



Venezia2021

Programma di ricerca scientifica per una laguna “regolata”



Breve sintesi dei principali risultati
di maggiore interesse per le
Pubbliche Amministrazioni
conseguiti al termine del secondo
anno di ricerca

10/06/2021

**Ministero delle infrastrutture e
della mobilità sostenibili**
PROVVEDITORATO
INTERREGIONALE PER LE OPERE
PUBBLICHE Veneto – Trentino-
Alto Adige – Friuli Venezia-Giulia

Linea 1.1 Scambi laguna-mare di acqua, materiale particolato e organismi e processi erosivi

La Linea di ricerca 1.1 ha come obiettivo lo studio dei flussi laguna-mare attraverso il sistema di bocche tidali della laguna di Venezia e dei processi erosivi nelle aree più critiche come le stesse bocche e i canali di grande navigazione. Si tratta di due aspetti fondamentali nell'evoluzione morfologica del bacino lagunare e del suo ecosistema, anche in relazione alla futura gestione dei flussi attraverso le bocche. Le ricerche in corso consentono il monitoraggio dei flussi di scambio a partire dalle informazioni acquisite dai sistemi osservativi già in esercizio presso le bocche di porto affiancando alle serie temporali specifiche attività di calibrazione e approfondimento utili alla validazione e all'integrazione dei dati disponibili. I risultati delle attività sono disponibili per le PP.AA. interessate alla salvaguardia della laguna.

Per quanto riguarda la parte fisica, le attività sperimentali svolte hanno permesso di elaborare le [serie temporali della portata idrica attraverso le bocche di porto dall'inizio del progetto fino a febbraio 2021, a beneficio della modellizzazione dei processi e della gestione dei sistemi di difesa dalle acque alte](#). Inoltre, la calibrazione del backscatter acustico acquisito dalla strumentazione per la misura della portata consentirà di ottenere le serie temporali del flusso solido completando le osservazioni di superficie delle stazioni fisse per la misura in continuo della torbidità. [L'integrazione delle osservazioni sperimentali in campo con le mappe di torbidità derivate da satellite ha consentito di effettuare un'analisi sinottica dei processi di trasporto](#) sia nelle aree di pertinenza delle bocche tidali (litorali, delta tidale interno ed esterno), sia nelle aree più interne del bacino lagunare. Questo ha consentito di rilevare elementi di novità nelle dinamiche di scambio fra mare e laguna e l'effetto degli impatti antropici. Con riferimento alla figura 1, nei litorali a NE della bocca di porto di Lido è ben visibile la risospensione dovuta alle onde, generate da un vento che ha raggiunto i 21 ms^{-1} da E-NE. In questa particolare situazione di stasi del flusso, il materiale sospeso non ha ancora iniziato ad entrare in laguna anche se nel lato nord del

canale di bocca si intravede un inizio del processo.

Relativamente allo studio dei processi erosivi, sono state integrate diverse metodologie sperimentali fra cui rilievi morfobatimetrici ad alta risoluzione, rilievi batimetrici con veicoli autonomi di superficie e tecniche remote sensing (immagini satellitari e aerofotogrammetria da drone). Queste attività hanno consentito una [mappatura di dettaglio degli effetti dell'erosione sulle strutture antropiche adiacenti ai canali di navigazione e sulla morfologia lagunare preesistente](#), recentemente riesumata dai processi erosivi e anch'essa oggetto di rapido smantellamento.

[Per quanto riguarda la componente biomassa, le tecnologie di rilievo acustico hanno consentito di completare la mappatura delle tre bocche di porto nelle diverse condizioni stagionali](#). I dati raccolti permettono di rilevare densità differenziali, con le bocche di Malamocco e Chioggia che presentano i valori più elevati rispetto a quella del Lido. Tale differenza sembra, almeno in parte, riconducibile alle diverse profondità delle bocche stesse. Non sembrano invece esserci differenze nelle dimensioni medie degli organismi rilevati, né della loro posizione nella colonna d'acqua.

Grazie al sequenziamento massivo del DNA ottenuto da campioni di acqua, le analisi del DNA ambientale hanno permesso di [rilevare le sequenze di 48 diverse specie ittiche e di 75 specie di invertebrati](#). La metodica consente il [monitoraggio spaziale e temporale della biodiversità lagunare](#), complementando le informazioni ottenibili da più complessi campionamenti biologici.

