultimo correggeva automaticamente le impostazioni del sistema per la perdita di trasmissione, l'area nelle zone dove non arrivava il suono e le variazioni dell'angolo di incidenza.

Siccome i dati di retrodiffusione sono il risultato della complessa interazione tra il segnale sonoro, la colonna d'acqua e il fondale, è necessario conoscere diversi parametri per stimarne l'errore. Quest'ultimo è infatti determinato dalla presenza dei seguenti fenomeni:

- L'ampiezza del segnale acustico proiettato in acqua, che dipende dalla trasmissione di energia. Nel caso in esame la potenza di trasmissione era stata preimpostata automaticamente in base alla profondità dell'acqua e allo schema di proiezione. Nella creazione del mosaico dal Geocoder entrambi questi parametri vengono considerati automaticamente.
- La perdita di energia acustica durante il suo percorso verso il fondale e nel ritorno, che dipende dall'intervallo tra segnale e obiettivo, dalle proprietà fisiche dell'acqua marina in funzione della profondità (salinità, temperatura) e dalla frequenza del segnale. Sono stati effettuati degli esperimenti per studiare la dipendenza della perdita di energia dalle fluttuazioni di temperatura e salinità, concludendo che questi fattori influenzassero i risultati di non più di 0.5 dB.
- L'incertezza intrinseca legata alle variazioni del ricevitore sonar ai segnali acustici, nel caso in esame vale ± 1 dB
- La presenza di bolle d'aria, banchi di pesci, sedimenti in sospensione nella colonna d'acqua, causavano fluttuazioni indesiderate del segnale. In corrispondenza di questi elementi nel mosaico possono apparire delle linee più scure, impedendo la caratterizzazione del fondale marino.
- Le correzioni applicate dal software di elaborazione.

Per stimare la variazione globale dei dati di retrodiffusione legata ai fenomeni appena descritti sono stati condotti due esperimenti ripetendo le rilevazioni con l'MBES in diverse parti della laguna:

- Nella Lido Inlet, sono state effettuate 22 rilevazioni ripetute. La frequenza dell'MBES era stata impostata a 340 kHz. La distribuzione dell'intensità di retrodiffusione è stata estratta da ciascun mosaico ricavato dai dati dell'MBES rielaborati attraverso il procedimento precedentemente illustrato (Figura 7). I dati elaborati appartenevano all'intera area su cui si era effettuata l'indagine (poligono bianco della Figura 10 a) e per due sottoinsiemi estratti in un'area pianeggiante (poligono blu della Figura 10 a) e in un'area irregolare (poligono rosso della Figura 10 a). Confrontando le distribuzioni nei

boxplot si è scoperta la variabilità del valore di retrodiffusione media estratta dai mosaici, che rientra nella sensibilità dello strumento MBES EM 2040, ovvero ± 1 dB.

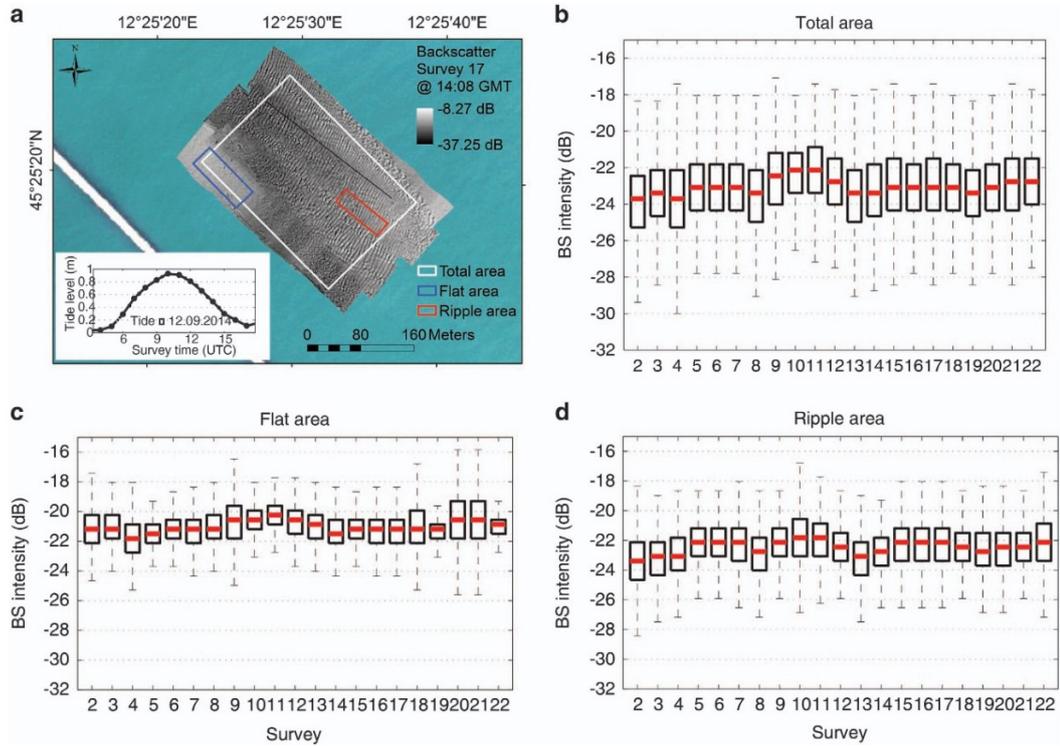


Figura 10: Variabilità dell'intensità di retrodiffusione durante un ciclo di marea in diverse parti della Lido Inlet. a) Mappa dei dati di retrodiffusione raccolti durante una delle rilevazioni del primo esperimento e valori di marea corrispondenti. b) Boxplot estratti dai mosaici dell'area totale studiata (poligono bianco). c) Boxplot estratti dai mosaici di un'area pianeggiante (poligono blu). d) Boxplot estratti dai mosaici di un'area con increspature (poligono rosso)

- Nel Canale La Bissa sono stati effettuati 10 rilievi ripetuti con due frequenze: 200 kHz e 320 kHz. Anche in questo caso è possibile visualizzare la variabilità del valore di retrodiffusione per mezzo dei boxplot. Stavolta le aree sono state scelte per rappresentare due tipi di fondale marino: una a fondale spoglio (nella Figura 11 a indicata con il perimetro azzurro) e una a fondale coperto da microalghe (nella Figura 11 a indicata con il perimetro rosso). La variazione più significativa del valore di retrodiffusione è stata individuata nell'area coperta da microalghe tra le rilevazioni 2 e 7, di 6 dB. Questa fluttuazione è dovuta al fatto che le forti correnti di marea avevano influenzato la distribuzione delle microalghe, cambiandone la densità e l'orientamento.

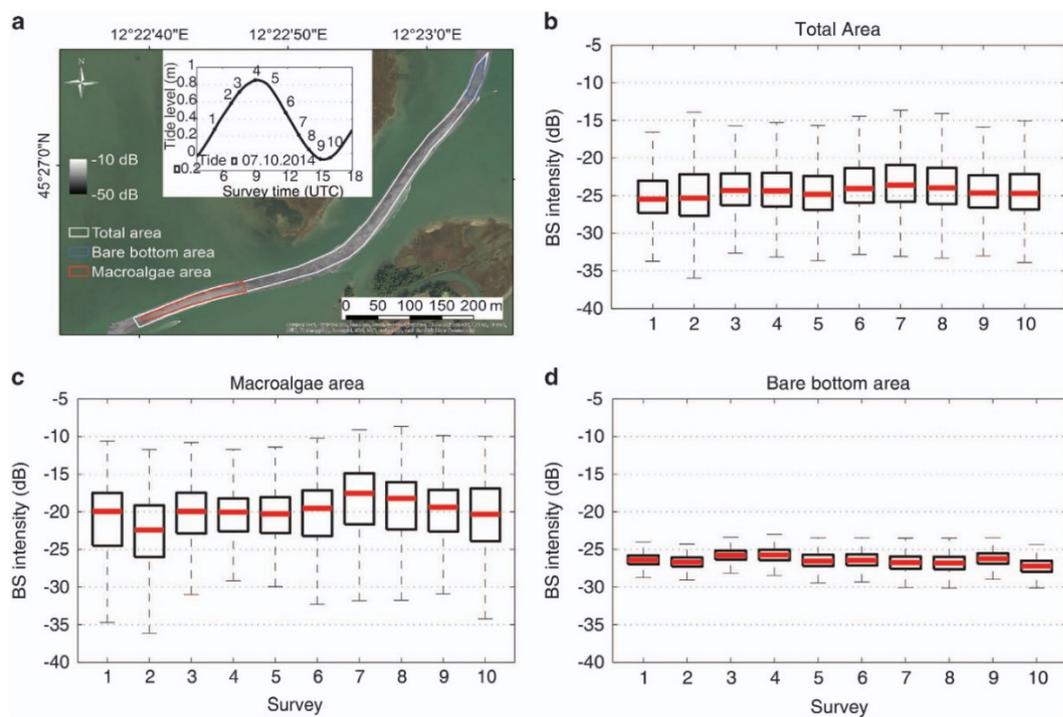


Figura 11: Variabilità dell'intensità di retrodiffusione durante un ciclo di marea in diverse parti del canale La Bissa. a) Mappa dei dati di retrodiffusione raccolti durante una delle rilevazioni del primo esperimento e valori di marea corrispondenti. b) Boxplot estratti dai mosaici dell'area totale studiata (poligono bianco). c) Boxplot estratti dai mosaici di un'area con fondale spoglio (poligono blu). d) Boxplot estratti dai mosaici di un'area con fondale coperto da microalghe (poligono rosso).

Le griglie batimetriche e i mosaici di retrodiffusione sono stati esportati da Caris e convertiti in file raster per essere sfruttati in ulteriori analisi su ArcGIS (Figura 12).

