



---

**Venezia2021**

**Programma di ricerca scientifica  
per una laguna “regolata”**

---

**Linea 1.1**

***Scambi laguna-mare di acqua, materiale  
particolato e organismi e processi erosivi***

---

Rapporto Finale

*Periodo 01/11/2018 - 30/06/2022*

---

**L. Zaggia (CNR-IGG)**

---

7/10/2022

A handwritten signature in black ink, appearing to read "L. Zaggia".

## EXECUTIVE SUMMARY

### 1. Principali risultati emersi dalla Linea riferiti agli obiettivi iniziali

Nell'ambito delle attività previste dalla Linea di ricerca 1.1 è stato realizzato un sistema osservativo che integra i dati provenienti dalle reti di monitoraggio esistenti e realizzate nell'ambito di questo progetto, misure in situ e osservazioni dati satellite. Sono state installate 4 stazioni torbidimetriche alle bocche di porto in corrispondenza di ciascuna delle sezioni MOSE per il monitoraggio dell'evoluzione degli scambi di particellato fra laguna e mare e la caratterizzazione del trasporto in sospensione. Le stazioni proseguiranno l'acquisizione anche successivamente al termine del progetto Venezia 2021.

È stata sperimentata la procedura per il monitoraggio della portata a partire dai dati delle stazioni correntometriche CVN-Provveditorato alle OO.PP. localizzate presso le sezioni MOSE alle tre bocche di porto ed è disponibile la serie temporale delle portate completa per il periodo 2019-2022. Inoltre, i dati di torbidità, acquisiti in situ e in continuo, sono stati utilizzati per testare la metodologia di stima del flusso solido a partire dal backscatter acustico registrato dagli strumenti di queste stesse stazioni. Previa l'adozione di un'adeguata infrastruttura e di un protocollo operativo per la gestione e la trasmissione dei dati delle stazioni correntometriche CVN, sarà possibile consolidare la procedura e acquisire serie temporali del flusso solido alle bocche di grande utilità per le valutazioni sulle tendenze in atto a MOSE operativo. La sperimentazione condotta nell'ambito del progetto Venezia2021 ha prodotto le informazioni utili alla definizione di questo protocollo (cfr. sezione 3).

La validazione delle mappe di torbidità ottenute dalle immagini da satellite Landsat 8 e Sentinel-2 ha permesso di stimare in maniera sinottica i pattern del trasporto di sedimenti in sospensione lungo la costa, nelle bocche di porto e in laguna in un ampio spettro di condizioni meteomarine e idrodinamiche. L'analisi delle mappe di torbidità ha fornito nuove informazioni nel quadro conoscitivo dei processi di trasporto di sedimenti, quali ad esempio i flussi di particellato da mare verso laguna e l'interazione fra i getti uscenti dalle bocche di porto e la corrente litoranea, dati di sicura utilità anche per le valutazioni modellistiche sulla circolazione e morfodinamica lagunare.

I rilievi morfobatimetrici ad alta risoluzione effettuati nell'ambito del progetto Venezia2021 hanno consentito di indagare le principali variazioni morfologiche intervenute nel corso degli anni nei fondali delle bocche di porto. Nella bocca di porto di Lido negli ultimi anni si è riscontrata una condizione di stabilità del fondale, con le variazioni più significative rilevate rispetto al 2011. Rispetto al 2013 l'area monitorata in bocca di porto di Malamocco non ha subito modificazioni significative. Nella bocca di porto di Chioggia nel corso degli anni è prevalso un processo di sedimentazione nella maggior parte dell'area monitorata. I monitoraggi effettuati restituiscono inoltre una fotografia aggiornata dello stato morfologico delle bocche di porto.

I processi erosivi nei canali di grande navigazione sono stati investigati nel dettaglio a partire dal fenomeno fisico fino alle valutazioni sui volumi erosi combinando dati batimetrici ad alta risoluzione e aerofotogrammetria da drone, ottenendo informazioni importanti per la stima degli impatti del traffico navale sulla stabilità delle aree a margine del canale navigabile. Le indagini hanno rivelato che si tratta un'area altamente sensibile allo stress del traffico con approfondimenti delle piane subtidali adiacenti al canale e un forte arretramento dei margini sommersi e delle aree emerse adiacenti (casse di colmata). Le informazioni del progetto sono state anche utilizzate per le valutazioni dell'Autorità di Sistema Portuale del Mare Adriatico Settentrionale, porto di Venezia, per la valutazione degli effetti di eventuali transiti di navi passeggeri nel canale Malamocco-Marghera (progetto Channeling – The Green Deal for Venice<sup>1</sup>).

---

<sup>1</sup> <https://www.port.venice.it/it/channeling-the-green-deal-for-venice.html>

L'acustica attiva è una interessante tecnica di monitoraggio dei flussi di biomassa nel contesto di una "laguna regolata", in cui il MOSE sia totalmente operativo. L'attività effettuata dalla Linea 1.1 rappresenta un primo assessment di acustica attiva in laguna di Venezia per quanto riguarda il comparto nectonico. Il metodo permette di investigare aree lagunari e canali profondi, precedentemente mai campionati, ed è relativamente speditivo, sicuro (non vi sono operatori in acqua e/o subacquei) e "oggettivo" (strumentazione calibrata e "fishery independent"). Il metodo è applicabile anche in condizioni di traffico navale, di notte e con situazioni meteorologiche non favorevoli, stazza dell'imbarcazione permettendo. Si tratta di una metodologia ripetibile e quantitativa che permette quindi di ottenere una serie storica di dati, che possono anche essere messi in relazione a parametri chimico-fisici o morfologici del sito.

Il principale risultato dell'indagine sui metodi di identificazione di uova e larve è stato l'identificazione delle diverse specie di pesci e invertebrati presenti in laguna di Venezia a partire da campioni d'acqua, grazie all'analisi del cosiddetto "DNA ambientale". È stata messa a punto una metodologia innovativa che ha previsto l'estrazione del DNA presente in tracce nei campioni d'acqua, il sequenziamento massivo di frammenti di DNA informativi, unici e caratteristici per ogni possibile specie. Le analisi bioinformatiche di confronto delle sequenze campionate con un database di riferimento hanno permesso il riconoscimento delle specie in diversi siti della laguna di Venezia. I risultati ottenuti su pesci e invertebrati hanno permesso di caratterizzare la comunità biologica lagunare, di identificarne i cambiamenti nel tempo e nello spazio e, inoltre, di rilevare specie invasive. Questo approccio originale permette ora di estrarre preziose informazioni sulla biodiversità a partire da un campione tanto semplice da raccogliere come una bottiglia d'acqua.

Per quanto riguarda l'analisi genetica a livello di popolazione, il principale risultato è stato l'identificazione di differenze genetiche temporali a livello di popolazione in tutte le specie target analizzate (gò, *Zosterisessor ophiocephalus* e latterino, *Atherina boyeri*, per i pesci; granchio verde, *Carcinus aestuarii* e mitilo, *Mytilus galloprovincialis*, per gli invertebrati), caratterizzate da un ciclo vitale con uno stadio larvale a dispersione passiva, fortemente influenzato dagli scambi tra laguna e mare. I dati genetici raccolti indicano che i popolamenti delle singole specie differiscono geneticamente principalmente rispetto all'anno o alla stagione di prelievo. Questa informazione non era mai stata ottenuta per organismi della laguna di Venezia, e indica che i popolamenti di queste specie, che sembrerebbero di grandi dimensioni considerando l'abbondanza locale, sono invece piccoli dal punto di vista genetico e soggetti a variazioni locali, cambiamenti della diversità genetica e del livello di inbreeding nel tempo. Il risultato aggiunge un elemento di attenzione rispetto al potenziale effetto futuro di una riduzione degli scambi tra laguna e mare, che potrebbe determinare variazioni nel reclutamento o riduzione complessiva della dimensione delle popolazioni lagunari con effetti a livello di biodiversità intraspecifica. Grazie ad uno sforzo di campionamento ed analisi senza precedenti per la laguna di Venezia è stato ottenuto un dataset di riferimento per quanto riguarda la variabilità genetica delle quattro specie nella situazione antecedente alla piena operatività del sistema MOSE.

## 2. Tre risultati concreti divulgabili ai decisori politici/ pubblico generico

Le tre immagini riportate e commentate (Figura 1, Figura 2, Figura 3) evidenziano alcuni fra i risultati più significativi delle ricerche condotte nell'ambito della Linea di ricerca 1.1 "Scambi laguna-mare di acqua, materiale particolato e organismi e processi erosivi".

### 2.1 Scambi laguna-mare: pattern del trasporto in sospensione

Il sistema osservativo integrato sperimentato durante il progetto Venezia2021 ha delle notevoli potenzialità per lo studio delle interazioni fra il flusso di marea e il particellato nel sistema litorali-bocche di porto-laguna. Per ognuna delle scene in condizioni di cielo limpido riprese dai satelliti (Landsat-8, NASA e Sentinel-2, Copernicus) è possibile creare delle mappe di torbidità per una rappresentazione sinottica dei pattern del trasporto evidenziando processi a diverse scale spaziali. Negli esempi riportati in Figura 1 è rappresentata la distribuzione spaziale della torbidità in diverse condizioni meteomarine: vento intenso di bora (sinistra) e scirocco (centro), acqua alta e barriere del MOSE chiuse (destra). Nella mappa in condizioni di bora, ad

esempio, è evidente l'effetto del moto ondoso sulla movimentazione di sedimenti lungo i litorali a nord della bocca di porto di Lido e a sud della bocca di porto di Chioggia, e sulla risospensione nei bassifondi della laguna centrale fra il centro storico di Venezia e il canale Malamocco-Marghera. Risulta anche evidente l'apporto di materiale sospeso in ingresso da mare, dovuto alla marea crescente, verso il bacino nord della laguna, lungo il canale di Treporti e le sue diramazioni. A mare sono anche visibili i pennacchi di torbida generati durante la precedente fase di marea calante: si evidenzia la maggiore quantità di sedimenti uscenti dalla bocca di porto di Lido rispetto alle altre due bocche di porto. In condizioni di scirocco sono particolarmente interessanti l'enorme struttura visibile a nord della bocca di porto di Lido, la risospensione a sud dell'isola della Giudecca e nei bassi fondali dell'area di Campalto-Tessera e nel tratto di costa fra la foce del Brenta e il molo sud della bocca di porto di Chioggia. Nel caso della chiusura delle barriere mobili del sistema MOSE, le interazioni mare-laguna sono giocoforza interrotte, mentre la risospensione all'interno della laguna segue essenzialmente la dinamica legata all'azione del vento.