Infine, le analisi di genetiche di popolazione, effettuate su specie chiave lagunari, hanno permesso di [identificare significative differenze temporali nella composizione del pool genetico di specie di pesci e di granchi, indicando la possibilità di fenomeni di erosione genetica in corso](#). I dati forniscono le basi per monitorare i cambiamenti nel tempo della variabilità genetica in relazione alle variazioni negli scambi

laguna/mare ed all'aumento dell'isolamento e

della deriva genetica delle popolazioni lagunari.

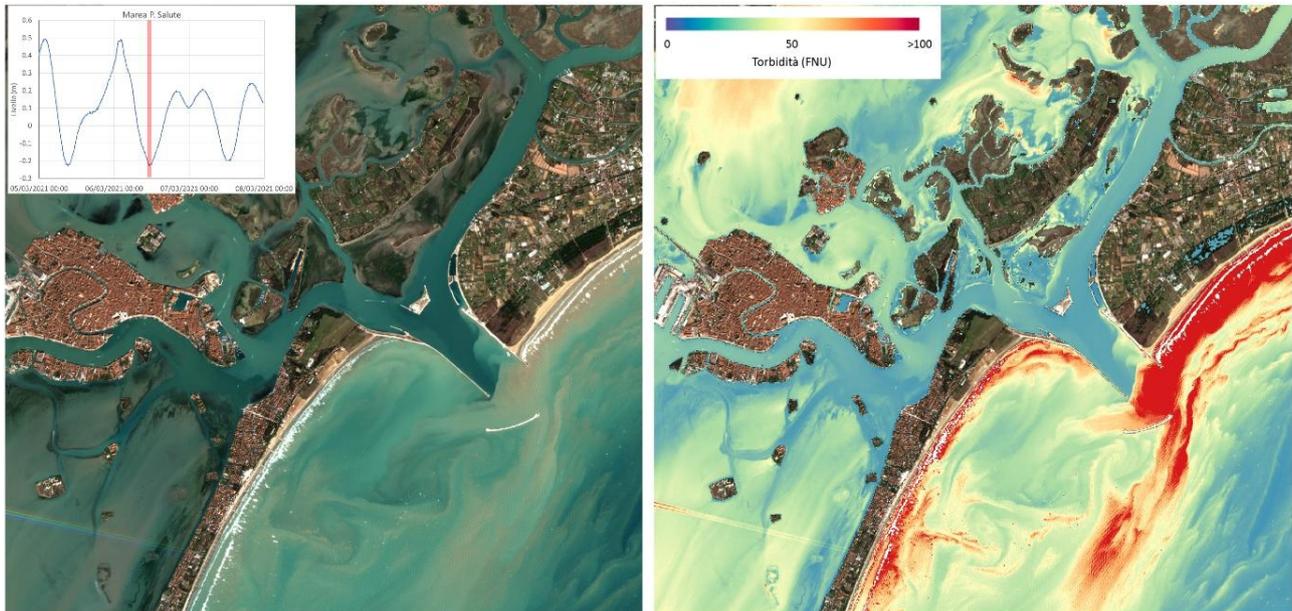


Figura 1. Immagine acquisita dal satellite Sentinel-2 (L2A RGB) del 6/3/2021 e relativa mappa di torbidità; è riportata anche la marea del periodo con indicato l'istante di ripresa dell'immagine. Sui litorali a NE della bocca di porto di Lido è ben visibile la risospensione dovuta alle onde, generate da un vento che ha raggiunto i 21 ms⁻¹ da E-NE. In questa particolare situazione di stasi del flusso, il materiale sospeso non ha ancora iniziato ad entrare in laguna anche se nel lato nord del canale di bocca si intravede un inizio del processo.

Linea 1.2 Apporto in laguna di acque e materiale solido da due tributari del bacino scolante

L'obiettivo della Linea è stimare il carico di particolato veicolato nella laguna di Venezia dal fiume Dese e dal canale Osellino e investigare i processi che regolano il suo trasferimento agli apparati di foce e alle aree a basso fondale direttamente connesse. Il particolato veicolato dal bacino scolante è un materiale prezioso, essenziale per contrastare l'appiattimento della laguna e l'impoverimento della *morfo diversità*. Al contempo, un suo deposito in eccesso nelle aree a basso fondale prossime alle foci può determinare l'interrimento di canali secondari e *ghebi*, aumentando la stagnazione delle acque.