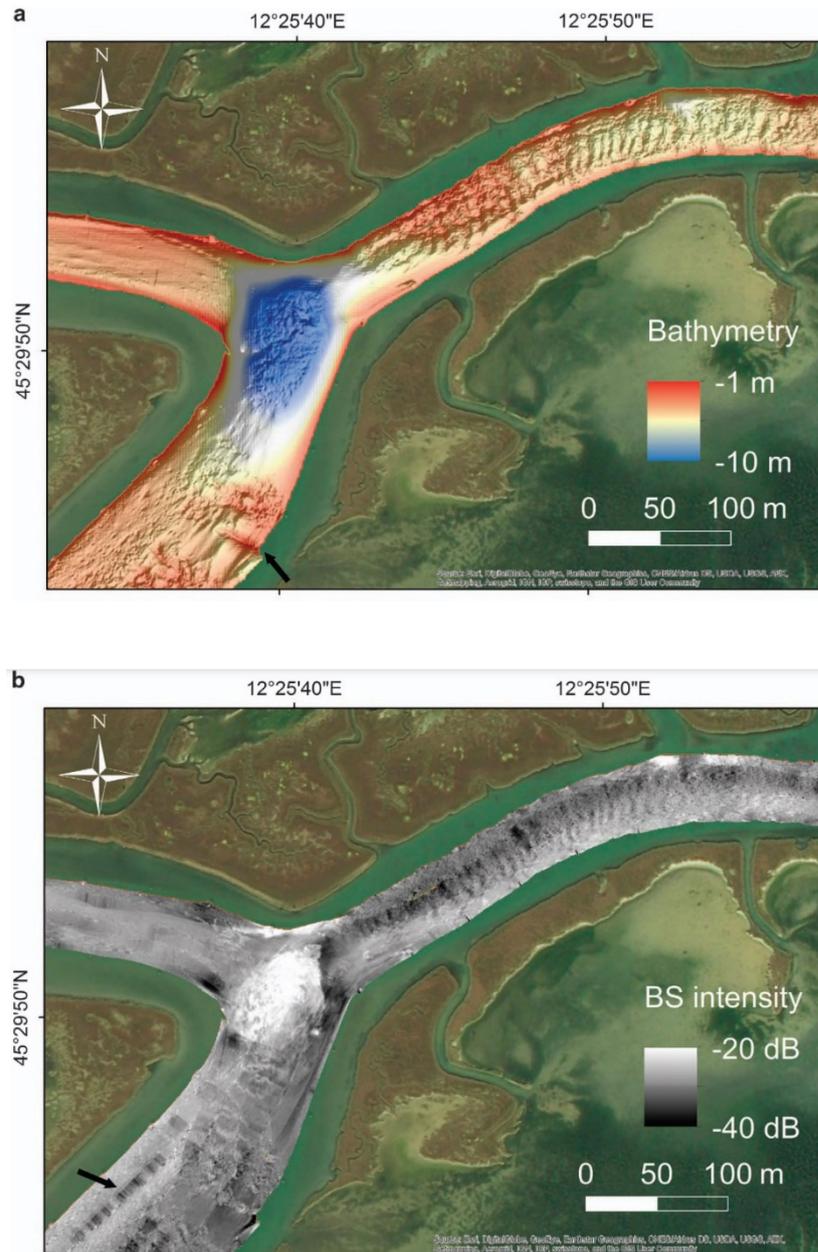


Figura 12: Esempio degli output in seguito all'elaborazione dei dati ricavati dall'ecoscandaglio multi-fascio. a) DTM risultante alla rielaborazione dei dati batimetrici con Caris Hips and Sips. b) Mosaico di retrodiffusione ricavato con Caris Hips and Sips. In entrambe le figure a) e b) le frecce nere indicano la presenza di manufatti antichi sul fondale.

4 Ambiti di studio derivanti dalla mappatura

4.1 Valutazione dei metodi di mappatura dei fondali marini per la classificazione di habitat bentonici superficiali

La tecnologia MBES può essere usata in acque poco profonde per mappare la distribuzione nei fondali degli habitat bentonici, identificando le risposte acustiche tipiche di ciascuna spugna, dette firme di retrodiffusione. In questo contesto è necessario comprendere quali tra le segmentazioni più comuni si adattano meglio alla descrizione degli habitat bentonici, per livello di dettaglio. Parallelamente è necessario sviluppare nuovi protocolli di campionamento per ottenere dati precisamente georeferenziati per validare il processo di classificazione degli ambienti bentonici. A questo scopo è stato volto lo studio dei fondali marini effettuato nel 2013 per il progetto “Ritmare” attraverso la mappatura con l’MBES, in particolare, l’indagine sugli habitat bentonici si concentra su un dataset raccolto in un canale di marea di profondità compresa tra i 2 m e 10 m, nella Laguna di Venezia: il Canale Scanello.

Il Canale Scanello è un naturale canale di marea che scorre come un ramo laterale di un corso di navigazione principale, verso una zona paludosa, seguendo una lieve pendenza da nord a sud. Ha batimetria complessa, infatti il suo fondale è caratterizzato da increspature, solchi, zone pianeggianti e pozze (Figura 13).

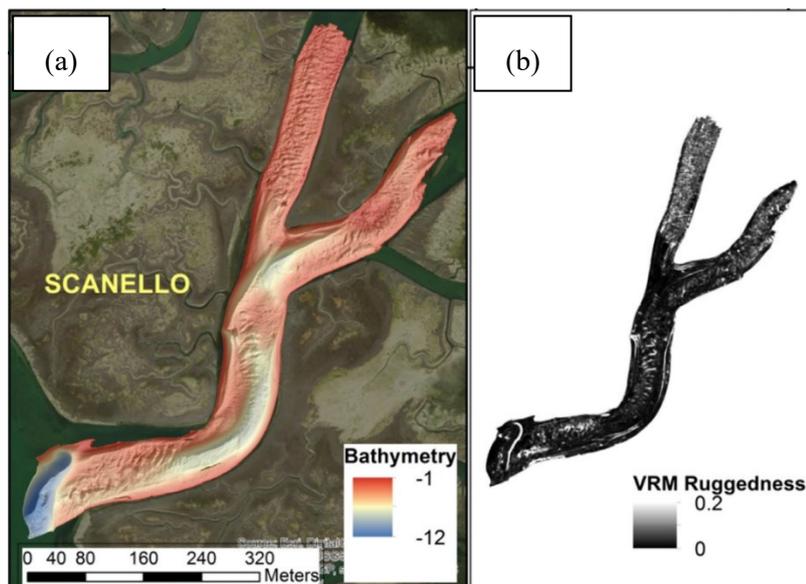


Figura 13: a) Batimetria del Canale Scanello con risoluzione di 0.05 m ed esagerazione verticale pari a cinque volte la realtà, sovrapposta all'immagine satellitare dell'area adiacente; b) Vector Ruggedness Measure (VRM ovvero misura di increspatura vettoriale)

Ai dati rilevati sono stati applicati diversi metodi di classificazione consolidati nel tempo. I metodi si dividono in due gruppi in base alla proprietà considerata per la classificazione: intensità di retrodiffusione e parametri strutturali. Lo scopo è individuare il metodo di segmentazione della retrodiffusione che fornisce la mappatura migliore di habitat bentonici a scala fine. L'indagine si rivolge anche all'effetto della dimensione dei pixel per risoluzioni diverse di rilevazione con l'MBES. La verifica del metodo migliore è avvenuta con l'osservazione di fotografie subacquee, campioni di substrato bentonico, immersioni da parte dei sommozzatori per ricavare informazioni reali e dirette sui fondali.

Sono stati estratti dieci campioni di sedimento con un Van Veen Grab. La frazione sottile (di diametro inferiore a 2 mm) è stata misurata come un sotto-campione dei 5 cm superficiali tramite un'analisi di diffrazione laser. La classe dei sedimenti grossolani (di diametro superiore a 2 mm), è risultata composta prevalentemente da frammenti di conchiglie. Questa componente bioclastica è stata suddivisa in base a una scala sul contenuto di detriti derivanti da conchiglie: nessun detrito, detrito fine, detriti grossolani (che possono comprendere interi gusci).

I rilievi fotografici sono stati effettuati da dei sommozzatori. Sull'area di studio sono stati selezionati due tratti di 10 m lungo la direzione della corrente. Le foto di dimensioni 25 cm x 20 cm sono state raccolte ogni 5 m procedendo verso monte su entrambi i lati dei tratti. Usando una Go-Pro sono stati acquisiti video subacquei su tre aree da 20 m x 20 m seguendo cinque tratti paralleli nella direzione nord-sud. Dal video sono state estratte le immagini, una per ogni metro di tratto percorso, e classificate.

L'accuratezza dei modelli utilizzati è stata stimata con la matrice di errore. Quest'ultima descrive il modello di allocazione delle classi in relazione ai dati di riferimento reali del terreno. Per la stima dell'accuratezza dei modelli sono stati considerati 100 campioni, escludendone 24 poiché scelti per l'adattamento delle classificazioni con metodi OBIA e MLC. Per l'analisi con TexAn sono state estratte cinque zone di prova tra i 24 campioni. A partire dalle matrici di contingenza sono state calcolate l'accuratezza complessiva (Overall), dell'utente (User) e del produttore (Producer). La User Accuracy rappresenta la probabilità che un pixel appartenente a una certa classe nella mappa creata dal modello appartenga alla stessa classe nella realtà. La Producer Accuracy è la probabilità che una determinata classe di fondale sia classificata come tale. La Overall Accuracy fornisce una stima globale di quanto buona sia la classificazione, in quanto coincide con la percentuale dei casi correttamente allocati (Figura 15 a). È stato infine calcolato il coefficiente Kappa di Cohen, che tiene conto della probabilità che si verifichi concordanza casuale tra le classificazioni ottenute per i diversi metodi (Figura 15 b). Per il metodo di classificazione manuale non è stata stimata l'accuratezza poiché è stato ritenuto troppo soggettivo.

4.1.1 Segmentazione manuale

La gamma di livelli di grigio nelle immagini di retrodiffusione definisce un mosaico caratterizzato da zone di riflessione acustica ben distinte, quindi è stato possibile selezionare visivamente i livelli batimetrici e le intensità di retrodiffusione, derivandone delle unità spaziali omogenee. Digitalizzando i confini di queste unità omogenee sono stati individuati e mappati due livelli gerarchici: quello delle "Macro-aree acustiche", (aree maggiori a 5 m²) e quello degli elementi acustici piccoli (aree inferiori a 5 m²).

Questo metodo ha individuato sei classi per entrambe le risoluzioni (Figura 14 b). Le prime tre classi, per le macro aree acustiche, sono: copertura detritica, fondale fangoso e macchie di SAV (Submerged Aquatic Vegetation). Le tre classi di elementi acustici piccoli sono: spugne, macchie di SAV e detriti. Per una precisa classificazione degli habitat bentonici sarebbe stato utile considerare anche la batimetria, oltre che ai dati di retrodiffusione, ma in questo caso non è stato necessario in quanto la risoluzione di questi ultimi era tale da identificare le risposte acustiche degli specifici elementi biogenici. I margini che delimitano gli habitat sono spesso vagamente definiti, e si rivela necessaria l'applicazione di metodi di segmentazione per rappresentare la complessità delle distribuzioni. A questo proposito si è visto che la segmentazione manuale può rilevare caratteristiche biotiche su scala fine e distinguere macro-regioni sui fondali marini; tuttavia quando l'operatore effettua la digitalizzazione sull'area di studio, sottili variazioni di

grigio non vengono intercettate. Questo metodo è però impreciso, lento, non ripetibile e strettamente legato alle capacità dell'osservatore.