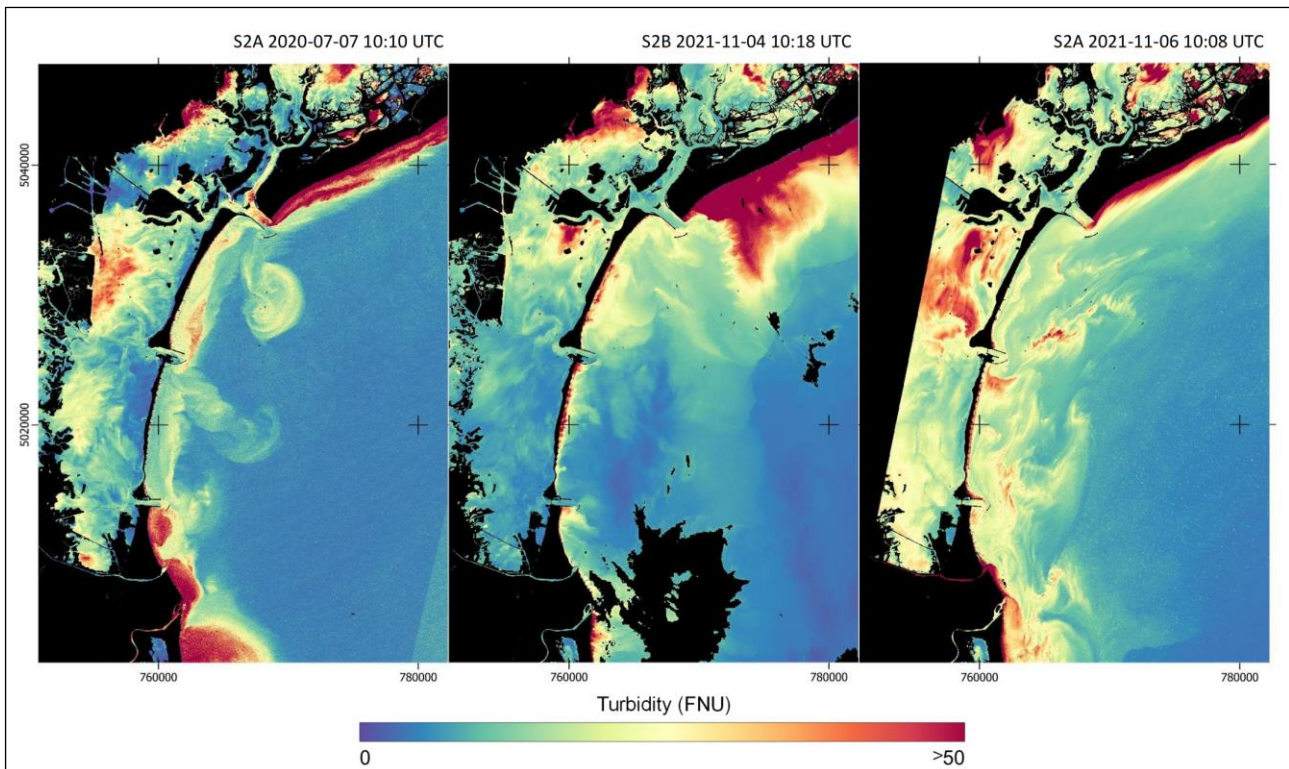


Figura 1. Mappe satellite della torbidità in condizioni di Bora (sinistra), Scirocco (centro), chiusura MOSE (sinistra) derivate dalle immagini del satellite Sentinel-2 (Copernicus). La distribuzione dei valori della torbidità evidenzia in maniera sinottica i pattern del trasporto dei sedimenti in sospensione nelle diverse condizioni.

## 2.2 Distribuzione spaziale degli organismi nelle bocche tidali

Il metodo applicato (acustica attiva) si è dimostrato efficace e potenzialmente utile come tecnica di monitoraggio nel contesto di una "laguna regolata", con il MOSE in esercizio. Si è trattato, infatti, della prima valutazione mediante acustica attiva in laguna di Venezia per quanto riguarda il comparto nectonico; il metodo permette di investigare aree lagunari e canali profondi, precedentemente mai campionati, è relativamente speditivo, sicuro (non vi sono operatori in acqua e/o subacquei) e "oggettivo" (strumentazione calibrata e "fishery independent"). Il metodo è applicabile anche in condizioni di traffico navale, di notte e in condizioni meteorologiche sfavorevoli.

Sulla base dei dati raccolti è stato possibile descrivere i principali pattern di distribuzione spaziale degli organismi nectonici all'interno di ciascuna bocca, evidenziando una relazione positiva tra densità e

caratteristiche del fondo (in particolare la profondità), ossia che gli organismi tendono a concentrarsi nelle zone con fondali più profondi (come riportato in figura).

Oltre alla distribuzione spaziale, il metodo ha consentito di effettuare, per la prima volta, una stima dello “standing crop”, ossia della biomassa presente all’interno dell’area esplorata. I dati ottenuti, indicano valori compresi tra 0.2 e 7 ton, di organismi nectonici, con una variabilità tra bocche e tra stagioni.

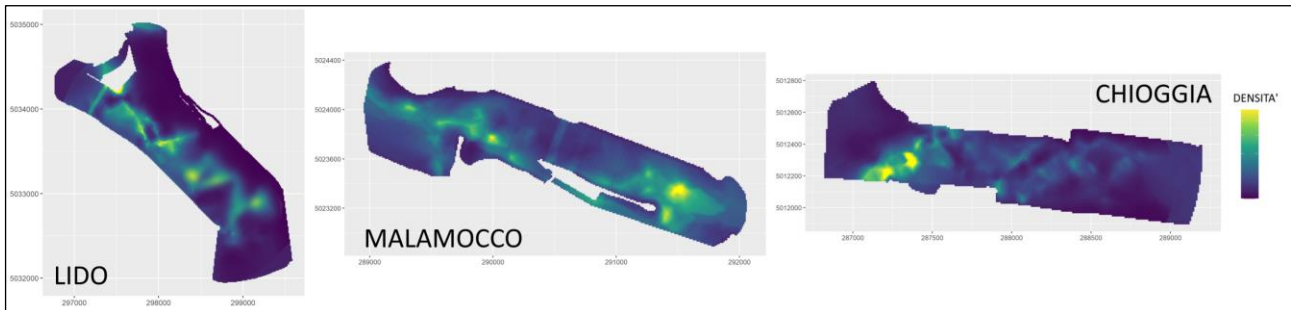


Figura 2. Pattern di distribuzione spaziale degli organismi nectonici nelle tre bocche di porto (Malamocco mostra, in genere, i valori più elevati).

## 2.2 Analisi del DNA ambientale - stime della biodiversità in laguna di Venezia

Sono state ottenute le prime stime della biodiversità presente in laguna di Venezia attraverso l’analisi del DNA presente in campioni d’acqua. I dati di DNA ambientale hanno permesso di rilevare la differente composizione della comunità ai siti di Chioggia e Palude della Rosa, come esemplificato per i pesci in Fig.3 (pannello in alto al centro), dove la rappresentazione grafica mediante multidimensional scaling rappresenta ogni campione d’acqua come un punto mentre la distanza tra punti riflette la differenza tra campioni in termini di specie presenti. Sono inoltre state identificate differenze stagionali, come riportato per diversi gruppi di invertebrati (Fig. 3, pannelli in basso) dove ogni pannello riporta le abbondanze percentuali di diversi gruppi di specie trovati nei campioni delle diverse stagioni.

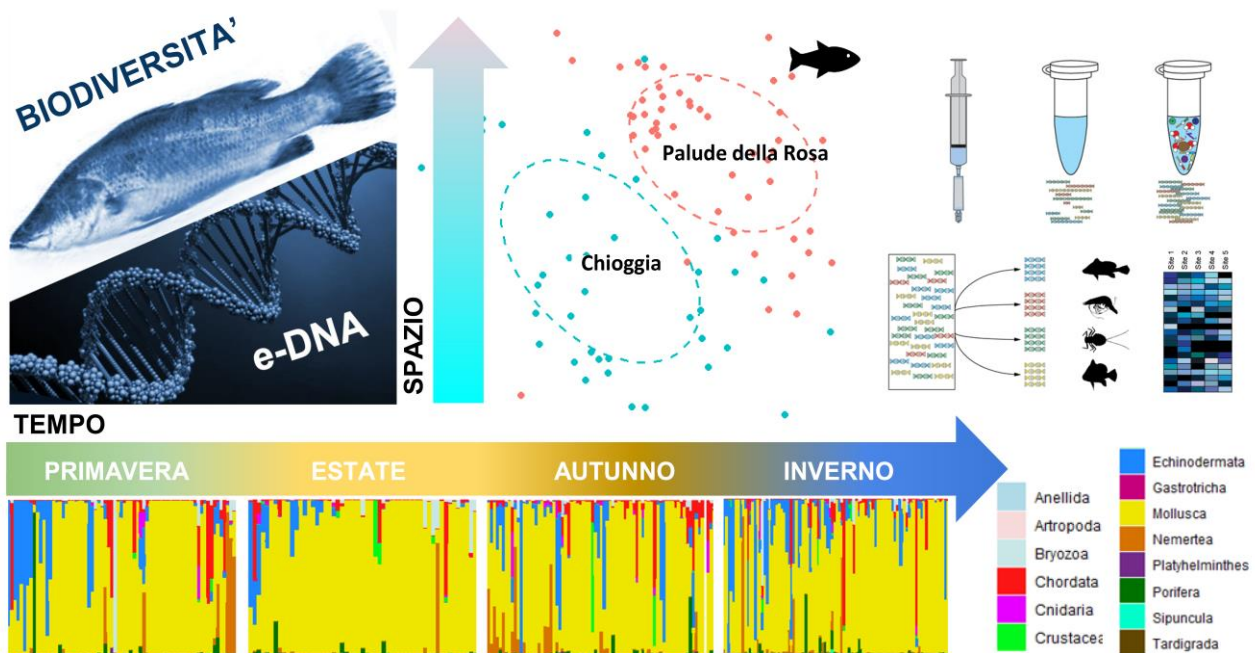


Figura 3. Prime stime della biodiversità presente in laguna di Venezia attraverso l’analisi del DNA presente in campioni d’acqua. I risultati ottenuti su pesci e invertebrati hanno permesso di caratterizzare la comunità biologica lagunare e di identificarne i cambiamenti nel tempo e nello spazio.