Su ciascuno dei due tributari, una stazione di misura acquisisce in continuo i valori di portata e attraverso una misura di *backscatter* viene stimato il carico solido. Una terza stazione di misura è operativa sul Canale di S. Maria (una derivazione del fiume Dese) per la misurazione del trasporto solido verso la Palude di Cona. Attraverso misure periodiche -effettuate da bordo di imbarcazioni o utilizzando un veicolo autonomo di superficie- e l'analisi di campioni d'acqua, viene progressivamente affinato il calcolo delle portate e del carico solido e investigata la circolazione nell'area di estuario. Al verificarsi di eventi di piena, il trasporto solido viene misurato grazie all'impiego di autocampionatori e le caratteristiche meteorologiche dell'evento vengono ricostruite

in ambiente GIS utilizzando i dati di precipitazione oraria, disponibili in varie stazioni dei sottobacini scolanti.

Mappe batimetriche di dettaglio degli alvei e dei bassi fondali, che sono fondamentali sia per lo studio della circolazione idrica che per quello morfologico, sono state acquisite nei settori di maggiore interesse degli estuari e in particolari sezioni di riferimento, utilizzando un veicolo autonomo di superficie dotato di ecoscandaglio e un drone. Ortofoto vengono elaborate attraverso modelli digitali per ottenere batimetrie esportabili in ambiente GIS. L'insieme delle informazioni acquisite e le metodologie di indagine sviluppate dalla Linea sono di utilità nella gestione idraulica a morfologica dell'interfaccia terraferma-laguna.

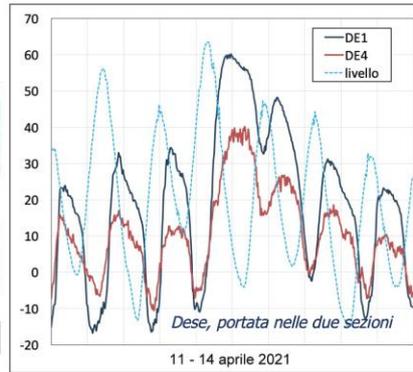
Grazie all'uso di trappole per sedimento, si stanno acquisendo stime in serie temporale del flusso di deposizione apparente del particolato, negli alvei e nei bassi fondali; tali flussi vengono messi in relazione con gli eventi precipitativi, l'andamento delle portate e del carico solido.

Infine, attraverso l'analisi di carote di sedimento viene investigata la contaminazione generata dal sottobacino idrologico sull'apparato di foce e i processi che intervengono sulla morfologia del fondale e verrà quindi elaborata una mappa della contaminazione del sedimento.

Rilievi morfologici



Misure di portata e trasporto solido



Indagini sui sedimenti nelle aree di foce

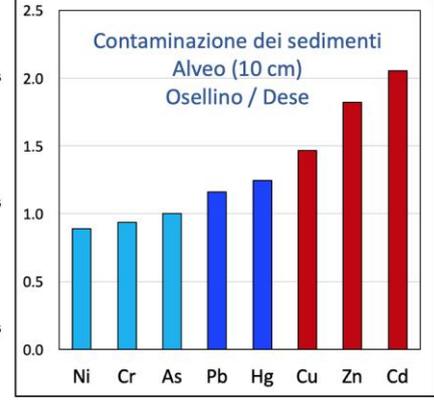
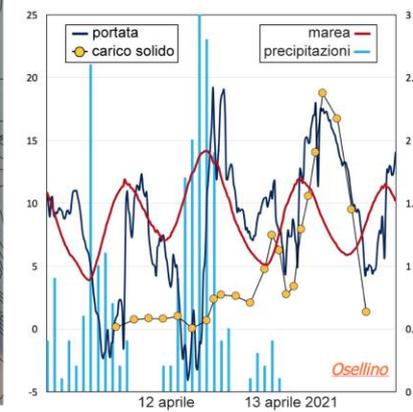
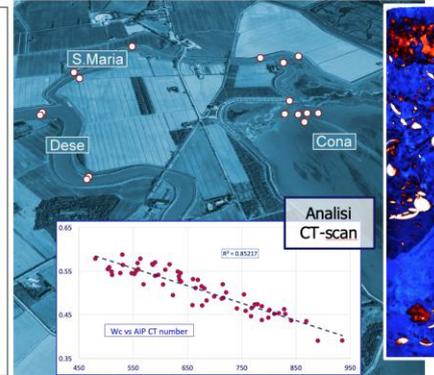


Figura 2. Articolazione delle attività della Linea di ricerca ed esempi di risultati.