4.1.2 L'ottimizzazione del raggruppamento di Jenks

L'ottimizzazione del raggruppamento di Jenks è uno strumento di classificazione dei raster in ArcGIS. Dato un certo numero di classi, il metodo prevede la minimizzazione della varianza all'interno delle stesse, massimizzando invece la varianza tra le classi. Dal dataset dei dati reali del suolo, sono stati derivati cinque classi di habitat. La classificazione di Jenks è stata attuata per valutare il numero ottimale di raggruppamenti di retrodiffusione, modificando di volta in volta il numero delle classi k (da 2 a 6). Sono state quindi confrontate le partizioni attraverso l'indice di fit di bontà della varianza GVF (Goodness Variance Fit), confermando il numero di classi adatto a cinque. Infine è stata applicata su ArcGIS l'ottimizzazione di Jenks ai dataset.

Le distribuzioni delle classi di SAV e di copertura detritica seguono andamenti simili (Figura 14 c). Le classi di detriti fini e grossolani hanno distribuzioni visibilmente diverse tra loro, con la netta prevalenza dei detriti grossolani. Le unità spaziali del fondale fangoso e delle spugne sono distribuite in modo coerente alla suddivisione manuale. Il metodo di Jenks ha fornito una distribuzione degli habitat coerente con i dati reali del suolo. L'indice GVF si è dimostrato uno strumento attendibile per determinare i raggruppamenti. L'inclusione delle strategie di vettorizzazione ha migliorato ulteriormente i risultati, superando il problema delle zone di fondale che apparivano simili e che avevano risposte acustiche somiglianti pur rappresentando habitat diversi. In questo modo le spugne sono state separate dai sedimenti fini senza introdurre altri metodi specializzati per lo sviluppo dei dati.

4.1.3 Classificatore per massima verosimiglianza MLC

Il Maximum Likelihood Classifier MLC è un algoritmo parametrico basato sui pixel per la classificazione di immagini ricavate tramite dati acustici. L'algoritmo assume una distribuzione gaussiana dei dati, e li divide in gruppi definiti da un set di dati di prova. L'MLC calcola la probabilità che un dato pixel appartenga a ciascuna classe, assegnando poi la massima probabilità di appartenenza a ogni pixel del gruppo. Lo strumento di classificazione Maximum Likelihood Classifier Tool è stato usato in ArcGIS per eseguire una classificazione per campo. Sono poi stati digitalizzati una serie di campi prova basati sulle localizzazioni reali del terreno. Considerata l'omogeneità spaziale delle zone di retrodiffusione che circondano le localizzazioni reali del terreno sono stati scelti campi quadrati di 1 m² per mappare tutte le classi tranne quella delle spugne, caratterizzata invece da campi circolari e irregolari. Per mezzo dello strumento di ArcGIS Create Signature Tool sono stati prodotti i file di firma acustica.

Il metodo MLC ha rilevato sei classi per entrambe le risoluzioni (Figura 14 d). Per le classi dei fondali fangosi e dei detriti grossolani è stata osservata la massima somiglianza con gli altri metodi. Le macchie di SAV risultano molto più ampie rispetto agli altri metodi, le spugne appaiono mappate con precisione. Tuttavia c'è un errore di localizzazione di altre caratteristiche della zona di studio, infatti gli artefatti dell'MBES risultano nella classe delle spugne e i fondali detritici rientrano nelle zone di SAV.

Il metodo MLC ha distinto in modo corretto le classi con livelli di grigio omogenei, mentre le classi con valori di retrodiffusione eterogenei sono state confuse tra loro per le simili caratteristiche cromatiche. Per migliorare i risultati la varianza nella classe delle spugne è stata ridotta digitalizzandole in poligoni irregolari per definire in modo più preciso la loro firma di retrodiffusione. Tuttavia l'assunzione di una distribuzione gaussiana di dati non si rivela l'ideale per la mappatura di segnali di retrodiffusione eterogenei, in quanto le distribuzioni normali in natura non esistono.

4.1.4 Analisi delle immagini basate su oggetti con eCognition

Il metodo OBIA (Object Based Image Analysis) consiste in un processo di segmentazione e classificazione dell'immagine. La fase di segmentazione scompone l'immagine in oggetti di dimensioni variabili che rappresentano caratteristiche del suolo. Le dimensioni degli oggetti sono definite tramite la massima eterogeneità ammessa. L'analisi è stata svolta con il software eCognition, usando i valori di retrodiffusione con risoluzioni di 0.05 m e 0.2 m. Le scale migliori sono risultate rispettivamente di 5 e 15. La classificazione degli oggetti in cui è stata scomposta l'immagine sfrutta la loro forma, la loro dimensione e le loro caratteristiche cromatiche. La classificazione è stata eseguita in due passaggi, considerando prima le spugne e poi le altre classi. Le aree di retrodiffusione delle spugne sono caratterizzate da forme pseudo circolari, un ritorno acustico debole e rilievi batimetrici positivi; pertanto a questa classe è stata aggiunto il layer di batimetria nell'analisi. L'algoritmo Template Matching ha riconosciuto le zone occupate dalle spugne. Nel Template Editor è stato prodotto un modello di partenza su un set campione basato su dati reali del terreno. Il modello è stato determinato mediante il CCL (Cross Correlation Layer) delle caratteristiche del campione. I valori del CCL variano da -1 a 1, dove l'unità indica una rappresentatività della classe sotto indagine pari al 100%. Per classificare gli altri elementi sono stati sperimentati altri classificatori disponibili nel software eCognition, ma i risultati migliori sono stati ottenuti con il KNN (K-Nearest Neighbour). Questa tecnica assegna l'oggetto a una certa classe tale che la maggior parte dei campioni più vicini K le appartengono. Le classificazioni erano basate sull'entropia del metodo GLCM e sui valori medi di retrodiffusione dei vari elementi.

Il metodo OBIA ha identificato cinque classi (Figura 14 e). L'algoritmo TM per la classificazione delle spugne ha creato, per il dataset di risoluzione 0.05 m, un modello con 223 oggetti e un valore di CCL pari a 0.69. Per il dataset da 0.2 m, il numero di oggetti è risultato 149 e CCL pari a 0.78. Le classi degli altri elementi, mappate con l'algoritmo KNN sono molto simili alla segmentazione manuale.

Uno dei maggiori vantaggi dell'analisi OBIA è che l'immagine è sviluppata prendendo in considerazione raggruppamenti di pixel che insieme costituiscono gli oggetti dell'immagine. Questi oggetti contengono più informazioni rispetto ai singoli pixel ed è più facile riconoscerne la configurazione spaziale dei vari sistemi naturali. Si è notato che l'algoritmo KNN funziona bene quando l'immagine è il risultato di una segmentazione a più risoluzioni con piccola scala. Tuttavia si è mostrato che aumentando il parametro K diminuiva la varietà nelle distribuzioni delle classi, producendo una classificazione meno accurata. L'algoritmo TM è stato utile per mappare le spugne, i cui confini coincidevano con degli alti valori di CCL. Questo metodo però non garantisce una forte precisione nella determinazione delle spugne a causa di parametri complessi che caratterizzano il modello. Ci sono molti modi per migliorare il funzionamento di TM, per esempio collegare il TM alle caratteristiche adeguate dei segmenti OBIA. Si è sottolineato come il valore di CCL stesso rappresenti per le spugne una misura di accuratezza poiché quantifica la corrispondenza che c'è tra il modello delle spugne e la loro distribuzione reale.

4.1.5 Analisi della texture con TexAn

Questo metodo statistico applicato attraverso il software TexAn, sfrutta le matrici di co-occorrenza dei livelli di grigio GLCM (*Grey Level Co-occurrence Matrices*) per analizzare la texture esaminando la relazione spaziale dei pixel. La texture dell'immagine può essere caratterizzata calcolando la frequenza con cui coppie di pixel con specifici valori e in determinate relazioni spaziali si presentano nell'immagine, realizzando una matrice GLCM, che esprime la frequenza di occorrenza $P_D(i,j)$, dove D rappresenta la distanza tra i punti considerati i e j indicano i livelli di grigio di ciascuno dei due. Per descrivere una matrice GLCM sono sufficienti due indici di texture, l'entropia e l'omogeneità. L'entropia misura la mancanza di organizzazione spaziale all'interno della finestra di calcolo del software TexAn, segnalando quindi la presenza di asperità. L'omogeneità invece quantifica le dissomiglianze nella finestra di calcolo. I livelli di grigio sono apparsi nel mosaico ricavato con l'MBES, convertiti a 8 bit con uno scaling lineare delle intensità di retrodiffusione, con l'effetto di eliminare le variazioni di segnale acustico di significato fisico irrilevante. I parametri in TexAn sono stati ottimizzati per separare le diverse risposte di retrodiffusione. L'indagine è stata eseguita per diversi numeri di livelli di grigio (da 256 a 8 livelli

di grigio), calcolando le matrici GLCM per finestre di ampiezza variabile (da 10 a 80 pixel, aumentando di 10 pixel alla volta), e cambiando la distanza D in ogni coppia di pixel. La classificazione finale è stata ottenuta con ArcGIS applicando la MLC ovvero la classificazione di massima probabilità (*Maximum Likelihood Classifier*) ai file raster delle griglie di entropia e di omogeneità.