### 3. Spunti per il futuro

È necessario proseguire le attività di monitoraggio della torbidità con i dati misurati dalle stazioni installate nell'ambito del progetto e l'analisi delle immagini satellitari per lo studio dei pattern del trasporto. Indispensabile riuscire a estendere le misure in situ durante condizioni di eventi meteomarinari moderati e intensi con vento dalle direzioni tipiche di bora e scirocco (velocità del vento  $> 8-10 \text{ m s}^{-1}$ ).

In base ai risultati dello studio effettuato, è anche auspicabile un'indagine, in collaborazione con le Linee che si sono occupate della modellistica, sugli effetti della presenza dei moli, nel trasporto verso laguna dei materiali sospesi a mare durante gli eventi meteomarinari considerando il mare come una potenziale sorgente di materiale fine, diversamente da quanto fatto nelle valutazioni del passato. È necessario anche comprendere l'evoluzione passata dei flussi e della sedimentazione/erosione simulando le condizioni del trasporto in epoca storica precedentemente alla realizzazione dei moli guardiani, per poter adottare misure correttive per lo scenario attuale, considerando anche la gestione delle barriere mobili. Riguardo la fase operativa del sistema di barriere mobili è importante e auspicabile anche la prosecuzione delle indagini sul trasporto in condizioni di chiusura del sistema MOSE con la metodologia già consolidata nell'ambito di questa ricerca.

Attualmente le procedure di gestione e manutenzione dei profilatori acustici alle bocche di porto, gestiti da CVN-Provveditorato, non consentono di verificare la continuità delle acquisizioni e un controllo di qualità del dato. È quindi indispensabile adottare un protocollo per il monitoraggio ai fini di ottimizzare le valutazioni sui flussi di sedimento. Tale protocollo è stato elaborato parallelamente all'analisi dei dati confluiti al progetto Venezia2021 dal CVN proprio per superare le limitazioni ed è presentato nel deliverable che descrive i risultati della linea di ricerca (D1.1.1.6-Rapporto flussi idrici e trasporto solido. Terzo anno).

Anche per quanto riguarda la morfodinamica delle bocche di porto e dei canali di grande navigazione è importante dare continuità ai monitoraggi delle batimetrie ad alta risoluzione per valutare l'evoluzione nel tempo nella fase operativa del sistema MOSE.

Ulteriori indagini potrebbero essere volte a studiare i flussi di organismi transitanti per le bocche di porto. In questo caso si potrebbe installare un echosounder fisso, orizzontale in una o più bocche di porto, al fine di valutare gli ingressi e le uscite dei target per lunghi intervalli temporali.

L'analisi del DNA ambientale rappresenta un metodo innovativo per la stima ed il monitoraggio della diversità biologica, attraverso la caratterizzazione del DNA presente in campioni d'acqua. La metodica può complementare gli approcci basati sulla identificazione morfologica e può risultare particolarmente utile in aree dove è difficile o impossibile procedere con le metodiche di campionamento tradizionali. In prospettiva futura, la metodica si presta al monitoraggio sistematico mediante stazioni fisse e risulta promettente per la sua semplicità di utilizzo.

In una prospettiva futura, è inoltre importante monitorare il cambiamento genetico delle popolazioni lagunari nel tempo. Tale cambiamento è stato rilevato nel presente progetto di ricerca e indica la presenza, anche in specie abbondanti, di popolazioni di dimensioni ridotte dal punto di vista genetico. La modificazione degli scambi laguna/mare, attesa in particolare negli scenari futuri di frequente e prolungata chiusura del sistema MOSE, potrebbe aumentare l'isolamento delle popolazioni lagunari e ridurre il reclutamento a livello locale aumentando tale variazione temporale e portando all'impoverimento genetico delle specie lagunari.

## DESCRIZIONE ESTESA

### 4. Descrizione delle attività

#### WP 1.1.1 - Misura degli scambi laguna-mare di acqua e sedimento

Le attività del workpackage sono piuttosto articolate e hanno previsto una serie di indagini sperimentali per la caratterizzazione idrodinamica e del trasporto solido delle sezioni prospicienti le barriere mobili alle tre bocche di porto, per l'individuazione di *pattern* di trasporto di sedimenti in sospensione, anche attraverso metodologie da remoto e l'analisi di prodotti satellitari, e una serie di indagini per lo studio delle variazioni morfologiche delle aree adiacenti ai canali di navigazione quali, ad esempio, il canale Malamocco-Marghera.

Sono state effettuate numerose campagne (30 giornate) per attività di calibrazione e manutenzione delle stazioni torbidimetriche situate alla bocca di porto di Lido, nel Canale San Nicolò (SN) e nel Canale di Treporti (TRP), e alle bocche di porto di Malamocco (MA) e Chioggia (CH) (Figura 4). In ognuna delle stazioni è stato installato un torbidimetro OBS501 Smart Turbidity Meter C/W Clearsensor (TM) Technology prodotto da Campbell Scientific®. Le attività di campo hanno previsto la raccolta di campioni d'acqua per la determinazione del materiale particolato in sospensione (SPM) e misure di torbidità con sonda CTD. Sono state svolte 12 campagne di misura (5 alla bocca di Lido, 4 alla bocca di Malamocco e 3 alla bocca di Chioggia) per la stima dei flussi alle bocche di porto in corrispondenza dei profilatori acustici ADCP di proprietà del CVN-Provveditorato, durante le quali sono state eseguite misurazioni correntometriche con profilatori ADCP *vessel-mounted* e acquisiti i profili verticali dei parametri chimico fisici della colonna d'acqua e campionamenti a diverse quote con un sistema Rosette (GO-1016)-CTD. Sui campioni di acqua sono state effettuate misure di concentrazione del particolato in sospensione (SPM), determinazione della distribuzione granulometrica del sospeso e determinazione della frazione organica.



Figura 4. Installazione della stazione torbidimetrica alla bocca di porto di Malamocco.

Per la calibrazione/validazione delle immagini satellitari e dei prodotti ottenuti, sono state svolte 37 uscite in campo sincrone al passaggio dei satelliti Landsat 8 (L8) e Sentinel 2 (S2) che hanno previsto misure di riflettanza *above water* con lo spettroradiometro WISP-3 (*Water Insight*), profili CTD con sonda multiparametrica Ocean Seven 316Plus (Itronaut) equipaggiata con sensore di *backscattering* ottico per la misura della torbidità a 880 nm (*Seapoint*) e misure di trasparenza dell'acqua con Disco Secchi in 8 stazioni di misura. Le immagini satellitari sono state corrette radiometricamente e atmosfericamente e, attraverso l'applicazione di algoritmi specifici, sono state ottenute le mappe di torbidità e di temperatura superficiale dell'acqua.

Relativamente allo studio dei processi erosivi in atto lungo i principali canali di navigazione, sono state svolte 21 campagne di misura che hanno previsto: il monitoraggio del moto ondoso da una postazione fissa per la misura del livello in prossimità del canale navigabile e monitoraggio del traffico navale per un periodo di 7 mesi mediante acquisizione dei segnali AIS; lo studio dell'evoluzione batimetrica dei margini del canale di navigazione e delle aree a basso fondale ad esso adiacenti mediante rilievi ad alta risoluzione con multibeam e rilievi acustici single-beam con drone marino OpenSwap; la quantificazione dei processi erosivi in corso nelle aree emerse adiacenti al canale di navigazione (casce di colmata A, B e DE) mediante tecniche di remote sensing e rilievi aerofotogrammetrici con drone quadricottero ed elaborazioni in ambiente GIS. Infine è stato sperimentato l'uso di un drone DJI Matrice 200 equipaggiato con sensore multispettrale AGX710 prodotto da Sentera per lo studio di dettaglio dei pattern del trasporto e dei processi morfodinamici dei sistemi di barene, in collaborazione con la linea 3.2.

### WP 1.1.2 - Studio delle variazioni morfologiche del fondale delle bocche di porto

Al fine di valutare l'evoluzione della morfologia del fondale delle bocche di porto sono stati effettuati nei diversi anni di attività dei rilievi morfobatimetrici ad alta risoluzione mediante tecnologia acustica *multibeam echosounder*. I monitoraggi sono stati effettuati avvalendosi di un *multibeam echosounder* Kongsberg EM2040C (Figura 5), un sistema multifascio a doppia testa e multifrequenza che consente un'apertura fino a 200 gradi e una copertura di fondale fino a 8 volte la profondità dell'acqua, settato con frequenza di 320 kHz con 800 beams (400 per swath) in modalità "equidistant", integrato da due sonde per la misurazione della velocità del suono, da un sistema di posizionamento Kongsberg Seapath 380, con correzione in tempo reale RTK (Real Time Kinematic) che ha garantito un'accuratezza centimetrica del posizionamento orizzontale, e da un'unità inerziale Kongsberg Seatex Motion Reference Unit (MRU) 5.



Figura 5. Motoscafo Litus e multibeam Kongsberg EM2040C utilizzati nei rilievi.

In accordo con quanto previsto dal progetto, sono state effettuate cinque campagne di monitoraggio nelle tre bocche di porto in tre anni di attività: nel 2019 sono state investigate Lido, Malamocco e Chioggia, nel 2020 e nel 2021 sono state ripetute le indagini nella bocca di porto di Lido.

I dati acquisiti sono stati processati con il software Caris HIPS & SIPS 11.0.8 e ArcGIS Pro, al fine di produrre delle mappe a grande dettaglio dei fondali (Figura 6). Il confronto delle mappe ottenute, anche con mappe derivate da dati precedentemente acquisiti, ha permesso di caratterizzare le variazioni dei fondali delle bocche di porto. Sono state calcolate le variazioni di batimetria come differenza tra i dati relativi alla batimetria del 2021 e i dati relativi alla batimetria degli anni precedenti: si sono definite come aree in deposizione ed in erosione le aree in cui si è vista rispettivamente una variazione positiva o negativa della batimetria maggiore di 50 cm, mentre come aree stabili si definiscono le aree in cui la differenza delle batimetrie è compresa tra -50 cm e 50 cm. Questa è una stima molto conservativa che tiene conto dei possibili errori di posizionamento sulla verticale.