Linea 1.3 Modellazione numerica integrata del sistema bacino scolante-laguna-mare

La Linea include attività di modellazione con obiettivi significativi sia relativamente ai singoli modelli (idrologici, idrodinamici, di trasporto, biogeochimici), sia alle sinergie e al confronto tra i modelli stessi. L'obiettivo finale è quello di dimostrare l'utilità, anche a supporto di processi decisionali, di un modello accoppiato della circolazione dal bacino scolante, alla laguna, fino al mare.

Dal punto di vista dei modelli idrodinamici operativi, si è portata avanti l'assimilazione di dati di temperatura e salinità nel modello della laguna di Venezia. Le simulazioni effettuate hanno riguardato un periodo di test nell'anno 2018, nel quale si sono potute utilizzare le misurazioni dalle centraline della rete SAMANET. L'assimilazione dei dati, attraverso l'*Ensemble Squared root filter*, ha prodotto risultati assai diversi da quelli ottenibili in assenza di assimilazione e ha mostrato quantitativamente gli [effetti di due aspetti critici: la scarsità di osservazioni all'interno della laguna e l'approssimativa conoscenza dell'apporto di acqua dolce. Sono aspetti sui quali è importante un intervento incisivo da parte degli enti gestori.](#)

Il modello biogeochimico SHYFEM-BFM è stato esteso alla simulazione dello stato trofico delle acque. Il modello accoppiato tiene conto degli apporti di acqua e di sostanze (nutrienti, sostanze organiche) dai fiumi, degli scambi di acqua e sostanze, inclusi gli organismi planctonici, con il mare, tenendo conto delle condizioni meteorologiche (temperatura, irraggiamento, regime del vento) e mareali (livelli di marea). Il modello è stato utilizzato per rappresentare lo stato trofico della laguna di Venezia nell'anno 2005, anno di riferimento, e sono in via di sviluppo le simulazioni relative agli anni 2008 e 2019, oltre che la simulazione di scenario di Laguna regolata dal MoSE. Anche qui emerge l'importanza di osservazioni di riferimento per poter validare la modellazione sistematiche e ben distribuite nello spazio.

Utilizzando gli strumenti modellistici messi a punto dai due gruppi di ricerca di UNIPD e CNR sono stati analizzati gli effetti prodotti dalle recenti chiusure del MoSE sui livelli interni alla laguna e sugli scambi idrodinamici tra mare e laguna. Con alcune differenze di impostazione e parametrizzazione, entrambi i modelli sono in grado di simulare la propagazione della marea all'interno della laguna, gli effetti sui livelli dovuti alla presenza di vento e quelli conseguenti alla chiusura delle paratoie mobili. Si sottolinea che la disponibilità di modelli con struttura e ipotesi diverse rappresentano una ricchezza, piuttosto che una sovrapposizione. [Il loro uso congiunto, infatti, permetterebbe di sostenere con maggiore robustezza i processi decisionali di gestione del MoSE e della laguna](#) (ad es. sulle quote ottimali di chiusura del MoSE o sui possibili effetti di chiusure parziali). Sono stati analizzati gli eventi di "Acqua Alta" per i quali è entrato in funzione il MoSE nel periodo 3 ottobre - 12 dicembre 2020. Per ciascun evento è stato condotto, dapprima, il calcolo considerando la manovra di chiusura delle bocche, verificando mediante confronto con i livelli misurati l'effettiva capacità dello strumento modellistico di riprodurre l'idrodinamica lagunare durante la chiusura delle paratoie del MoSE. Successivamente si è ripetuto (solo con il modello UNIPD per il momento), il calcolo della dinamica dei livelli nell'ipotesi di mancata attivazione del MoSE. A titolo di esempio, in figura si riporta il confronto tra livelli osservati e modellati in corrispondenza delle stazioni di Punta della Salute relativi alla chiusura del 3 ottobre 2020: il livello massimo in mare non corrisponde a quello che si sarebbe registrato nelle stazioni interne qualora il MoSE non fosse entrato in funzione (fatto ben noto e supportato dalle registrazioni di marea del passato), pertanto, [solo lo strumento modellistico può quantificare il reale beneficio, in termini di riduzione dei livelli, dell'utilizzo del MoSE.](#)