Nell'area di studio sono state individuate sei firme distintive di retrodiffusione (Figura 14 f); per ognuna di esse sono state calcolate entropia e omogeneità. La classe di fondale fangoso mostra entropia e omogeneità medie, ed è ben raggruppata. La classe di detriti e gusci grossolani si presenta con entropia e omogeneità leggermente maggiori. Il gruppo di detriti e gusci fini invece mostra entropia e omogeneità alte. La classe SAV mostra più variazioni in entrambi i parametri, la classe delle spugne alte entropia e omogeneità, e l'ultima, quella degli artefatti dell'MBES presenta infine elevate omogeneità ed entropie che coprono gli intervalli tra le altre classi. Lo studio ha portato a sostenere che TexAn funziona meglio per risoluzioni dei dati più grossolane e in studi di ampia scala, scegliendo finestre di calcolo che siano ampie abbastanza per cogliere le variazioni strutturali d'interesse ma sufficientemente piccole per non confondere le caratteristiche di ogni habitat. Per la risoluzione pari a 0.2 m, i risultati migliori sono stati ottenuti per aree di 8 m di diametro. TexAn estrae informazioni diverse rispetto ai metodi basati sul raggruppamento, infatti considera la media di una quantità significativa di punti, i cui dati hanno risoluzione fine, permettendo la mappatura di aree relativamente ampie. L'analisi della texture è stata fortemente influenzata da artefatti lineari, rilevati facilmente per la loro firma di retrodiffusione omogenea.

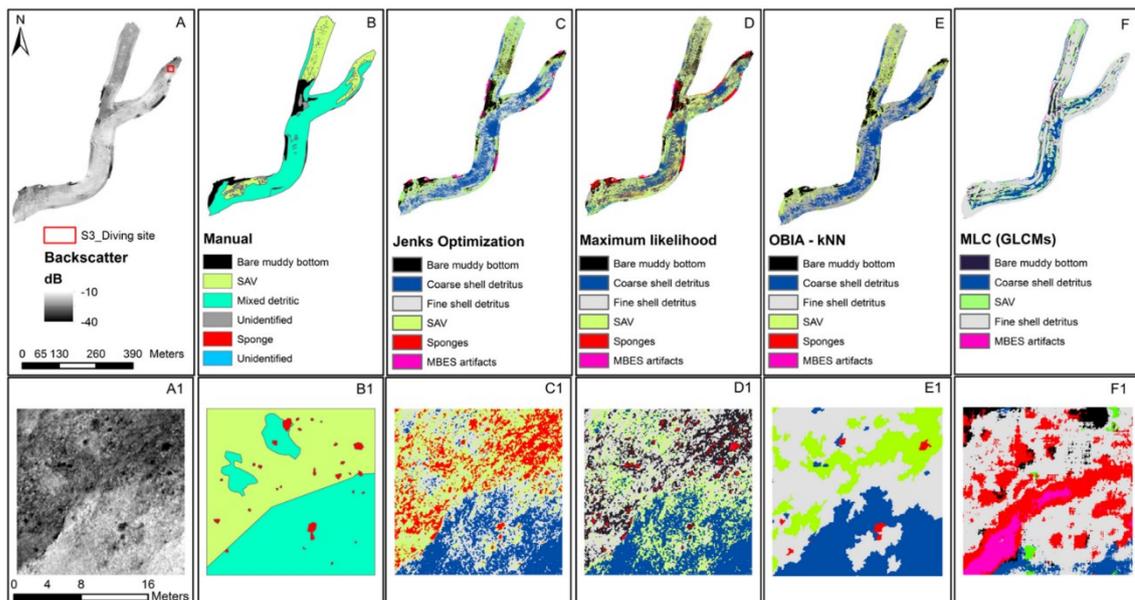


Figura 14: Fila superiore- dati di retrodiffusione e risultati delle classificazioni con i diversi metodi usando la risoluzione da 0.2 m. Fila inferiore- area di 20 m x 20 m con dati di retrodiffusione e segmentazione per una risoluzione di 0.05 m.

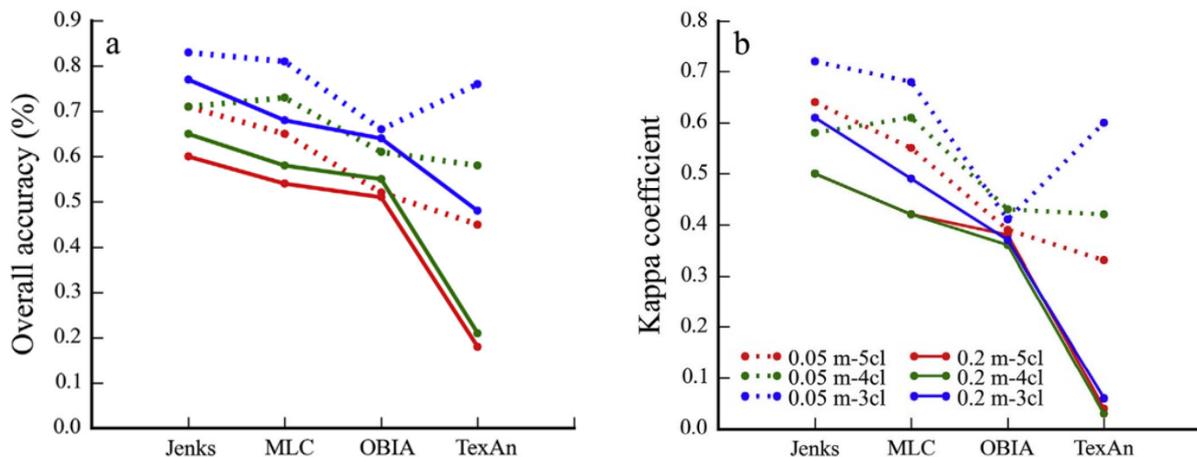


Figura 15: a) Accuratezza complessiva e b) coefficiente kappa per ciascuno dei metodi di segmentazione e dipendenza dal numero di classi; - rosso rappresenta le cinque classi (spugne, detriti fini, detriti grossolani, SAV e fango); - verde rappresenta le quattro classi (spugne + SAV, detriti fini, detriti grossolani e fango); - blu rappresenta le tre classi (spugne + SAV, detriti fini + grossolani, fango). Le linee continue indicano la risoluzione di 0.2 m, quelle tratteggiate di 0.05 m.

La valutazione quantitativa che ha utilizzato le matrici di confusione ha dimostrato che non è stato possibile replicare completamente i dati reali del suolo attraverso le classificazioni. Questo problema è legato alla risoluzione molto fine delle griglie utilizzate e la sua risoluzione richiede una ricerca approfondita sui dati reali del suolo, che sarà oggetto d'interesse per studi futuri. Un elemento da considerare è inoltre la dinamicità temporale del sito di studio che provoca incompatibilità tra i dati reali del suolo e dati acustici: i processi ecologici come per esempio la crescita o morte delle spugne modificano velocemente il fondale marino.

Unendo le classi di spugne e SAV in un'unica classe che unisce alghe e organismi invertebrati sono state ripetute le analisi sulle matrici di contingenza per tutti i metodi. Questo step ha permesso di migliorare l'accuratezza, ma è stata persa la possibilità di descrivere ciascuno dei due habitat uniti in modo dettagliato. Si è compreso che i dati di retrodiffusione rilevati ad alte risoluzioni descrivono dettagliatamente la composizione dei substrati del sistema in esame, ma non permettono una classificazione altrettanto accurata degli habitat. Questa situazione implica un compromesso tra caratteristiche del fondale marino e distinzione degli habitat, quando questi due aspetti sono mappati contemporaneamente. Tuttavia lo studio ha dimostrato che il raggruppamento dei dati di retrodiffusione rilevati con l'MBES è stato sufficiente per descrivere e riconoscere la distribuzione degli habitat bentonici nell'ambiente della Laguna di Venezia.

4.2 L'impronta umana sul sistema costiero della laguna di Venezia

La morfologia della Laguna di Venezia è stata fortemente modificata fin dai primi insediamenti umani, ma gli impatti più rilevanti risalgono al XV secolo quando i maggiori affluenti sono stati deviati fuori dalla laguna per impedire la sedimentazione di materiale nelle aree marginali. Nei secoli successivi la laguna ha continuato ad essere rimodellata per soddisfare le necessità della vita umana sull'acqua.

Il progetto Ritmare, attraverso la mappatura dei canali di marea, ha permesso lo studio dell'impronta umana sulla laguna, con lo scopo di creare consapevolezza sulle conseguenze di tali azioni. Gli interventi umani individuati nella Laguna di Venezia sono stati classificati come diretti, nel caso in cui le attività antropiche modificassero la morfologia del fondale, e indiretti, quando i cambiamenti dei fondali rappresentavano una reazione del sistema di marea alle perturbazioni umane.

I dati batimetrici ricavati dalle rilevazioni sono stati rielaborati e combinati per generare una mappa digitale batimetrica (DEM) dei fondali dei canali. Il DEM è stato utilizzato per mappare tutte le caratteristiche morfologiche dei fondali relative alle attività antropiche per mezzo di ArcGIS. Gli elementi legati agli interventi umani sono stati identificati visivamente e rappresentati digitalmente come poligoni, quando le loro dimensioni erano maggiori della soglia predefinita di 10 m. Quando gli elementi avevano dimensione inferiore a 10 m venivano salvati con la forma di un punto e trasformati in poligoni grazie a un buffer di 1.5 m (cioè la dimensione media di un elemento di origine antropica registrata nel database). Per facilitare il processo di rappresentazione digitale gli attributi del terreno sono stati estratti dalla batimetria: pendenza, indice di posizione bentonica BPI (Benthic Position Index) e robustezza.

L'area totale di fondale marino modificata dalle azioni umane nei canali di marea vale 7.8 km² (Figura 16). Le azioni che più hanno alterato la naturale morfologia dei fondali sono state il dragaggio (3.72 km²), la costruzione di barriere rocciose per le strutture nelle bocche di porto (1.67 km²), dalle scanalature prodotte dalle chiglie (1.06 km²), dagli scavi per la costruzione di strutture (0.8 km²), dalla rete di cavi e tubature (0.14 km²), dagli alloggiamenti per la costruzione delle barriere MOSE (0.09 km²).