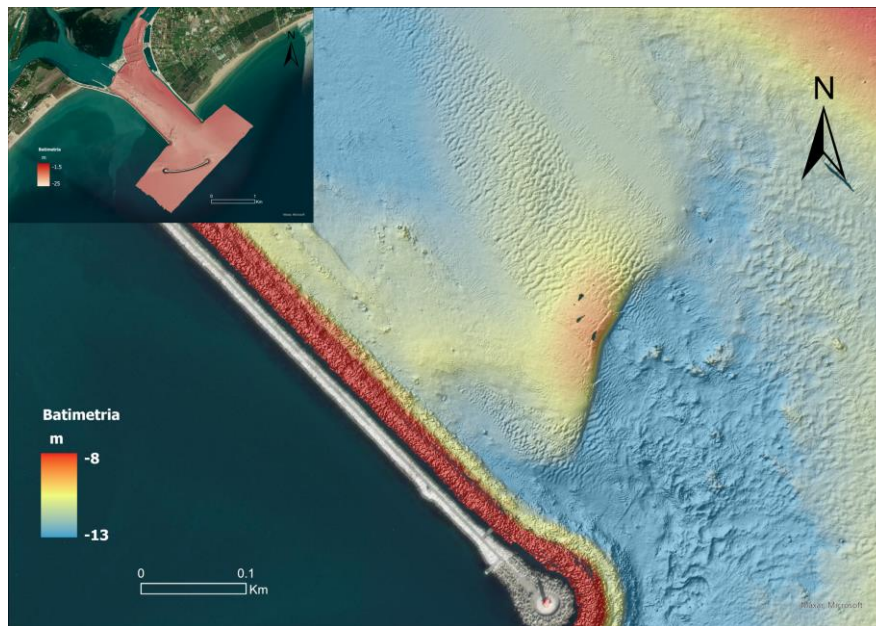


Figura 6. Restituzione batimetrica della bocca di porto del Lido, anno 2021: esempio di campo di dune e duna.

### WP 1.1.3 - Rilevamento mediante tecniche acustiche dei flussi di biomassa attraverso le bocche di porto

L'attività di ricerca svolta nell'ambito del WP 1.1.3 "Rilevamento mediante tecniche acustiche dei flussi di biomassa alle bocche di porto" ha permesso di portare a termine il primo assessment di acustica attiva per lo studio del comparto nectonico in laguna di Venezia. Sebbene l'echosounding sia una tecnica largamente usata per lo studio della fauna ittica in ambiente marino, questa tecnica non era mai stata applicata al contesto lagunare veneziano. Questa prima applicazione, quindi, si può considerare, a tutti gli effetti, un "benchmark" e, verosimilmente, un punto di partenza per l'utilizzo dell'acustica attiva anche in ambiente lagunare.

Nel contesto di monitorare e studiare una laguna che cambia ed è sempre più "regolata" sia dal punto di vista antropico che da quello ecologico, l'acustica attiva si è rivelata, e potrà esserlo ancora di più in futuro, una tecnica ottimale; basti pensare a quanto potrebbe essere fondamentale studiare le variazioni delle condizioni ecologiche nell'area delle bocche di porto, in un regime di funzionamento del MOSE "ordinario", durante la stagione delle acque alte.

Poiché tale metodologia è stata applicata per la prima volta in questo contesto ambientale, è stato necessario creare da zero sia lo schema di campionamento, che il successivo workflow di analisi dei dati. Questi aspetti hanno tenuto conto delle peculiarità delle aree oggetto di studio. Le bocche di porto, in relazione alla loro forma ed ampiezza, sono di fatto più simili ad aste fluviali che ad aree di mare aperto. Questo fattore, e la volontà di acquisire dati sufficienti a spazializzare ad alta risoluzione le densità nectoniche, hanno portato a scegliere uno schema di campionamento a zig-zag con diversi passaggi, contrariamente a quanto succede in mare aperto ove tipicamente si campiona lungo linee rette e senza passaggi ripetuti. Successivamente l'analisi dei dati, dai file raw di partenza, è stata ottimizzata attraverso un workflow incentrato sull'estrazione delle tracce riguardanti gli organismi nectonici (potenzialmente pesci o marcoinvertibrati natanti, di varie misure) in quanto componente poco studiata (spesso si preferisce studiare le fasi planctoniche e post-larvali in bocca di porto) soprattutto in ambienti dinamici e difficili da campionare con altre tecniche. I dati numerici ricavati, dotati di riferimento spaziale, sono stati tramutati in densità (numero di individui per superficie) e successivamente interpolati tramite una modellizzazione che tenesse conto delle caratteristiche morfologiche delle bocche di porto, sintetizzate nella batimetria (per la quale si ha una dettagliata distribuzione spaziale). Questo approccio, innovativo ma al contempo solido, in quanto proveniente da una modellizzazione generalmente usata nello stock assessment e dotato di range di confidenza, ha portato ad ottenere, per la prima volta, stime numeriche di densità di organismi nectonici, specifiche per le aree di bocca

di porto della laguna. La metodologia proposta ha consentito di ottenere indicazioni in merito alla distribuzione spaziale degli organismi neotonici, ma anche una stima della densità, da cui poi ricavare una valutazione dello “standing crop”, in termini di biomassa. Nel contesto lagunare, finora le bocche di porto sono state considerate fondamentalmente dei “corridoi” funzionali alla connettività ecologica tra mare e laguna. Generalmente, infatti, gli studi riguardanti la fauna neotonica lagunare si sono concentrati sugli ambienti di basso fondale o lungo la fascia costiera, in parte anche per le difficoltà logistiche legate al campionamento di ambienti profondi, nei quali è interdotta qualsiasi attività di pesca con attrezzi professionali. I dati raccolti nel presente studio hanno fatto emergere, invece, un quadro parzialmente diverso, suggerendo che questi ambienti profondi (per certi versi unici, nel panorama dell’intero bacino alto Adriatico) potrebbero fungere da veri e propri habitat, in grado di ospitare una comunità specifica. Essi raggiungono densità notevoli, occupando porzioni profonde della colonna d’acqua.

#### **WP 1.1.4 - Sperimentazione di metodi di identificazione di uova e larve attraverso il DNA ambientale**

La valutazione dell’impatto del MOSE sulle comunità biologiche della laguna di Venezia richiede la messa a punto di approcci sperimentali standardizzati che consentano nel lungo termine un monitoraggio sistematico della composizione in specie e, possibilmente, della loro abbondanza reciproca. Si può infatti ipotizzare che l’operatività del MOSE, specie negli scenari futuri che prevedono un aumento della frequenza di innalzamento delle barriere mobili e della durata delle chiusure, abbia un impatto sullo scambio di individui tra mare laguna, con effetti sulla composizione delle comunità biologiche e sul mantenimento di servizi e funzioni ecosistemiche dell’ambiente lagunare. Un monitoraggio di questo tipo deve possibilmente iniziare prima della messa in funzione regolare del sistema di barriere mobili, in modo da poter evidenziare eventuali impatti significativi mediante il confronto con la situazione precedente.

In questo contesto, l’attività del WP1.1.4 “Sperimentazione di metodi di identificazione di uova e larve attraverso il DNA ambientale” si è concentrata particolarmente sulla messa a punto e sull’applicazione di metodi genetici per l’identificazione di specie a partire da campioni ambientali di acqua (*eDNA*), al fine di fornire metodiche innovative per il monitoraggio sistematico della comunità biologica. In particolare, si è ottenuta una prima base di dati relativa alla situazione antecedente alla piena operatività del sistema MOSE, che sono di importanza critica per consentire nel futuro il rilevamento dell’impatto, legato alla modificazione del regime di scambio di individui tra mare laguna, che il sistema di barriere mobili potrebbe avere sulla composizione della comunità biologica.

L’attività di ricerca svolta nel workpackage ha previsto la sperimentazione di metodi di identificazione genetica di pesci e invertebrati della laguna di Venezia, con lo scopo di mettere a punto specifiche metodiche di *barcoding* per l’identificazione di specie da DNA ottenuto da uova e larve. Inoltre ha permesso di mettere a punto metodiche di analisi del DNA ambientale (*environmental DNA*, *eDNA*) nella colonna d’acqua mediante *metabarcoding*. In seguito all’attività sperimentale svolta è stato possibile non solo mettere a punto le specifiche metodologie previste, ma anche applicarle alla valutazione sistematica delle specie presenti, evidenziando la possibilità di identificare la presenza di diverse specie mediante marcatori genetici, sia a partire da DNA ambientale (campioni di acqua) sia da DNA estratto da campioni provenienti da retino (zooplankton, uova e larve). È stato quindi possibile valutare il potere risolutivo dell’approccio molecolare rispetto a quello basato su metodiche classiche di prelievo, ricavare informazioni sulla composizione della comunità biologica e sulla sua variazione spazio-temporale.

La ricerca ha comportato l’ottimizzazione e la messa a punto di procedure innovative per la laguna di Venezia che hanno riguardato i diversi aspetti legati alla caratterizzazione dell’*eDNA*. L’analisi del DNA ambientale, infatti, se ha già fornito informazioni importanti per la caratterizzazione di ambienti marini e di acque dolci, è tuttora nelle prime fasi di applicazione per quanto riguarda gli ecosistemi di transizione. L’attività di messa a punto ha riguardato i diversi aspetti pratici, che vanno dalla raccolta del campione d’acqua, alla determinazione del volume ottimale di filtrazione, alla scelta del tipo di filtro più adatto, sino alla determinazione dei marcatori informativi e delle metodiche di laboratorio e di analisi bioinformatica.

Nello specifico, al termine della messa a punto sono stati selezionate le coppie di primer per l’identificazione delle specie di pesci e per l’identificazione delle specie di echinodermi e altri invertebrati, che sono stati

analizzati mediante sequenziamento High Throughput. Per quanto riguarda la messa a punto di metodiche di *barcoding* standard, queste sono state svolte sulle specie *Zosterisessor ophiocephalus* (il “Go”) e *Paracentrotus lividus* (“riccio femmina”). L’identificazione di adulti, uova e larve di queste specie mediante protocolli molecolari è stata possibile grazie alla disponibilità di materiale di riferimento, come riportato nel dettaglio nei rapporti tecnici e deliverable specifici, che ha incluso ovature di *Z. ophiocephalus* prelevate in natura e stadi larvali di *P. lividus*, ottenuti da esperimenti di fecondazione controllata in acquario. I campioni ottenuti sono stati estratti mediante metodiche rapide ed il DNA ottenuto è stato amplificato mediante PCR e sottoposto ad analisi di sequenza. La metodica di metabarcoding è stata testata su pool di DNA, mescolati in diverse proporzioni, e su DNA estratto direttamente da pool di campioni, al fine di stimare la sensibilità del metodo per il rilevamento di una singola specie. I risultati del metabarcoding ottenuto a partire da *eDNA* sono stati messi a confronto con quelli ottenuti da campioni di “bulk-DNA”, ossia da DNA estratto a partire da materiale prelevato mediante retini in attività di campionamento tradizionale. Il *bulk-DNA* contiene DNA misto delle diverse specie catturate attraverso retinatura che può anch’esso essere sottoposto ad analisi molecolari al fine di identificare le specie presenti o entrate in contatto col retino stesso. Il confronto tra i risultati da *eDNA* e *bulk-DNA* permette di evidenziare eventuali differenze di sensibilità delle due metodiche e di ricavare indicazioni sul piano sperimentale necessario per massimizzare l’efficacia del rilevamento di specie da campionamenti di acqua. Le analisi sono state condotte su campioni di acque e su retinature raccolti simultaneamente. Infine, per quanto riguarda le analisi *eDNA* sono state svolte su campioni di *eDNA* (DNA ottenuto da filtrazione da campioni ambientali di acqua) prelevati regolarmente in diverse aree della laguna da novembre 2018 a maggio 2021. È stato prodotto un protocollo specifico, ottimizzato per le analisi di acque lagunari (D1.1.4.3) e sono state fornite delle linee generali per l’applicazione dello stesso al monitoraggio sistematico delle acque lagunari per pesci ed invertebrati (D1.1.4.4).