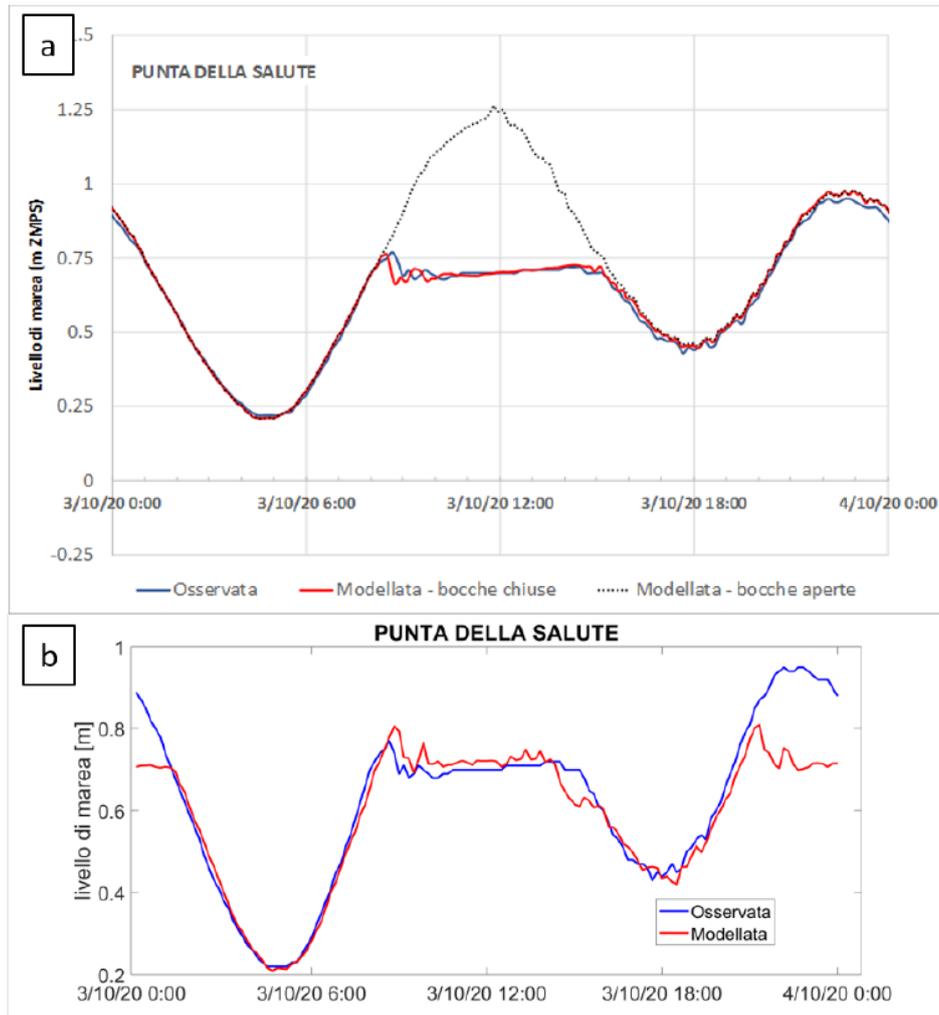


Figura 3. 3 ottobre 2020, confronto tra livelli misurati (linea blu) e livelli modellati nell'ipotesi di attivazione (linea rossa) e di mancata attivazione (linea nera tratteggiata) del MoSE presso la Stazione di Punta Salute. a) Risultati ottenuti con il modello UNIPD; b) Risultati ottenuto con il modello CNR

Linea 1.4 Rilevazione e previsione di eventi anossici con metodologie di remote sensing

Negli ultimi decenni, la crescita eccessiva di macroalghe in condizioni eutrofiche nella laguna di Venezia ha provocato il verificarsi di crisi anossiche durante il periodo estivo. A partire dagli anni '90, una notevole riduzione delle fioriture di macroalghe, in particolare di *Ulva* spp., ha portato ad una progressiva riduzione di crisi distrofiche; tuttavia, negli ultimi anni, si sono registrati casi ricorrenti di eventi anossici per lo più localizzati nella laguna centrale, che hanno rapidamente peggiorato la qualità dell'ecosistema, pregiudicandone l'uso come risorsa naturale per la pesca, l'acquacoltura e le attività ricreative. [La comprensione di questi fenomeni è fondamentale per poter definire delle strategie di mitigazione delle conseguenze indesiderate \(morte di pesci, odori sgradevoli\) per la salute della popolazione e il turismo.](#)