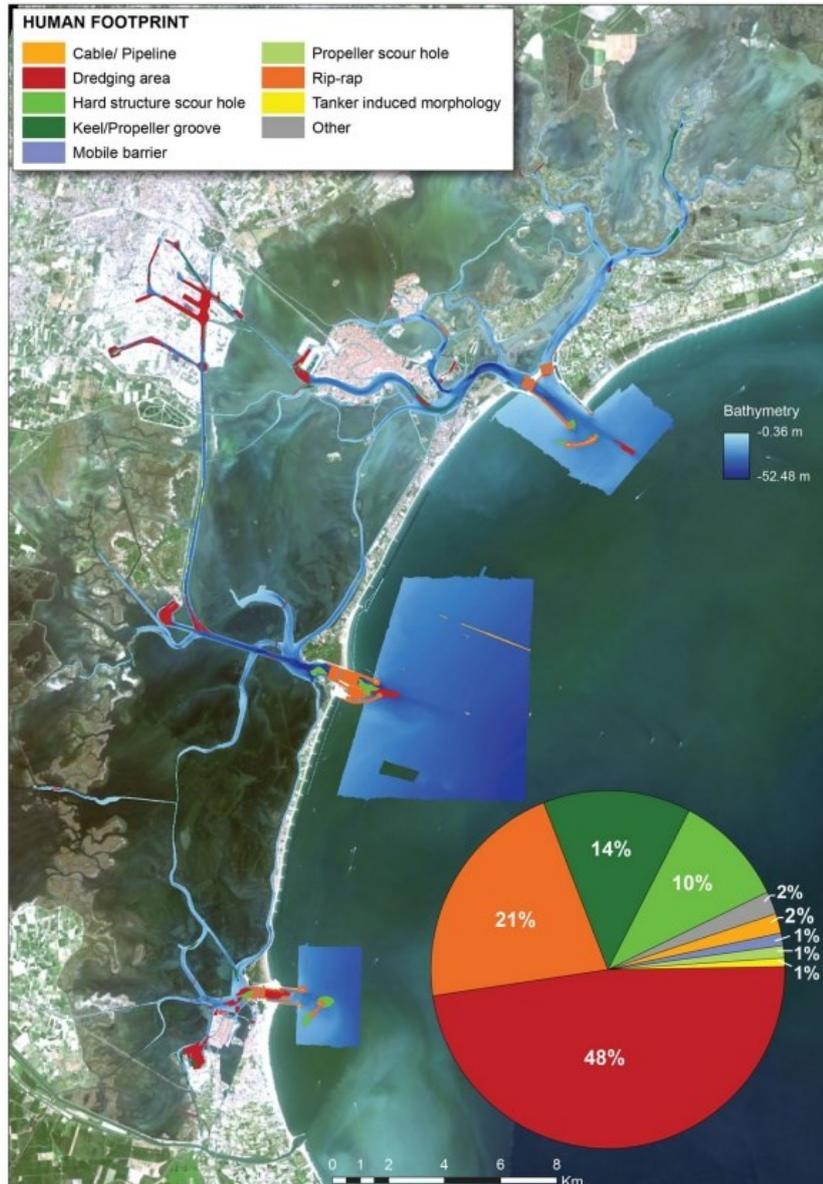


Figura 16: Mappa delle modifiche antropogeniche dell'ambiente lagunare e diagramma a torta che ne definisce le estensioni relative percentuali.

- Aree di dragaggio

Il dragaggio consiste nella rimozione di sedimenti e detriti dal fondale marino per garantire una profondità idonea alla navigazione e assicurare un passaggio sicuro nei canali alle barche. La pulizia del fondale viene attuata dalla draga, ovvero un impianto galleggiante dotato di braccio escavatore che estrae il materiale dal fondale.

Le aree di dragaggio nella Laguna di Venezia si concentrano sui canali più navigati e il porto del Tronchetto, ma molte di esse potrebbero non essere state rilevate a causa delle correnti di marea che avrebbero ristabilito le condizioni morfologiche naturali sul fondale nei luoghi di dragaggio più antichi. Gli impatti ambientali del dragaggio sono attribuiti alla rimozione di substrato e di comunità bentoniche sul fondo marino, con conseguente

aumento della torbidità dell'acqua per la sospensione e deposizione del materiale mosso. Nei casi più gravi il dragaggio aumenta la profondità dei canali, influenzando nell'intensità dei flussi d'acqua che scorrono nei canali di marea e condizionando quindi il trasporto dei sedimenti, il gradiente di salinità e le dinamiche di marea.

- Barriere rocciose subacquee posizionate dall'uomo (Rip-rap)

Utilizzate per proteggere la costa dall'erosione, per creare barriere e rafforzare i pontili, le costruzioni di rip-rap possono essere di rocce o pezzi di cemento sovrapposti in modo disordinato. I dati ricavati dall'MBES evidenziano la presenza di rip-rap in corrispondenza delle bocche di porto. Nel progetto MOSE le barriere di rip-rap sono state usate per costruire frangiflutti nelle bocche, realizzare l'isola artificiale nella Lido Inlet e rafforzare il fondale marino in prossimità degli alloggiamenti delle barriere mobili per impedirne il riempimento da parte di sedimenti.

Le costruzioni di rip-rap aumentano l'eterogeneità degli habitat marini poiché costituiscono un substrato rigido in zone dove il fondale sarebbe morbido. Il cambiamento di habitat favorisce l'insediamento di specie non autoctone, a svantaggio della biodiversità originaria della laguna.

- Solchi prodotti dalle chiglie

Quando delle navi attraversano tratti di canali nei quali la profondità è maggiore o uguale al pescaggio delle navi stesse, il fondale viene eroso e vi rimangono delle scanalature. Questi solchi possono avere una larghezza di pochi metri, ma possono raggiungere centinaia di metri di lunghezza. I solchi più lievi si trovano negli incroci tra canali, quando una barca si dirige verso un canale poco profondo. Allo scopo di circoscrivere la navigazione in zone sicure a Venezia sono state installate le "bricole" (costituite da tre pali di legno uniti), ma spesso le barche piccole non rispettano questo limite. Le barche di piccole dimensioni sono anche più difficili da controllare perché non hanno il Sistema di Identificazione Automatica (AIS) ed è quindi difficile associare i loro movimenti con le variazioni di batimetria.

- Fori di raschiatura del substrato rigido

Il fenomeno di *scouring*, ovvero raschiatura del fondale, avviene in corrispondenza di strutture piantate sul fondale di un canale (Figura 17). L'elemento antropico introdotto provoca delle deviazioni della corrente che colpendo il fondale, lo erodono.

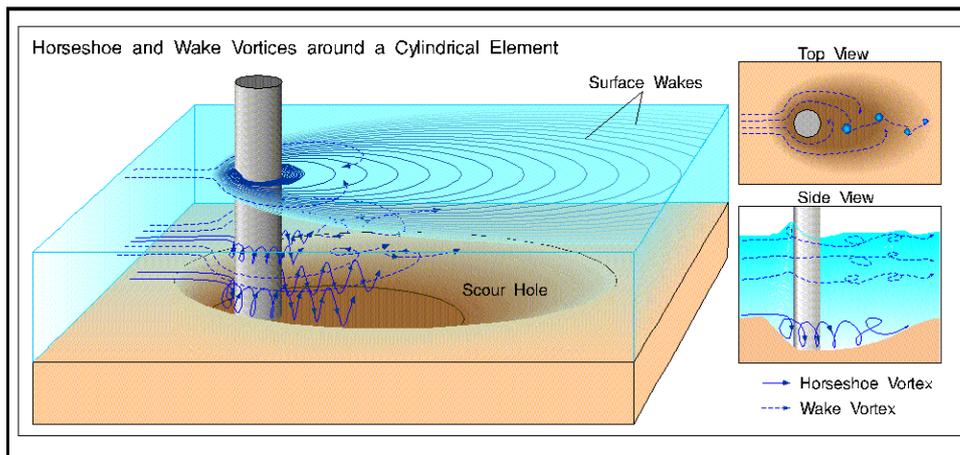


Figura 17: Rappresentazione del fenomeno di erosione del fondale in corrispondenza di strutture antropogeniche per deviazione della corrente.

Nella Laguna di Venezia, zone di raschiatura del fondale si sono formate agli estremi dei frangiflutti costruiti davanti a ogni bocca di porto. La batimetria ricavata dall'MBES ha permesso di individuare delle gravi erosioni del fondale all'esterno dell'insenatura di Chioggia (Figura 18), dove la velocità delle onde è dell'ordine di 1 m/s e il volume di substrato eroso in 8 anni è di circa 430000 m³.



Figura 18: Esempio di restituzione ombreggiata a colori di batimetria ad alta risoluzione (0.2 m). Fondale del Porto di Chioggia sono evidenti segni di dragaggio, rip-rap, zone di alloggiamento del MOSE e solchi nel fondale in corrispondenza delle estremità dei frangi acque.

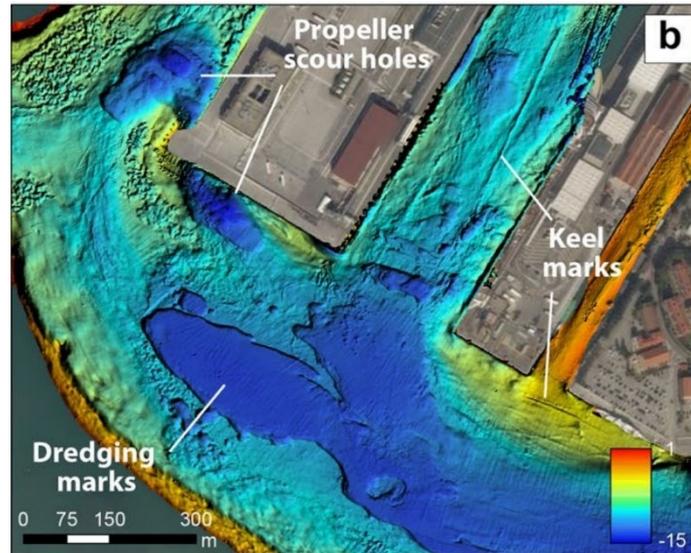


Figura 19: Esempio di restituzione ombreggiata a colori di batimetria ad alta risoluzione (0.2 m). Porto delle navi da crociera nel Tronchetto, si possono notare segni di dragaggio, scanalature provocate da chiglie.

La mappatura effettuata dall'MBES ad alta risoluzione ha permesso di stimare la densità di rifiuti distribuiti sui fondali dei canali di marea della Laguna di Venezia in termini di elementi per km². La densità media per l'intera area di indagine è stata trovata pari a 7.5 elementi/ km² con valori massimi in corrispondenza delle città di Venezia e Chioggia, in quanto la presenza di rifiuti in un luogo è legata alla tipologia e alla quantità di attività economiche svolte in quell'area. Nel Canal Grande è stata trovata la quantità maggiore di rifiuti sul fondale per una densità di 1161 elementi/ km² (Figura 20), ma nell'osservazione di questo risultato si deve tenere conto che il Canal Grande non è mai stato dragato, per cui il suo fondale è ricoperto da strati di rifiuti risalenti anche alla fondazione di Venezia.

La presenza dei rifiuti sul fondale marino della laguna potrebbe alterare gli habitat della flora e fauna autoctone costituendo un nuovo substrato (come nel caso delle costruzioni rip-rap) che danneggia gli insediamenti preesistenti fisicamente e chimicamente.