#### **WP 1.1.5 - Analisi genetica a livello di popolazione**

L’attività di ricerca ha previsto l’analisi genetica di popolazione di quattro specie target, due di pesci (il Gò, *Zosterisessor ophiocephalus*, ed il latterino, *Atherina boyeri*) e due di invertebrati (il granchio verde, *Carcinus aestuarii*, e la cozza *Mytilus galloprovincialis*), per le quali si ipotizzava o era riportata la presenza di variazione genetica sulla piccola scala spaziale o temporale. L’obiettivo era quello di misurare la variabilità genetica presente in laguna di Venezia in condizioni di base precedenti alla piena operatività del sistema MOSE, di identificare la presenza di variazione genetica temporale, e di studiare tale variazione in relazione ai pool genetici dei popolamenti delle lagune adiacenti. L’attività sperimentale ha comportato l’analisi di oltre 4500 individui, ed è stata effettuata attraverso marcatori genetici microsatellite in *Z. ophiocephalus* e *C. aestuarii*, e mediante marcatori SNPs (Single Nucleotide Polymorphisms) tipizzati con metodiche di ultima generazione in *A. boyeri* e *M. galloprovincialis*. L’attività ha previsto un piano di campionamento senza precedenti per l’area di interesse popolazione che ha previsto il prelievo di campioni di popolazione da 6 siti della laguna di Venezia (3 siti in prossimità delle bocche di porto e 3 in aree interne) e 2 siti delle lagune limitrofe di Marano e Goro, con una cadenza semestrale (primavera e autunno) nei tre anni di progetto. La procedura di laboratorio ha comportato il prelievo di una porzione di tessuto da ogni individuo, l’estrazione del DNA e la sua caratterizzazione quali/quantitativa. Nel caso di utilizzo di microsatelliti si è poi proceduto all’amplificazione mediante PCR dei frammenti di interesse, alla loro genotipizzazione mediante un servizio esterno, al processamento dei dati grezzi e al rilevamento dei genotipi (scoring) ed alle successive analisi dei dati volte a rilevare la variazione delle frequenze alleliche tra campioni e rilevare le differenze genetiche di popolazione. Nel caso di utilizzo di SNPs, dopo l’estrazione del DNA, la procedura ha previsto la produzione di librerie genomiche parziali, cioè di “raccolte” di una parte consistente del DNA genomico dei singoli individui, che vengono poi sottoposte a sequenziamento massivo con metodiche di ultima generazione. I dettagli sperimentali della procedura di ddRAD sequencing utilizzata sono riportati per esteso nel Deliverable 1.1.5.2 (Analisi genetiche primo anno). In breve, per ogni libreria, il DNA dei diversi individui è stato frammentato mediante gli enzimi di restrizione *PstI-NlaIII* e legato ad adattatori specifici Illumina dotati di un barcode individuo-specifico. I DNA così trattati sono stati mescolati in quantità equimolare e, dopo la selezione dimensionale dei frammenti di interesse e la loro purificazione, la libreria così ottenuta è stata sottoposta a sequenziamento massivo (NGS, Next Generation Sequencing) su una lane Illumina NovaSeq 2\*150 PE, con un numero di sequenze atteso di oltre 3 miliardi per libreria. Una volta ottenuti i dati di

sequenziamento, l'analisi bioinformatica ha previsto il processamento della notevole mole di dati, la rimozione dalle sequenze degli adattatori introdotti per la creazione delle librerie, il filtraggio per qualità, la creazione di un catalogo di loci e l'identificazione dei siti polimorfici di elevata qualità, ottenuti selezionando casualmente un solo SNP per locus e considerando un coverage minimo di 15x, una condivisione dell'80%, ed una MAF (Minimum Allelic Frequency) dello 0.5%. A valle di queste analisi, si è ottenuto un dataset idoneo alle vere e proprie analisi di genetica di popolazione. Nel corso dell'attività di ricerca sono stati prodotti e resi disponibili i protocolli ottimizzati per le analisi genetiche delle specie target ed è stato ottenuto per ogni specie un dataset di riferimento, basato sui campionamenti svolti negli anni 2019-2021, essenziale nel futuro per la verifica dell'ipotesi che la riduzione degli scambi laguna-mare indotta dalla chiusura delle paratoie possa condurre ad un incremento delle variazioni temporali.

## 5. Risultati per attività

### WP 1.1.1 - Misura degli scambi laguna-mare di acqua e sedimento

Le molteplici attività di questo workpackage hanno consentito di implementare un sistema osservativo integrato che assimila immagini satellitari e misure idrodinamiche e di torbidità in situ per indagare la dinamica dei sedimenti sospesi nelle aree di bocca in relazione alle correnti longshore nella zona litoranea ed alla circolazione delle correnti mareali lungo la rete dei canali lagunari. Sono state ottenute serie temporali di torbidità in superficie, di portata e di *backscatter* acustico che è stato convertito in torbidità lungo la colonna verticale in diverse condizioni mareali e meteo marine. Le mappe di torbidità accurate e validate sono derivate dai satelliti Sentinel 2 e Landsat 8.

Un estratto di 3 mesi (giugno-settembre 2020) delle acquisizioni in continuo dalla rete di strumenti è mostrato in Figura 7. I grafici riportano la portata calcolata per le due sezioni TRP e SN, la torbidità superficiale misurata alle due stazioni fisse di monitoraggio e la torbidità media verticale derivata dalla conversione del *backscatter* acustico dagli ADCP installati al fondo e gestiti da Provveditorato OO.PP-CVN. Valori di torbidità estratti dalle mappe satellitari in prossimità delle due stazioni fisse sono stati sovrapposti al diagramma di torbidità superficiale. La figura mostra anche il livello della marea e la velocità e la direzione del vento registrati alla stazione di Lido Sud.

In Figura 8 è riportato un esempio dell'integrazione delle informazioni del sistema osservativo nella rappresentazione dei pattern di distribuzione dei sedimenti in sospensione in presenza di condizioni di vento intenso (velocità maggiore di  $15 \text{ m s}^{-1}$  da nord-est). La mappa di torbidità rappresenta la situazione che si instaura tipicamente in condizioni di vento di bora: è evidente l'intensa risospensione di sedimenti causata dall'azione delle onde sulla costa a NE della bocca di porto e il trasporto verso l'interno della laguna, prevalentemente nel canale di Treporti, di grandi quantità di materiale fine in sospensione. Come si evidenzia dall'analisi di situazioni simili nell'ambito del periodo considerato dal progetto, questo processo è in grado di veicolare verso le aree interne della laguna grandi quantità di materiale fine con una ricaduta positiva sulla sedimentazione nei sistemi a basso fondale del bacino nord della laguna.

A causa della diversa idrodinamica e configurazione morfologica, nelle bocche di porto di Malamocco e Chioggia l'intensità di questo flusso di particellato di provenienza costiera è molto più limitato e potrebbe essere una delle concause della perdita di morfologia del bacino centrale della laguna. Come evidenziato nella Sezione 3, sarebbe auspicabile come approfondimento di questi risultati una indagine modellistica sull'effetto dei moli guardiani nella dinamica del trasporto di sedimenti da mare durante gli eventi meteomarinari. Un catalogo completo delle mappe satellite della torbidità è contenuto nel documento della Milestone 1.1.1.3.