La Linea ha l'obiettivo di identificare e mappare le aree interessate da eventi anossici nelle immagini da satellite di archivio e in tempo reale in quelle di nuova acquisizione per la durata del progetto. Nel corso del progetto si è osservato che le crisi distrofiche in laguna di Venezia sono associate ad una perturbazione del ciclo dello zolfo con la formazione di acque biancastre, dovute alla presenza di zolfo colloidale e visibili da satellite. A questo scopo è stata sviluppata una [metodologia per individuare la presenza delle acque biancastre](#) (proxy di anossie) [nelle immagini satellitari](#) Landsat 8 (NASA) e Sentinel-2A e B (programma europeo Copernicus) che ha permesso di analizzare la variabilità spazio-temporale delle crisi anossiche e supportare l'analisi dei processi e delle condizioni al contorno che le hanno causate per il periodo 2013-2018. La stessa metodologia è stata applicata in tempo

reale alle immagini acquisite durante il progetto (maggio-settembre 2019-2020) per seguire la formazione e lo sviluppo degli eventi anossici e per guidare l'esecuzione di campagne di misura per la caratterizzazione ottica delle acque biancastre. Nel corso dell'estate del 2020 si sono verificati eventi di anossia con formazione di acque biancastre di breve durata e di piccola-media estensione nella zona tra il canale di Tessera e l'isola di Campalto e in laguna centrale in prossimità dell'isola di Sant'Angelo della Polvere.

L'analisi delle serie temporali (2013-2017) delle mappe di vegetazione sommersa, ottenute da satellite, hanno evidenziato una correlazione tra le aree a basso fondale con estese fioriture di macroalghe e il verificarsi di eventi distrofici, soprattutto durante i mesi di luglio e agosto caratterizzati da picchi di alta temperatura e scarso rimescolamento della colonna d'acqua. Ulteriori analisi statistiche dei dati delle stazioni di monitoraggio e simulazioni della dinamica dell'ossigeno disciolto in colonna d'acqua sono in corso.

Gli strumenti d'indagine sviluppati e i risultati attuali possono fornire informazioni rilevanti per gli enti competenti che si occupano di tutela ambientale, [non solo per comprendere gli effetti climatici a lungo termine, ma anche per lo studio della variabilità e dei cambiamenti a breve termine associati alle pressioni locali.](#) Inoltre, considerato che la metodologia sviluppata identifica, in modo automatico e in *near real time*, la presenza di acque biancastre, questo permette di [allertare le strutture competenti per eventuali rilevazioni ed accertamenti durante l'evento.](#)

Sentinel-2 del 6 agosto 2020

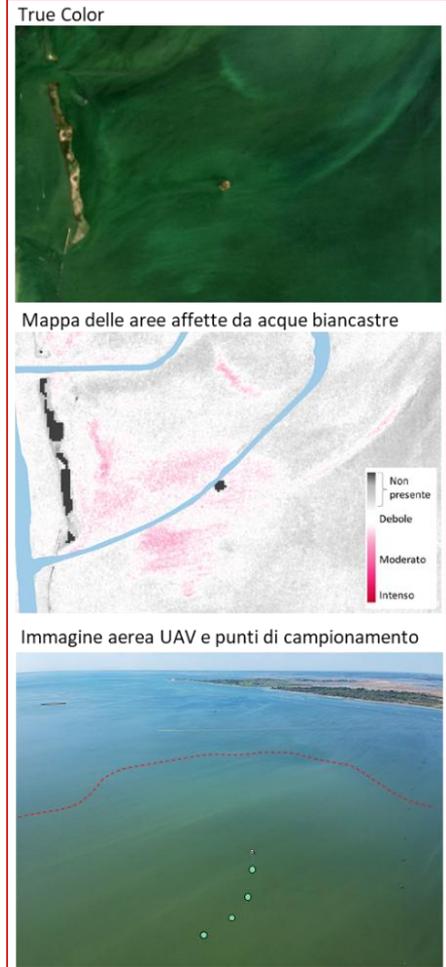


Figura 4. Evento di anossia, con formazione di acque biancastre di breve durata e di piccola-media estensione, del 6 agosto 2020.

Linea 2.1 Scambi laguna-mare di acqua, materiale particolato e organismi e processi erosivi

Le attività portate avanti nell'ultimo anno hanno visto il completamento dei campionamenti previsti nei canali navigabili (fustelle da 1 m dal piano fondale in cinque siti nel Canale Vittorio Emanuele III e uno nel Canale San Felice). Le analisi chimiche, ecotossicologiche e di bioaccumulo previste sono in corso di svolgimento ed i risultati verranno successivamente integrati mediante un approccio *Weight of Evidence* innovativo, capace di includere anche le evidenze fornite da test trascrittomici (a livello di genoma degli organismi filtratori) nella [complessa valutazione della qualità dei sedimenti al fine di guidarne una corretta gestione](#).