Per la visualizzazione sulla mappa, la quantità media di spazzatura depositata sul fondale marino è stata calcolata come numero degli elementi di origine antropica rappresentati con un punto identificati come macro-rifiuti nell'area di indagine. La presenza dei rifiuti nel mare è stata valutata sia in termini di frequenza delle tipologie, sia come densità (numero di elementi per 100 m²). Lo strumento di ArcGIS Kernel Density ha permesso di caratterizzare le zone di accumulo dei rifiuti, calcolando le densità dei punti (che identificavano elementi legati all'azione antropica) attorno a ciascuna cella raster di output.

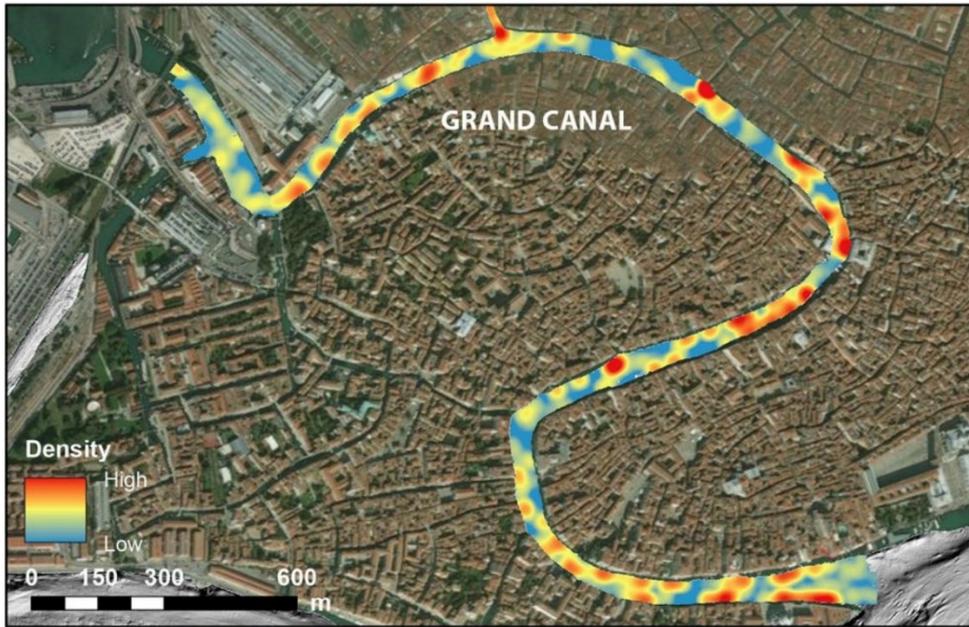


Figura 20: Densità di rifiuti depositati sul fondale del Canal Grande

4.3 Geomorfologia degli habitat bentonici nel porto di Chioggia

Il Porto di Chioggia ha subito nei secoli numerosi interventi umani, tra cui, nel 1912 la costruzione del molo e nel 2003 l'inizio dei lavori per l'installazione del MOSE. Per l'intensità delle attività antropiche in quest'area è stato ritenuto opportuno uno studio degli habitat bentonici e delle modifiche da essi subite a causa dell'uomo. La ricerca si basa sui dati batimetrici e di retrodiffusione ricavati dalla mappatura della Laguna di Venezia effettuata nel 2013 con l'MBES da parte dei ricercatori del CNR.

I dati di retrodiffusione sono stati rielaborati su ArcGIS con il metodo dell'ottimizzazione dei raggruppamenti di Jenks per la classificazione dei file raster. Sono state ottenute quattro classi di retrodiffusione (Figura 21):

Intensità di retrodiffusione	Segnale in [dB]	Classe di sedimenti
Molto bassa	< -28.07 dB	Sabbia mista a fango e ghiaia
Medio-bassa	-28.07/-24.63 dB	Sabbia
Medio-alta	-24.63/-20.90 dB	Sabbia leggermente ghiaiosa
Molto alta	>-20.90 dB	Sabbia e ghiaia

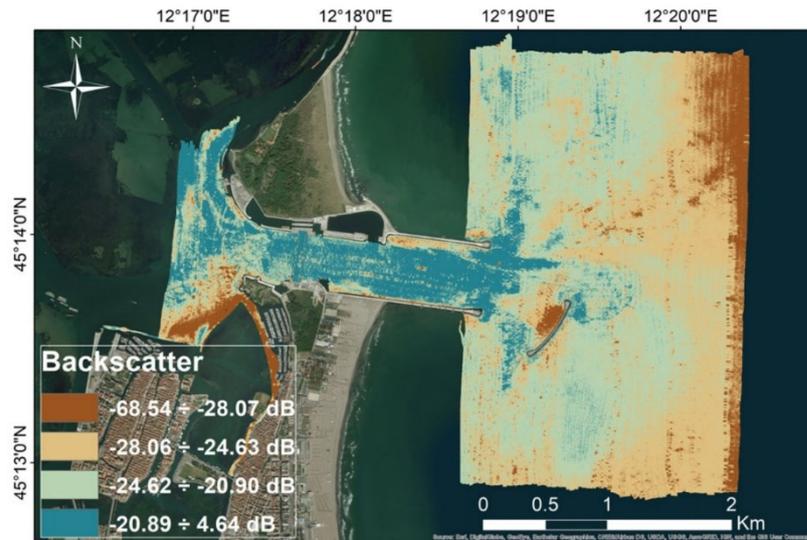


Figura 21: Classificazione dei dati di retrodiffusione in quattro categorie con l’algoritmo di Jenks

La classificazione degli habitat è strettamente legata alla composizione dei sedimenti, dai quali dipende il segnale di retrodiffusione, ma non è sufficiente. Per classificare gli habitat è stata quindi considerata anche conformazione morfologica del Porto di Chioggia, ricavata dallo studio batimetrico dell’area (Figura 22).

La batimetria nel Porto di Chioggia varia da -30 m a -1 m, con le zone meno profonde localizzate nella laguna, mentre i punti più profondi si trovano in un ampio buco di erosione che si trova all’inizio del canale in uscita verso il mare. Le caratteristiche del fondale sono state suddivise in tre categorie: di erosione, di deposito, antropogeniche e biogeniche.

- Caratteristiche di erosione

I buchi di erosione sono prodotti dalla corrente turbolenta generata da strutture subacquee, che colpisce la superficie del fondale e smuove i sedimenti. Per questo motivo i buchi nel Porto di Chioggia si trovano in corrispondenza dei frangi acque e dell’entrata dell’acqua nel canale diretto verso il mare. L’erosione si interrompe nella zona di fondale rafforzato per il funzionamento delle barriere del MOSE. L’area colpita da questo fenomeno occupa il 3.02% dell’area in esame.

- Caratteristiche di deposizione

Le dune occupano il 4% dell’area studiata. Le creste sono orientate verso la direzione principale della corrente, quindi verso il mare. Le dune più grandi, con altezza di 2.5 m e lunghezza di 110 m, si trovano nell’entrata del porto verso il mare, a una profondità di 10 m. A nord del più profondo buco di erosione si notano due grandi dune (lunghezza di 100 m e altezza di 2 m) disposte a forma di U. Il campionamento nei pressi di queste dune ne ha rivelato la composizione di ghiaia sabbiosa con frammenti di conchiglie.

- Caratteristiche antropogeniche

Le strutture di rip-rap, volte al rinforzo di costruzioni subacquee, sono state mappate attorno al frangi acque e vicino ai moli e occupano il 5.39% della superficie studiata. Il campionamento e le immagini scattate sottacqua mostrano una copertura di fango sabbioso, alghe e incrostazioni di organismi.

Tra le caratteristiche antropogeniche si individuano anche i solchi di dragaggio, che occupano l'1.14% dell'area e procurano al fondale una profondità aggiunta di 2-2.5 m.

- Caratteristiche biogeniche

Alle profondità di 2-2.5 m, nella punta sud-occidentale della laguna, si trovano delle macchie circolari/ellissoidali di alghe, che occupano lo 0.14% dell'area studiata. Il substrato su cui esse crescono risulta essere fangoso.

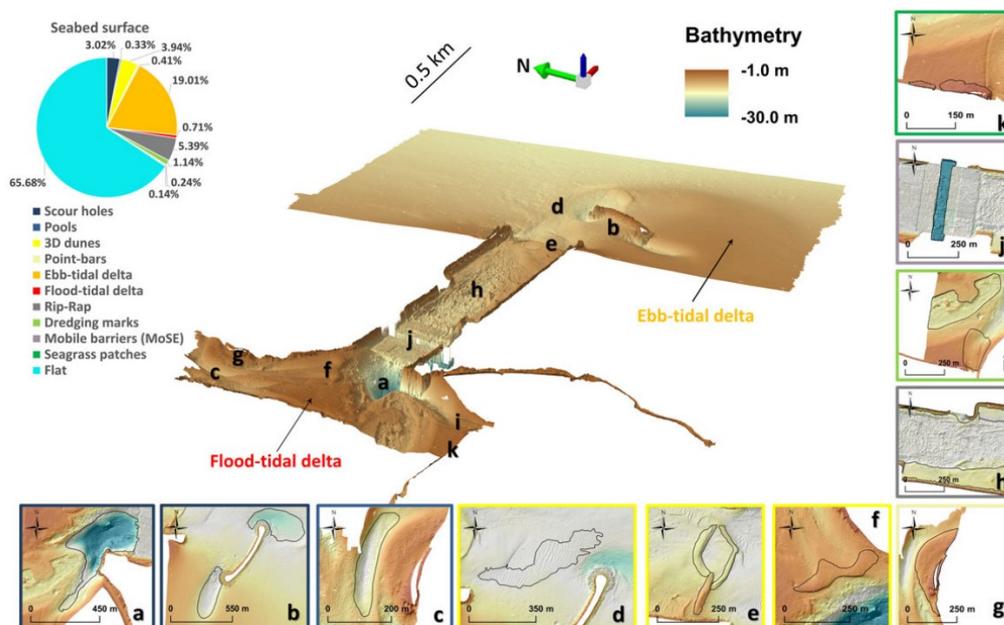


Figura 22: Rappresentazione tridimensionale del fondale del Porto di Chioggia con le caratteristiche identificate: a) e b) fori di erosione in corrispondenza di strutture; c) pozza; d) zona di piccole dune; e) e f) grandi dune; g) accumulo di sedimenti nel canale di marea; h) rip-rap; i) segni di dragaggio; j) trincea del MOSE; k) macchie di alghe. Il grafico a torta mette in luce le percentuali dell'area occupata da ogni classe.