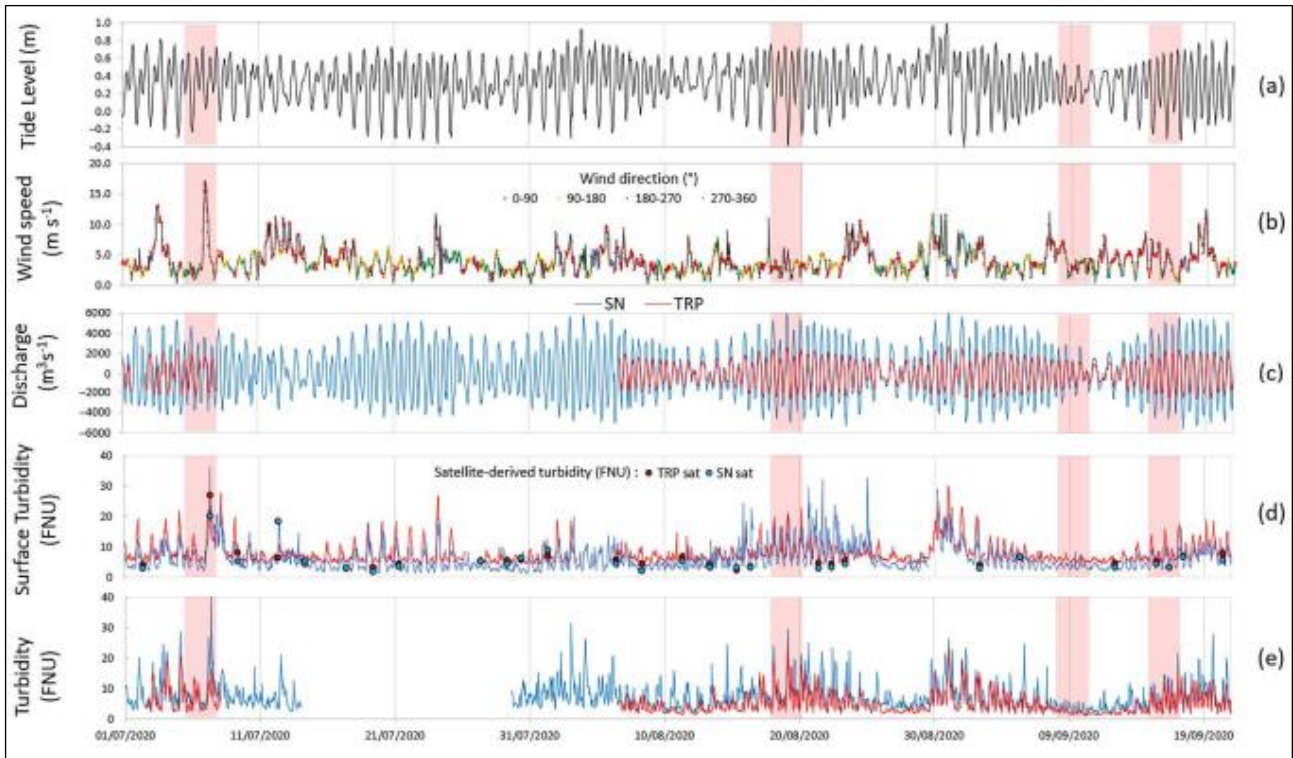


Figura 7. Serie temporali orarie del livello di marea (a), della velocità e direzione del vento (b) misurati alla stazione di Lido Diga Sud; serie temporale della portata stimata con il metodo della velocità-indice dai dati degli ADCP al fondo di proprietà del CVN-Provveditorato (c); serie temporale della torbidità superficiale misurata alle stazioni fisse di San Nicolò e Treporti, con sovrapposti (pallini rossi e blu) i valori della torbidità superficiale derivati dai dati satellitari (d); serie temporale della torbidità media verticale derivata dalla conversione del *backscatter* acustico degli ADCP al fondo (e). Le aree rosse indicano i periodi in cui è stata fatta un'analisi di dettaglio dei processi.

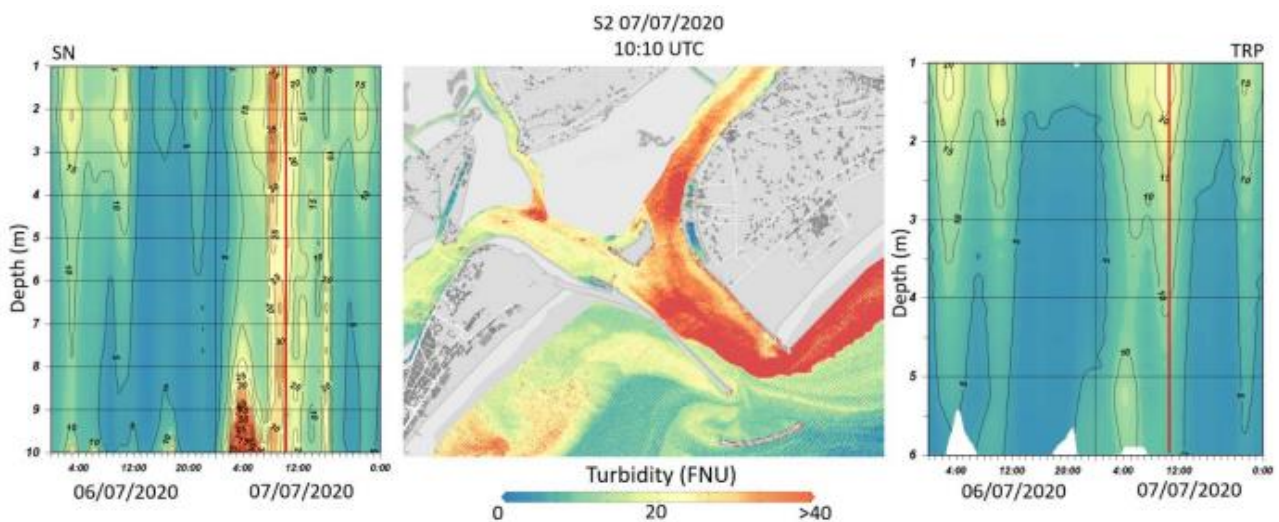


Figura 8. Evento meteo-marino del 6-7 luglio 2020. Al centro la mappa di torbidità ottenuta da satellite il giorno 7 luglio; a sinistra (SN) e a destra (TRP) l'andamento temporale della torbidità lungo il profilo verticale, ottenuta dal *backscatter* registrato dagli ADCP al fondo per il periodo di tempo considerato.

Nell'ambito dello studio dei processi erosivi in atto lungo i canali di navigazione, sono stati calcolati i volumi di superfici erose lungo le casse di colmata A, B e DE, ad ovest del canale navigabile Malamocco-Marghera (Figura 9). Per quanto riguarda la cassa di colmata A nel periodo febbraio – dicembre 2021 è stato calcolato

un arretramento della linea di costa fino a 8.50 m, per un totale di 1050 m<sup>2</sup> di superficie erosa e di 2704 m<sup>3</sup> di volume perso. Nel caso della cassa di colmata B, tra febbraio 2020 e marzo 2021, è stata stimata una perdita totale di 10830 m<sup>2</sup> di superficie per un totale di 14800 m<sup>3</sup> di materiale eroso. L'erosione dei depositi artificiali delle colmate ha inoltre riesumato le barene presenti nell'area prima dello scavo del canale navigabile e della realizzazione delle casse di colmata. Queste forme naturali erano state sepolte al di sotto del riporto artificiale realizzato durante lo scavo del canale e sono oggi nuovamente affioranti a causa del progressivo smantellamento dei depositi delle colmate causato dal moto ondoso delle navi in transito. Ulteriori indagini sono state avviate per comprendere i rapporti fra l'elevazione di queste barene a quella delle barene adiacenti non interessate dalla copertura artificiale ed evidenziare l'effetto di eventuali fenomeni di compattazione dei depositi in seguito alla colmata. Nel caso della cassa di colmata DE è stato anche possibile evidenziare i processi di smantellamento delle opere di protezione dall'erosione di sponda realizzate alla fine degli anni '90 del secolo scorso e ricostruite nel 2002. Si è evidenziato uno stato di generale degrado delle protezioni e nuovi fenomeni di arretramento laddove le strutture sono smantellate e in parte distrutte.



Figura 9. Mappe delle aree erose lungo le casse di colmata A, B e DE, nei diversi periodi di indagine.

## WP 1.1.2 - Studio delle variazioni morfologiche del fondale delle bocche di porto

### Bocca di porto di Lido

L'analisi relativa alla bocca di porto del Lido è stata svolta utilizzando oltre i dati acquisiti durante le campagne previste dal progetto (2019, 2020 e 2021), anche dati precedentemente acquisiti in altri progetti (2011, 2013 e 2016). Le variazioni batimetriche (anno 2021 – anni precedenti) vengono presentate in Tabella 1 e Figura 10.

Tabella 1. Stima delle variazioni batimetriche in bocca di porto di Lido.

Variazione 2021-	2020	2019	2016	2013	2011
<b>Tot (km<sup>2</sup>)</b>	2.91	2.66	3.43	4.88	4.70
<b>In Deposizione</b>	1.80%	2.63%	6.35%	17.59%	16.74%
<b>Stabile</b>	98.06%	96.86%	90.10%	77.74%	72.49%
<b>In Erosione</b>	0.14%	0.51%	3.55%	4.68%	10.76%

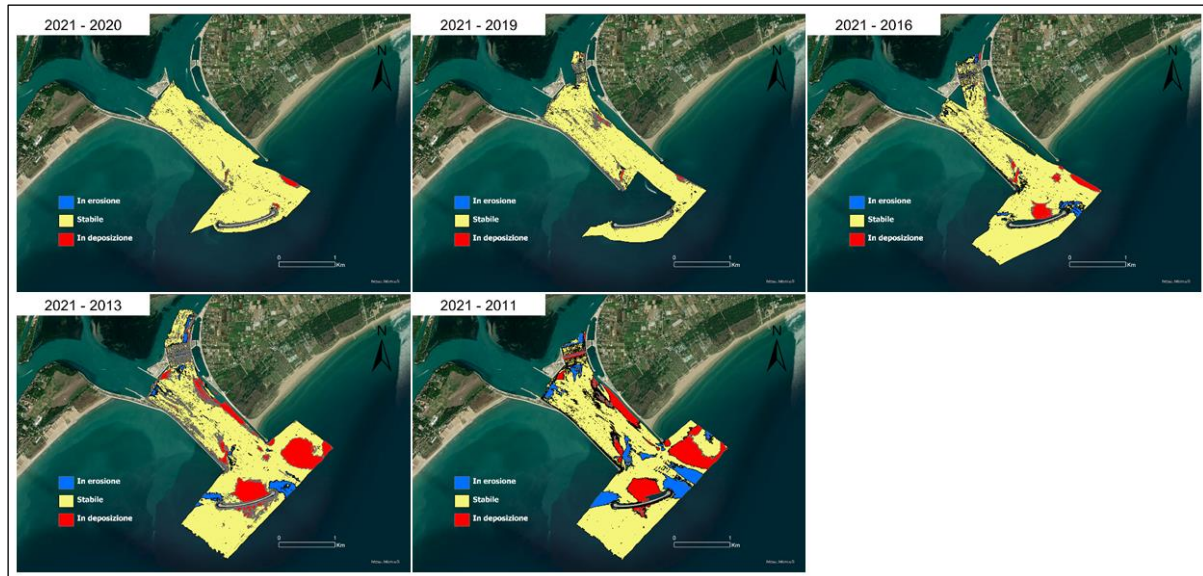


Figura 10. Mappe delle variazioni batimetriche in bocca di porto di Lido

Mentre non si registrano variazioni batimetriche significative tra la mappatura eseguita nel 2021 rispetto a quelle eseguita nel 2020 e 2019, più marcate risultano quelle relative al 2013 e 2011, anno in cui è stata ultimata la lunata frangiflutti. Risulta inoltre apprezzabile la variazione in numero ed estensione di alcune forme di fondo, quali campi di dune, dune e *scour holes* riscontrabile nel corso degli anni.

#### Bocca di porto di Malamocco

Si sono potuti confrontare i dati acquisiti nell'ambito del progetto (2019) con dati relativi al 2013.

Tabella 2. Stima delle variazioni batimetriche in bocca di porto di Malamocco.