Sono stati inoltre completati i campionamenti di sedimento su base stagionale in cinque stazioni con diversi livelli di pressione antropica e distribuite nei quattro sottobacini della laguna di Venezia. Il DNA metabarcoding e la metagenomica hanno permesso una fine caratterizzazione delle comunità microbiche dell'interfaccia acqua-sedimento. [I siti di campionamento](#), proprio in base alle loro peculiarità, [sono caratterizzati da comunità batteriche con differenze significative nel metabolismo e nelle funzioni relative a geni coinvolti nel processamento di contaminanti, nella patogenicità e nella resistenza agli antibiotici](#); come osservabile nel grafico in figura, infatti, le stazioni che mediamente hanno presentato una maggiore percentuale di questa tipologia di geni sono state Marghera e Tresse, maggiormente influenzate dalle attività umane (resistenza ad antibiotici) ed industriali (composti tossici). Al contrario, la minor presenza di questi geni nelle altre 3 stazioni ne evidenzia una situazione meno interessata da questi tipi di impatto.

Infine, con l'obiettivo di esplorare possibili ricadute del MoSE sulle attività di allevamento di molluschi bivalvi, sono proseguite le attività di monitoraggio su vongole filippine *R. philippinarum* e mitili *M. galloprovincialis* allevati in sei aree posizionate a diversa distanza dalla bocca di porto di Chioggia (in figura, a destra). Complessivamente, sono stati seguiti due cicli annuali di produzione: uno precedente all'entrata in funzione del MoSE (maggio 2019-maggio 2020) ed uno compreso tra maggio 2020 e maggio 2021, rappresentante il periodo in cui il sistema è entrato in funzione per la prima volta. Sui molluschi sono state effettuate rilevazioni periodiche di diversi parametri morfometrici e sono in corso analisi molecolari, cellulari e biochimiche volte a monitorare lo stato di salute degli animali. [Le analisi di inquinanti organici e metalli pesanti nel sedimento e nei tessuti degli animali \(bioaccumulo\) prelevati nel primo anno non hanno rilevato criticità](#), mentre stanno per essere analizzati i campioni raccolti durante il secondo anno di monitoraggio. I parametri morfometrici non hanno evidenziato ad oggi particolari variazioni tra i due anni. [Le analisi molecolari volte a caratterizzare i profili di espressione genica e del microbiota degli animali hanno evidenziato variazioni significative tra gli animali raccolti nelle diverse aree di allevamento, potenzialmente legate alle diverse caratteristiche chimico-fisiche delle aree di crescita degli organismi](#). Appena saranno completate le analisi per il secondo anno di campionamento, i profili di espressione genica, le comunità microbiche e i diversi indici cellulari e biochimici verranno confrontati tra i due anni di allevamento al fine di rilevare modificazioni potenzialmente riconducibili al funzionamento del MoSE. A questo fine verrà utilizzato il medesimo approccio *Weight of Evidence* precedentemente citato per la valutazione della qualità dei sedimenti.