Dalla conoscenza della morfologia dei fondali del Porto di Chioggia, e della composizione dei sedimenti che li ricoprono, è stato possibile classificare gli habitat bentonici in sette categorie (Figura 23).

I. Detriti grossolani costituiti da conchiglie

Questo habitat è caratterizzato da uno spesso strato di detriti biogenici che ricopre il fondale, mascherando i sedimenti inferiori. Si tratta di frammenti di conchiglie che hanno dimensioni comparabili a una ghiaia sabbiosa, con una componente di fango nulla. Si nota che questa classe si distribuisce lungo il canale e nella parte più settentrionale della laguna, accumulandosi nelle zone di rip-rap e dentro a buchi di erosione o pozze. Il tipo di copertura di detriti grossolani derivati da gusci è associato a valori elevati di retrodiffusione per l'alta riflessività delle conchiglie.

II. Sabbia scarsa di detriti derivanti da conchiglie

Questo habitat è il più diffuso nell'area esaminata, in particolare si trova in corrispondenza delle dune, buchi di erosione e nelle pozze. Le alte percentuali di detriti bioclastici e il basso contenuto di fango conferiscono a questo tipo di copertura valori di retrodiffusione medio-alti.

III. Sabbia

L'habitat sabbioso si estende per lo più nel fondale marino. Le immagini subacquee mostrano una copertura omogenea di sabbia semplice disposta in piccole increspature (alte pochi centimetri). L'epifauna e la copertura vegetale sono scarse, i detriti biogenici sono mancanti. La firma di retrodiffusione di questo habitat è medio-bassa.

IV. Fango lagunare

Questa classe include tutti i fanghi del bacino lagunare e la sua profondità tipica è minore ai 4 m. Non contengono conchiglie, e sono molto densi. Il segnale di retrodiffusione è basso.

V. Sedimenti fangosi

I sedimenti fangosi coprono il fondale marino parallelamente alla linea di costa a partire da una profondità di 14 m. Il substrato è caratterizzato da una bassa percentuale di conchiglie, è frequente trovare una pellicola di diatomee e in generale il numero di specie osservate è maggiore rispetto alle classi precedenti. I sedimenti sottili provocano un basso valore di retrodiffusione.

VI. Fondale roccioso artificiale

La distribuzione di questa classe corrisponde alla copertura di strutture rip-rap, quindi attorno ai moli, ai frangi acque e nella parte centrale del canale di entrata. Il fondale roccioso artificiale è

generalmente coperto da uno spesso strato di bio-concrezione e macro-alghe. La risposta di retrodiffusione non è uniforme per la presenza alternata di rocce (valori alti), macchie di fango (valori bassi) e copertura biologica.

VII. Distese di alghe

Questo habitat si trova all'interno della laguna a profondità inferiori di 3 m. Le distese di alghe svolgono preziose funzioni ecologiche come assorbimento di nutrienti, ossigenazione, stabilizzazione dei sedimenti e protezione dalle erosioni, inoltre alimentano e riparano un complesso una comunità complessa di organismi.

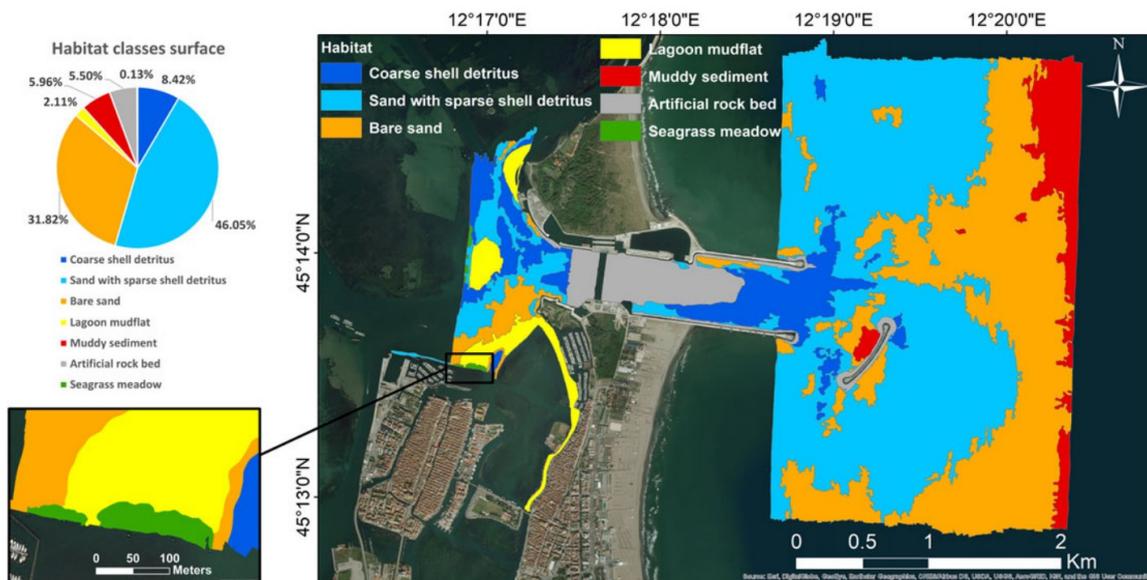


Figura 23: Habitat bentonici nel fondale del Porto di Chioggia e rappresentazione dell'area percentuale occupata da ogni classe

L'analisi della batimetria ha reso possibile l'identificazione di 541 oggetti antropogenici posati sul fondale volontariamente o non. Il gruppo di oggetti è stato suddiviso in sette categorie. Nella zona lagunare, di profondità minore, è stato più facile rilevare la presenza di oggetti, viceversa nel fondale marino, più profondo ha mostrato meno elementi (Figura 24).

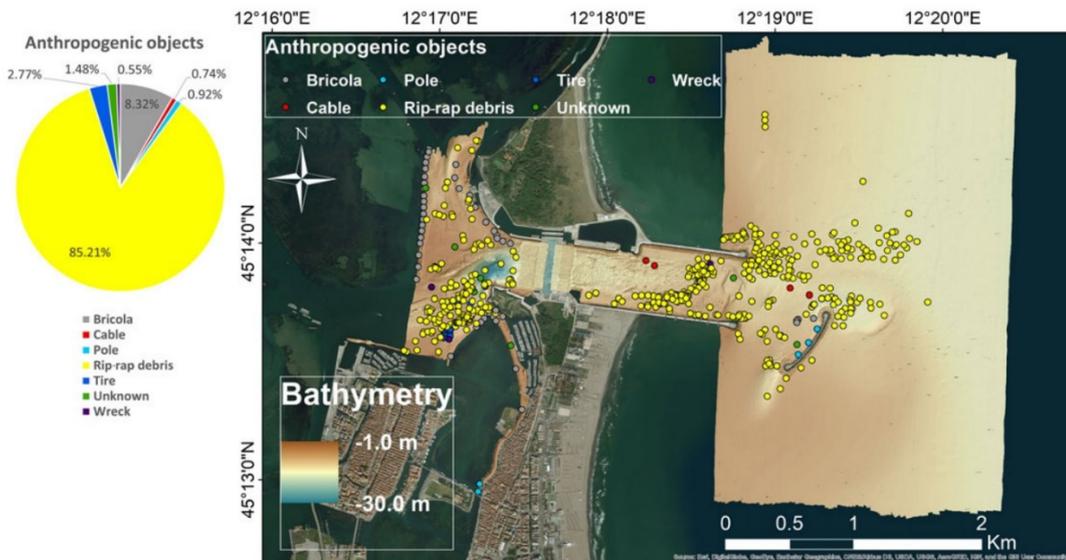


Figura 24: Oggetti antropogenici identificati nel fondale del Porto di Chioggia con indicazioni sulle percentuali di oggetti trovati per ogni categoria

Le mutazioni del fondale della zona del Porto di Chioggia continuano nel tempo a causa degli interventi umani. Confrontando i dati batimetrici raccolti nel 2013 e quelli della precedente mappatura effettuata nel 2002, sono stati osservati tre processi in atto:

- Il canale principale di entrata ha subito un'erosione estrema provocata dall'aumento del flusso, e in certi punti l'aumento di profondità era legato al dragaggio e rinforzo del fondale per la costruzione del MOSE.
- Forte deposizione di sedimenti, formazione di dune e fori di raschiatura in corrispondenza del delta del flusso di marea
- Ampi fori di raschiatura alle estremità dei frangi acque e deposito di sedimenti fini nella zona protetta da questi.

Questi processi aumentano la complessità spaziale della superficie disponibile alla colonizzazione delle comunità bentoniche, fornendo loro rifugio e nutrimento. Quando il substrato è sostituito con materiali artificiali anche gli organismi che vi si insediano cambiano, e questo giustifica l'arrivo di specie non indigene, che rendono la Laguna di Venezia un hotspot di specie non autoctone.

4.4 Ritrovamento di un'antica strada romana

Lo studio delle Mappe del Terreno Digitali (DTM), nell'ambito del progetto "Ritmare", ha trovato applicazione in una ricerca multidisciplinare volta a mostrare la presenza di un esteso tratto di strada nella zona poco profonda della Laguna di Venezia, come prova di uno sviluppo insediativo e della dinamicità economica nell'epoca romana, rimarcando la capacità dei romani di adattare le proprie attività ad ambienti complessi. Lo studio ha anche l'importante scopo di evidenziare l'urgenza della scoperta, documentazione e conservazione del patrimonio archeologico in un paesaggio costiero sommerso, minacciato dai cambiamenti indotti dalle attività umane.

Nel Canale Treporti, nella Laguna di Venezia, le ricerche archeologiche iniziarono nel 1978. Lo scopo delle prime indagini era quello di trovare prove della presenza di elementi d'interesse archeologico, circoscriverne la zona e caratterizzarne i materiali. Nel 1985 dei sommozzatori non solo trovarono le coordinate e la profondità del sito, ma estrassero quattro carote di lunghezza compresa tra i 0.5 e 0.9 m di sedimenti, in seguito analizzati in laboratorio. Queste prime indagini hanno portato alla scoperta di una struttura lunga circa 70 m e larga tra i 5 e 7 m, alla profondità variabile di 4 e 6 m. Le caratteristiche morfologiche di questa struttura, la presenza di elementi litici e la loro disposizione indicavano che l'oggetto in esame era una strada. La lavorazione delle pietre, con la faccia superiore liscia e quella inferiore ovoidale richiamava la forma dei basoli romani, ovvero le pietre utilizzate per rivestire le superfici delle strade antiche. A confermare l'ipotesi del ritrovamento di un'antica strada romana, nel Canale Treporti furono scoperte, nello stesso decennio, anfore e vasi d'argilla, il più antico dei quali è stato datato al I secolo a.C. .