Variazione 2019-	2013
<b>Tot (km<sup>2</sup>)</b>	4.84
<b>In Deposizione</b>	4.99%
<b>Stabile</b>	87.32%
<b>In Erosione</b>	7.69%

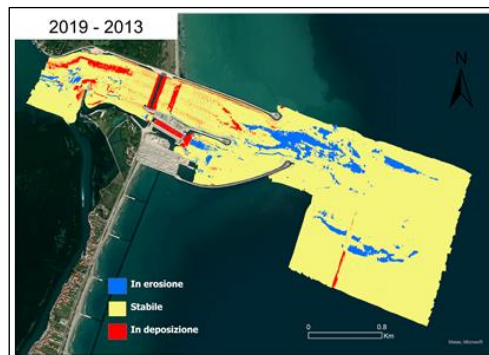


Figura 11. Mappa delle variazioni batimetriche in bocca di porto di Malamocco.

Rispetto al 2013 l'area monitorata in bocca di porto di Malamocco non ha subito modificazioni significative, risultando stabile in circa l'87% della sua superficie. Limitate appaiono inoltre le variazioni di alcune forme di fondo (Tabella 2 e Figura 11).

### Bocca di porto di Chioggia

I dati acquisiti nel presente progetto (2019) sono stati comparati con dati acquisiti nel 2016 e 2013, Tabella 3

e

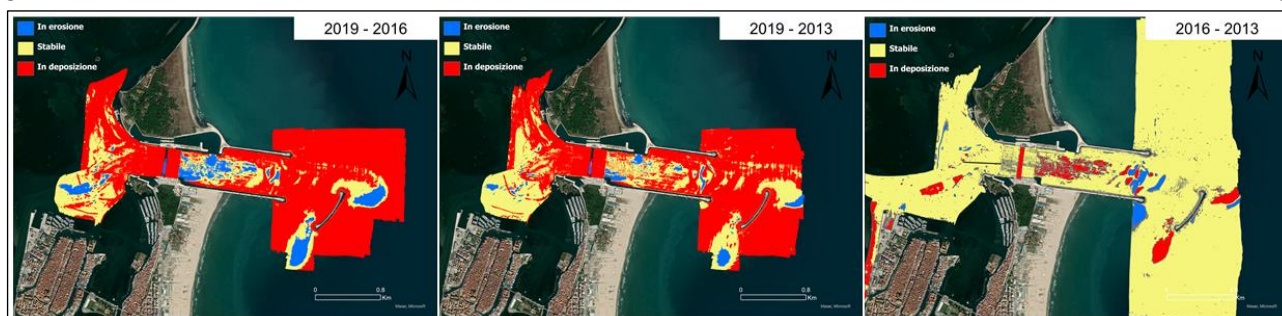


Figura 12.

Tabella 3. Stima delle variazioni batimetriche in bocca di porto di Chioggia.

Variazione 2019-	2016	2013
<b>Tot (km<sup>2</sup>)</b>	4.06	3.62
<b>In Deposizione</b>	72.79%	67.88%
<b>Stabile</b>	19.75%	28.60%
<b>In Erosione</b>	7.46%	3.51%



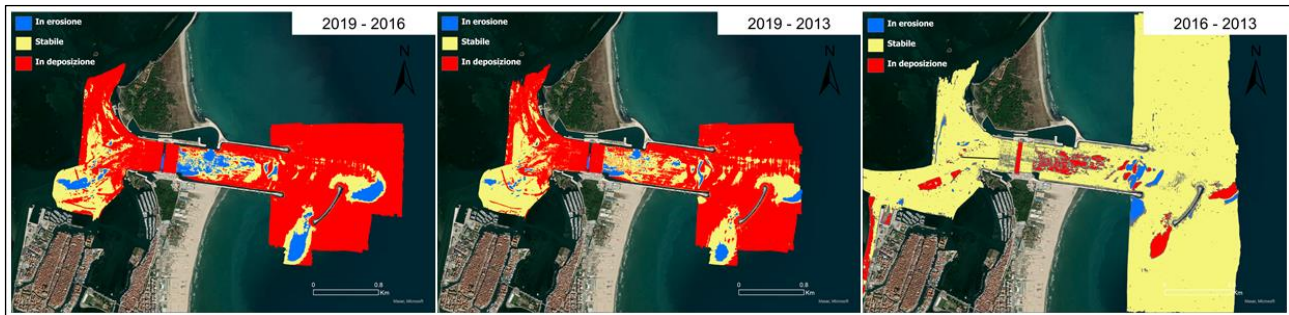


Figura 12. Mappa delle variazioni batimetriche in bocca di porto di Chioggia.

A differenza di quanto riscontrato nelle bocche di porto di Lido e Malamocco, a Chioggia nel corso degli ultimi anni è prevalso un processo di sedimentazione nella maggior parte dell'area monitorata. Si nota inoltre come le dune riconoscibili in prossimità dell'uscita a mare della bocca sembrano spostarsi in direzione mare, testimoniando un trasposto di sedimenti verso l'esterno. È interessante notare che dal 2013 al 2016 siano prevalentemente prevalse condizioni di stabilità.

### WP 1.1.3 - Rilevamento mediante tecniche acustiche dei flussi di biomassa attraverso le bocche di porto

Nel contesto lagunare, le bocche di porto sono state considerate fondamentalmente dei "corridoi" funzionali alla connettività ecologica tra mare e laguna. Generalmente, infatti, gli studi riguardanti la fauna neotonica lagunare si sono concentrati sugli ambienti di basso fondale o lungo la fascia costiera, in parte anche per le difficoltà logistiche legate al campionamento di ambienti profondi, nei quali è interdotta qualsiasi attività di pesca con attrezzi professionali. La metodologia proposta si è rivelata in grado di fornire indicazioni in merito alla distribuzione spaziale degli organismi neotonici nelle bocche tidali della laguna, ma anche una stima della densità da cui poi si può ricavare una valutazione dello "standing crop".

I dati acquisiti nel presente studio hanno fatto emergere un quadro diverso rispetto a quanto atteso, facendo ipotizzare che questi ambienti profondi (per certi versi unici nel panorama dell'intero bacino dell'alto Adriatico) potrebbero fungere da veri e propri habitat, in grado di ospitare una comunità specifica, abitualmente frequentati da organismi neotonici di grandi dimensioni. Essi raggiungono densità notevoli, occupando porzioni profonde della colonna d'acqua.

Le differenze morfologiche delle tre bocche guidano la differenziazione in termini di densità (e quindi di abbondanza totale). La bocca di porto del Lido, sebbene sia la più estesa è caratterizzata in media da densità minori e complessivamente "ospita" un numero minore di organismi. Le bocche di porto di Malamocco e Chioggia sebbene siano sensibilmente più piccole sono contraddistinte da picchi di densità molto elevati, in corrispondenza delle buche di raschiamento che si sono formate nel corso degli anni in varie zone dei porticanale.

Gli ambienti di bocca di porto, date le loro caratteristiche morfologiche e soprattutto alla luce delle stime di abbondanza rinvenute, acquisiscono importanza ecologica e, probabilmente, dovrebbero essere considerati degli habitat a sè stanti, non inquadrabili direttamente nel contesto lagunare né in quello costiero, contraddistinti da morfologie, parametri chimico-fisici, strutture di fondo, ecc. completamente differenti.

### WP 1.1.4 - Sperimentazione di metodi di identificazione di uova e larve attraverso il DNA ambientale

Le metodiche di identificazione molecolare e *metabarcoding* messe a punto ed utilizzate nel WP1.1.4 sono risultate applicabili e molto efficienti per la determinazione delle specie, fornendo indicazioni su variazione temporale e spaziale della comunità biologica, sui trend migratori delle specie di interesse e su potenziali specie invasive.

Specificamente, per quanto riguarda i pesci, l'analisi di 243 campioni di eDNA, ottenuti dalla filtrazione dei campioni di acqua prelevata in laguna di Venezia, seguita da estrazione del DNA, amplificazione del

marcatore specifico e successivo sequenziamento massivo mediante piattaforma Illumina, ha permesso di rilevare complessivamente 119 OTU (Operational Taxonomic Units) delle quali 78 corrispondenti a pesci potenzialmente presenti in laguna di Venezia, identificati a livello di specie in 71 casi. Le categorie più abbondanti sia per quanto riguarda il numero di sequenze, sia per quanto riguarda la loro presenza quasi ubiquitaria nel dataset, sono rappresentate da residenti lagunari (RL) o migratori marini (MM), ovvero pesci che vivono in mare, ma si spostano in laguna in determinati momenti dell'anno alla ricerca di cibo o per aggregarsi durante la stagione riproduttiva, per le quali è stato evidenziato un trend temporale congruente con le attese, con marcate differenze a seconda della stagione di campionamento. In generale, a livello di comunità, sono state evidenziate differenze nella composizione in specie tra diverse stagioni e tra siti di prelievo. Sono state inoltre rilevate specie prioritariamente di acqua dolce, che potrebbero essere presenti nelle aree più interne della laguna e, in modo del tutto inaspettato, la presenza del pesce palla (*Lagocephalus lagocephalus*), specie altamente invasiva, mai documentata prima d'ora in laguna di Venezia, ma rilevata precedentemente nel Mar Mediterraneo e nelle coste croate del Mar Adriatico. Infine, sempre in modo inatteso, sono state rinvenute sequenze di specie la cui presenza in laguna di Venezia è da escludere o quantomeno improbabile, ed il cui segnale potrebbe essere legato a scarti di lavorazione del mercato ittico di Chioggia attraverso cui queste specie sono transitate nel periodo di riferimento. Si tratta di risultati che necessitano quindi di ulteriori indagini, ma che potrebbero riflettere il limite intrinseco delle analisi di eDNA, cioè che il fatto di rilevare il DNA di una specie non implica necessariamente la presenza di individui della stessa nell'ecosistema.

Per quanto riguarda gli invertebrati, l'analisi è stata effettuata su 223 campioni di eDNA ha permesso di rilevare un numero molto elevato di specie comprendente, oltre a diversi echinodermi, anche altre specie di invertebrati marini: sono state rilevate infatti 207 OTU attribuibili a 14 Phyla diversi. Tra gli echinodermi identificati, quelli più frequenti all'interno del dataset sono stati il riccio di mare *Paracentrotus lividus*, e le stelle marine *Amphipholis squamata* e *Ophiothrix fragilis*, abbonanti in laguna di Venezia mente per quanto riguarda le specie di molluschi rilevate, per le quali sono disponibili più informazioni, si tratta nella maggior parte dei casi di specie note per essere presenti in laguna di Venezia o nell'Adriatico, incluse le vongole *Ruditapes philippinarum* e *R. decussatus* e la capalonga *Solen marginatus*. Anche in questo caso sono registrate alcune eccezioni riconducibili agli scarti del mercato ittico di Chioggia, in particolare per cefalopodi di interesse commerciale. Per quanto riguarda le specie invasive, sono state rilevate *Mytilopsis leucophaeata*, originaria del Golfo del Messico, che si è diffusa, attraverso il trasporto con le acque di zavorra e con la traslocazione di ostriche, dapprima nelle coste atlantiche americane e poi nelle coste atlantiche europee e *Theora lubrica* è una specie invasiva originaria del Mar del Giappone, la cui presenza nel Mar Mediterraneo è riportata a partire dal 2001 nel porto di Livorno. Ad oggi non risulta nessun'altra segnalazione delle due specie nel Mar Adriatico, ma la diffusa presenza nel dataset rappresentano un importante segnale di *early warning*.

Complessivamente la metodologia eDNA rappresenta un metodo molto promettente per il monitoraggio a lungo termine della composizione in specie nella laguna di Venezia a partire da soli campioni di acqua e per il rilevamento di specie invasive. Le analisi sin qui svolte indicano la necessità di complementare l'informazione ottenibile da eDNA con quella di campionamenti ed analisi più tradizionali e consolidate, e di adottare un solido piano sperimentale di campionamento, al fine di discriminare con certezza la presenza delle specie o la sola presenza del loro DNA, in particolare nel caso di specie d'acqua dolce o di specie di interesse commerciale oggetto di lavorazione e scarto nei mercati ittici e impianti di trasformazione.

#### **WP 1.1.5 - Analisi genetica a livello di popolazione**

Attraverso l'analisi di oltre 4500 individui, stato possibile rilevare in tutte le specie analizzate la presenza di variazioni genetiche temporali potenzialmente legate al reclutamento e alla dimensione delle popolazioni e stimare la dimensione effettiva genetica di popolazione. Quest'ultima, che rappresenta la dimensione di una popolazione ideale con le stesse caratteristiche di quella reale rispetto al mantenimento della variabilità genetica e che coincide approssimativamente con il numero di individui che si riproducono con successo di generazione in generazione, è risultata in tutti i casi molto piccola, nell'ordine di poche centinaia di individui, indicando un potenziale impatto futuro della riduzione degli scambi laguna-mare a livello dei pool genetici

delle specie e sul livello di biodiversità intraspecifica. Per quanto riguarda il differenziamento con le lagune adiacenti, mentre per granchi e gò si è evidenziata l'omogeneità dei campioni della laguna di Venezia rispetto a quelli di Marano e Goro, nel caso di cozze e latterini è stato rilevato un differenziamento geografico significativo. Nello specifico, per il granchio verde (*C. aestuarii*) è stata rilevata una significativa variabilità genetica temporale presente entro la laguna di Venezia attraverso l'analisi dei campioni 2019-2021; questo differenziamento è risultato ancora più evidente attraverso il confronto con campioni pregressi disponibili per questa specie, prelevati negli anni 2005-2007, che hanno permesso di rilevare un significativo andamento di IBT (Isolation By Time) in cui il differenziamento genetico aumenta all'aumentare degli anni trascorsi tra i diversi campionamenti. Per il gò (*Z. ophiocephalus*) la variabilità genetica temporale nella laguna di Venezia è stata evidenziata solo attraverso il confronto con campioni pregressi, in questo caso del 2001 e del 2002, ed anche in questo caso è stato evidenziato un andamento di IBT significativo e molto evidente. Per il latterino (*A. boyeri*) e per la cozza (*M. galloprovincialis*) non erano disponibili campioni antecedenti a quelli raccolti nell'ambito del progetto. In questo caso, tuttavia, grazie all'elevato livello di risoluzione fornito dai marcatori genetici di ultima generazione utilizzati, l'analisi dei dati ha evidenziato la presenza di differenziamento temporale e la presenza di differenziamento geografico.

Complessivamente, i dati genetici raccolti indicano come i popolamenti differiscono geneticamente principalmente rispetto all'anno o alla stagione di prelievo e presentano una situazione dinamica in cui la composizione genetica cambia nel tempo, indicando l'importanza dei fenomeni di deriva genetica dovuta a variazioni nel reclutamento o alla riduzione complessiva della dimensione delle popolazioni lagunari.

## 6. Obiettivi prefissati e raggiunti

Gli obiettivi generali della Linea 1.1, quali lo studio dei processi idrodinamici, biogeochimici e morfologici connessi agli scambi il mare, sono stati raggiunti.

È stato realizzato un sistema osservativo che integra misure in situ, osservazioni da satellite e le informazioni da reti di monitoraggio esistenti e realizzate ad hoc per consentire una migliore comprensione delle tendenze in atto e degli effetti della gestione delle barriere mobili del sistema MOSE contribuendo al miglioramento del quadro conoscitivo sullo stato del sistema lagunare. In un sistema che prevede il controllo dei flussi laguna-mare e gli interventi per le trasformazioni morfodinamiche del bacino lagunare, e che quindi si configura sempre più come una laguna regolata, questo approccio integrato è in grado di osservare e descrivere i pattern del trasporto, e rappresenta uno strumento fondamentale per la gestione dell'ecosistema e la valutazione delle variazioni indotte e degli effetti a breve e medio termine degli interventi.

Con l'installazione delle stazioni a Malamocco e Chioggia, nel maggio del 2022, è stata completata la realizzazione di un sistema di osservazione in tempo quasi reale della torbidità alle bocche di porto della laguna di Venezia, in prossimità delle barriere mobili. I dati, associati a quelli registrati dalle stazioni correntometriche CVN già presenti, permetteranno di descrivere le variazioni del trasporto nel sistema bocche tidali-litorali.

A queste informazioni sarà possibile integrare, previa l'adozione di un protocollo operativo per la conduzione del monitoraggio da parte di Provveditorato-CVN, i dati di concentrazione di particolato e/o torbidità derivati dalla conversione del backscatter acustico degli ADCP installati al fondo delle bocche che, nell'ambito del progetto, sono stati utilizzati per la sperimentazione della metodologia di stima del flusso solido. Una opportuna estensione delle attività di calibrazione post-progetto che includa anche le diverse condizioni meteomarine e idrodinamiche consentirà di consolidare la procedura e di acquisire serie temporali del flusso solido alle bocche di grande utilità per le valutazioni sulle tendenze in atto a MOSE operativo.

I dati, raccolti in maniera continuativa durante il progetto Venezia2021, in cui è stato testato e collaudato il sistema di barriere mobili in diverse modalità operative in situazioni reali di acqua alta, consentono di evidenziare dettagli dei pattern del trasporto a diverse scale spazio-temporali estendendo il quadro conoscitivo dello stato dell'ambiente lagunare. I dati delle osservazioni sperimentali sono funzionali alla messa a punto dei modelli in grado di descrivere i processi idrodinamici, l'erosione, la deposizione e il

trasporto di sedimenti e i processi biologici ad essi accoppiati permettendo valutazioni preliminari degli effetti sulla morfodinamica e l'ecosistema lagunare legati all'utilizzo del MOSE. Ulteriori indagini sugli effetti idrodinamici legati alla chiusura delle bocche effettuate ad hoc in fase post-progetto permetteranno anche di investigare la ricaduta di diverse strategie di movimentazione delle paratoie.

I rilievi morfobatimetrici ad alta risoluzione, eseguiti nell'ambito del progetto, hanno consentito di mappare con grande dettaglio i fondali e le forme di fondo nelle tre bocche di porto (Lido, Malamocco e Chioggia). È stato quindi possibile evidenziare le aree dove si è verificata una maggiore dinamicità, avvalendosi anche del confronto con dati acquisiti mediante precedenti monitoraggi. I monitoraggi effettuati restituiscono inoltre una fotografia dello stato attuale della morfologia delle bocche di porto, necessario punto di riferimento per studiarne l'evoluzione mediante futuri auspicabili monitoraggi.

Per quanto riguarda l'indagine acustica sulle biomasse, gli obiettivi prefissati ad inizio progetto si possono dire raggiunti, in quanto, mediante le tecniche di campionamento impiegate e le successive analisi geo statistiche, è stato possibile stimare le biomasse di organismi nectonici presenti nelle tre bocche di porto ed evidenziarne le differenze in termini di densità, anche in relazione alle diversità morfologiche che sussistono tra i tre siti esaminati. Alla luce di queste considerazioni i risultati emersi sono importanti anche in ottica gestionale, in quanto l'utilizzo del MOSE, la sua entrata in funzione probabilmente sempre più frequente (poiché è atteso che aumentino in frequenza ed intensità i fenomeni di acqua alta) probabilmente creeranno un impatto sulle risorse monitorate.

Gli obiettivi del WP 1.1.4, prefissati a inizio progetto, che consistevano nella messa a punto di metodiche di barcoding per l'identificazione di specie da uova e larve e nella messa a punto di metodiche di analisi del DNA ambientale nella colonna d'acqua mediante metabarcoding sono stati raggiunti e superati grazie alla produzione di un primo dataset per quanto riguarda la caratterizzazione della comunità ittica e di invertebrati mediante analisi del DNA ambientale che costituisce un benchmark di riferimento rispetto a cui valutare i potenziali impatti del sistema MOSE quando questo avrà una piena operatività.

Gli obiettivi del WP1.1.5, che erano quelli di identificare la presenza di variazione genetica temporale nelle due specie ittiche (il go, *Zosterisessor ophiocephalus*, ed il latterino, *Atherina boyeri*) e nelle due specie di invertebrati (il mitilo, *Mytilus galloprovincialis*, e il granchio verde, *Carcinus aestuarii*) e di studiare tale variazione in relazione ai pool genetici dei popolamenti delle lagune adiacenti, sono stati pienamente raggiunti. I dati raccolti permetteranno di valutare l'entità della variazione temporale nel futuro prossimo e di testare l'ipotesi che l'eventuale riduzione degli scambi laguna-mare legata all'attivazione del sistema MOSE possa condurre ad un incremento delle variazioni temporali, sia attraverso una riduzione del reclutamento sia attraverso la riduzione complessiva della dimensione delle popolazioni lagunari.

#### **Autori del documento**

L. Zaggia (CNR-IGG)

A. Berton, V. Rossi (CNR-IGG)

G. Lorenzetti, G. Manfè, G. M. Scarpa,

F. Braga, F. Madricardo, A. Petrizzo,

D. Galvez, L. Dametto (CNR-ISMAR)

F. Pranovi, M. Anelli Monti (DAIS-UNIVE)

L. Zane, I.A.M. Marino, F. Barca,

G. Cananzi (UNIPD)