I dati ricavati dalla mappatura con l'MBES del Canale Treporti sono stati studiati sotto la luce delle evidenze archeologiche. La mappa batimetrica dimostra la presenza di una dorsale sommersa diretta da sud-ovest a nord-est (Figura 25). Lungo la dorsale sono stati rivvenuti 12 elementi antropogenici allineati per una distanza di 1140 m. La lunghezza delle strutture varia tra i 5 e 38 m, mentre la loro larghezza è compresa tra 2 e 10 m. A una profondità superiore, tra gli 8.7 e 9.3 m, è stato rilevato un altro gruppo di elementi archeologici, nominati a, b e c. La struttura a è quella che occupa la superficie maggiore, di 700 m².

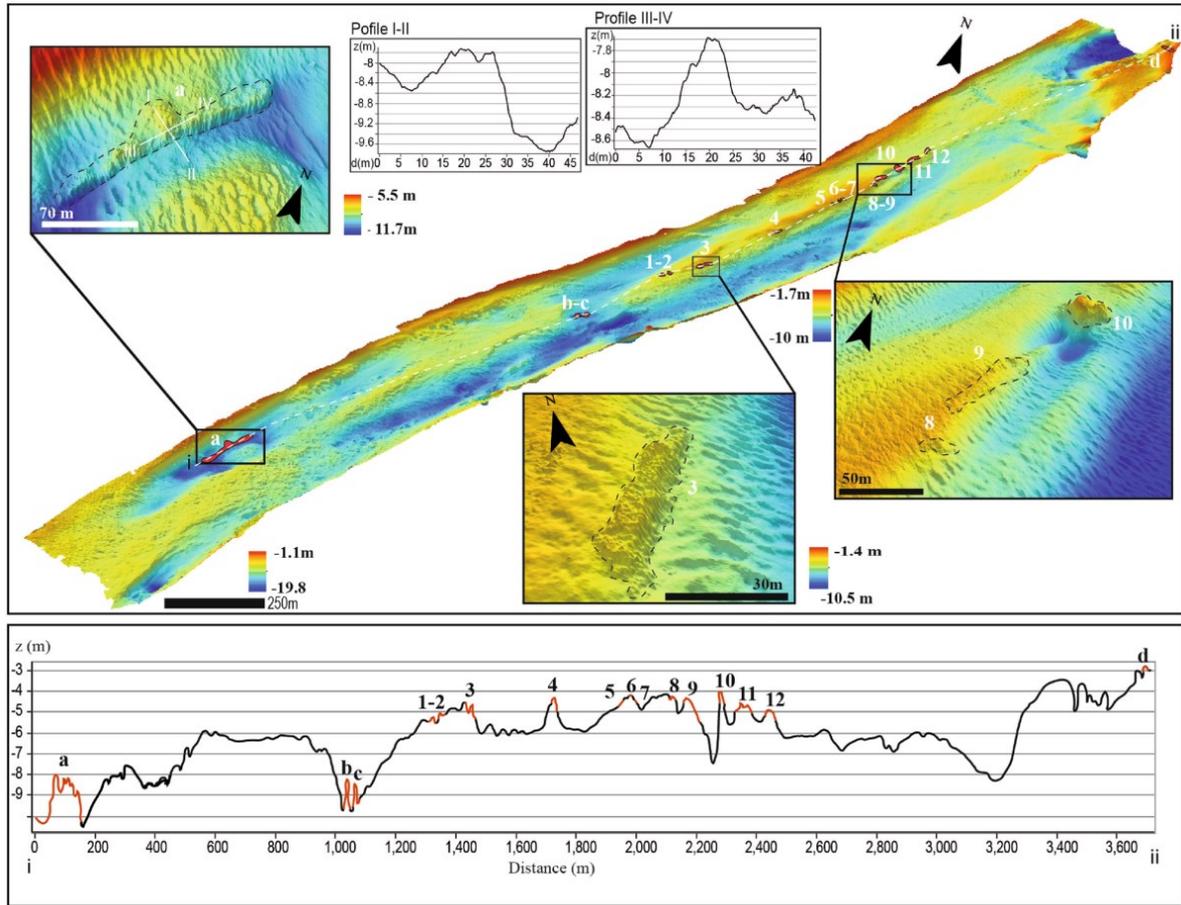


Figura 25: Batimetria ad alta risoluzione del Canale Treporti. I numeri 1- 12 indicano gli elementi archeologici allineati, mentre le lettere a,b,c rappresentano le strutture a profondità maggiore e di maggiore ampiezza. La lettera d segna la posizione di un'altra struttura a profondità inferiore a tutte le precedenti.

L'ipotesi della presenza di una strada romana nella Laguna di Venezia è stata supportata per la prima volta dagli archeologi Ernesto Canal e Vladimiro Dorigo, i quali tra il 1980 e il 2000 cercarono di dimostrare l'esistenza di insediamenti romani e pre-romani nella laguna.

L'ipotesi è stata confermata dal verificato allineamento dei reperti nel Canale Treporti, che viene interpretato come l'insieme di resti di una strada antica. La strada romana, che divideva il mare Adriatico dalla Laguna di Venezia, è stata ricostruita digitalmente facendo corrispondere i reperti archeologici trovati con il tracciato ipotizzato. Forti mutamenti geomorfologici hanno però rimodellato la laguna e si può solo immaginare l'estensione originaria della strada, ma ciò è sufficiente per delineare l'antica rete di viabilità nell'area marittima del Veneto, che offriva passaggi in tutto il territorio.

5 Conclusioni

I sistemi di transizione costieri sono tra i più produttivi e preziosi del pianeta. I moti di marea governano gli scambi d'acqua, di sedimenti, nutrienti e organismi con il mare aperto attraverso una fitta rete di canali. La metà della popolazione mondiale è insediata in zone costiere, quindi molto spesso questi sistemi sono caratterizzati da intensa urbanizzazione. Le attività umane che ne conseguono aumentano e accelerano i cambiamenti morfologici a cui sono soggetti i sistemi di transizione costieri, portando a inondazioni più frequenti e perdite di habitat naturali, fenomeni a loro volta favoriti dal cambiamento climatico. Nonostante l'importanza che i canali di marea assumono dal punto di vista delle dinamiche costiere, a lungo non sono stati elemento di particolare interesse. Grazie all'avanzamento delle tecnologie e alla creazione di dispositivi di misura precisi e adatti alle condizioni di rilevamento lagunari, come l'ecoscandaglio multi-fascio, è finalmente possibile delineare mappe che descrivono le caratteristiche dei fondali, come batimetria, copertura di sedimenti e la loro composizione e presenza di strutture di interesse storico, artistico o archeologico. Conoscere i fondali significa poter comprendere le minacce che potrebbero danneggiare le attività umane e compromettere lo sviluppo dei sistemi costieri antropici, ma anche individuare gli habitat naturali per preservarli e proteggerli dai rischi antropogenici. Lo studio dei canali di marea della Laguna di Venezia, effettuato nell'ambito del progetto "RITMARE" del CNR nel 2013, è stato volto alla scoperta delle "memorie del passato" con lo scopo di esaltare il valore della Laguna di Venezia con ritrovamenti di rilievo storico, come la strada romana, ma anche evidenziare gli impatti delle azioni umane sugli habitat lagunari e sulle naturali dinamiche di marea. Il dataset ottenuto è stato prezioso per due motivi: ha permesso di descrivere la morfologia dei fondali con un livello di dettaglio senza precedenti; ed è stato acquisito prima della costruzione delle barriere del MOSE, rappresentando un punto di riferimento per la valutazione degli impatti dei futuri interventi ingegneristici nella laguna.

6 Bibliografia

Articoli e pubblicazioni

- Fogarin, S., Madricardo, F., Zaggia, L., Sigovini, M., Montereale-Gavazzi, G., Kruss, A., ... & Trincardi, F., *Tidal inlets in the Anthropocene: Geomorphology and benthic habitats of the Chioggia inlet, Venice Lagoon (Italy)*. *Earth Surface Process and Landforms* (2018)
- Gatto, P., & Carbognin, L., *The Lagoon of Venice: natural environmental trend and man-induced modification*. *Hydrological Sciences Journal* (1981)
- Madricardo, F., Foglini, F., Kruss, A., Ferrarin, C., Pizzeghello, N. M., Murri, C., ... & Trincardi, F., *High resolution multibeam and hydrodynamic datasets of tidal channels and inlets of the Venice Lagoon*. *Scientific Data* (2017)
- Madricardo, F., Foglini, F., Campiani, E., Grande, V., Catenacci, E., Petrizzo, A., ... & Trincardi, F., *Assessing the human footprint on the sea-floor of coastal systems: the case of the Venice Lagoon, Italy*. *Scientific Reports* (2019)
- Madricardo, F., Bassani, M., D'Acunto, G., Calandriello, A., & Foglini, F., *New evidence of a Roman road in the Venice Lagoon (Italy) based on high resolution seafloor reconstruction*. *Scientific Reports* (2021)
- Gavazzi, G. M., Madricardo, F., Janowski, L., Kruss, A., Blondel, P., Sigovini, M., & Foglini, F., *Evaluation of seabed mapping methods for fine-scale classification of extremely shallow benthic habitats—application to the Venice Lagoon, Italy*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* (2015)

Siti web

- [1] <https://www3.mbari.org/data/mbsystem/sonarfunction/SeaBeamMultibeamTheoryOperation.pdf>

[2] <https://www.kongsberg.com/maritime/products/ocean-science/mapping-systems/multibeam-echo-sounders/em-2040-multibeam-echosounder-max.-6000-m/#technicalInformation>

[3] <https://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/09bermuda/background/multibeam/multibeam.html>

[4] <https://www.manualslib.com/manual/1205075/Kongsberg-Seapath-320.html?page=19#manual>

[5] <https://www.manualslib.com/manual/1205075/Kongsberg-Seapath-320.html?page=19#manual>

[6] <http://www.teledynecaris.com/en/products/hips-and-sips/>

[7] <https://www.cmcc.it/it/models/shyfem-shallow-water-hydrodynamic-finite-element-model>

[8] <https://www.valeport.co.uk/products/minisvs-sound-velocity-sensor/>