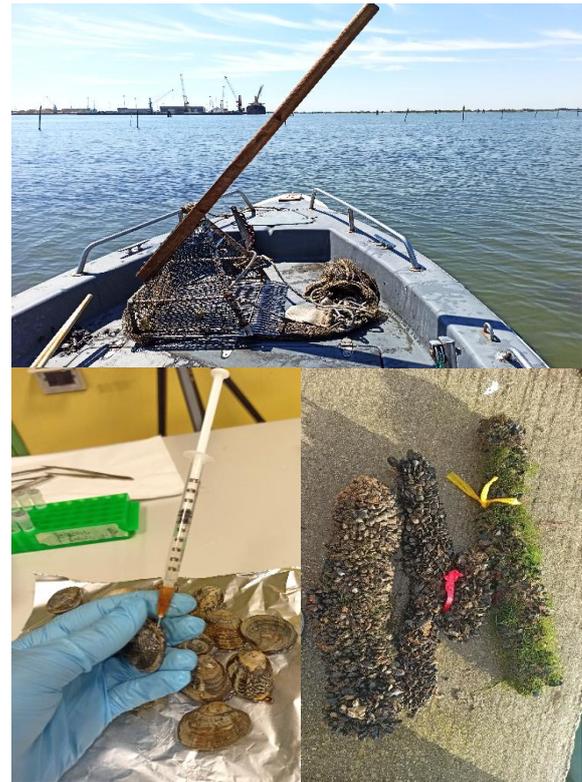
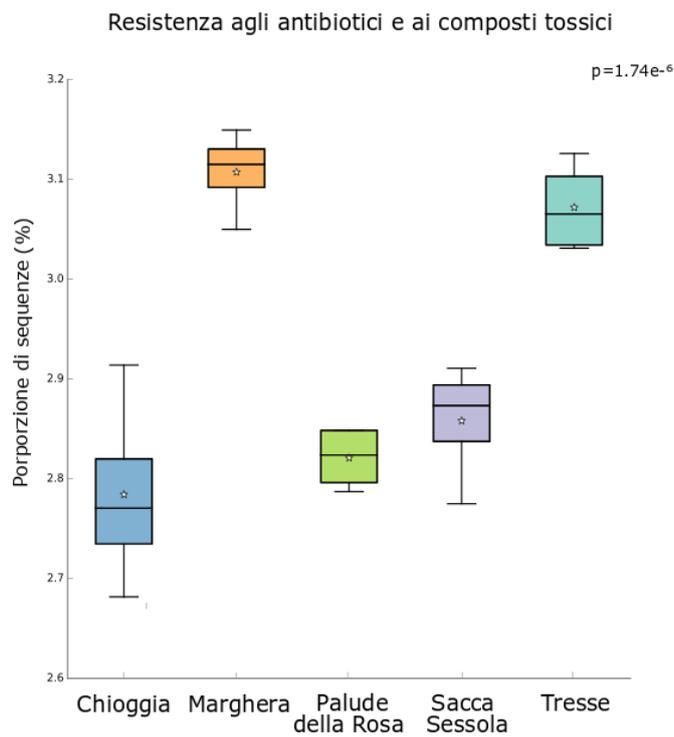


Figura 5. A sinistra, esiti della caratterizzazione delle comunità microbiche dell'interfaccia acqua-sedimento attraverso la tecnica del DNA metabarcoding. A destra, le specie su cui si effettuano le attività di monitoraggio: vongole filippine *R. philippinarum* e mitili *M. galloprovincialis*.

Linea 2.2 Inquinanti prioritari e rilascio di sostanze pericolose dal sedimento

La Linea studia le dinamiche che governano il ciclo del mercurio (Hg) nel sedimento e nelle acque interstiziali della laguna di Venezia, attraverso indagini di campo (camere bentiche), di laboratorio (analisi chimiche, studi di microcosmo) e di modellistica numerica (modelli biogeochimici). Lo scopo principale è quello di [migliorare la comprensione dei fattori idrodinamici e biogeochimici che favoriscono la produzione e l'export del MeHg \(mono-metilmercurio\) dai sedimenti e sviluppare strumenti in grado di simulare questi processi in maniera integrata. Il MeHg è una specie altamente tossica e bioaccumulabile che si trasferisce facilmente attraverso la catena alimentare](#), al punto che l'OMS ha redatto delle linee guida per limitare il consumo di prodotti ittici potenzialmente contaminati.

Viene investigato l'andamento della domanda di ossigeno del sedimento (SOD - uno dei fattori più rilevanti per la dinamica del MeHg) attraverso misure periodiche con camere bentiche realizzate ad hoc, condotte su 4 aree test lagunari. Le misure in campo sono accompagnate da determinazioni in laboratorio condotte con microelettrodi su microcosmi, per osservare i processi che determinano il consumo di ossigeno, sia nella colonna d'acqua che nel sedimento. Queste misure evidenziano differenti risposte stagionali da sito a sito in relazione alle condizioni chimico-fisiche stagionali dell'acqua, in particolare della temperatura. La sperimentazione è anche finalizzata allo studio dei processi che producono crisi anossiche nel periodo estivo ed è propedeutica ad un'attività di controllo della situazione in tutte le aree della laguna sensibili a tali eventi di degrado.

Una complessa sperimentazione sulla produzione e il rilascio di MeHg in due siti è stata effettuata in novembre 2019 (condizioni autunnali) e verrà ripetuta nel mese di agosto 2021, per permettere il confronto con una condizione estiva. Lo scopo è quello di investigare gli aspetti sia qualitativi che quantitativi del processo di produzione di MeHg dal sedimento, ovvero le relazioni tra le condizioni ambientali e la loro influenza sui

processi di rilascio del mono-metilmercurio e sulle sue concentrazioni.

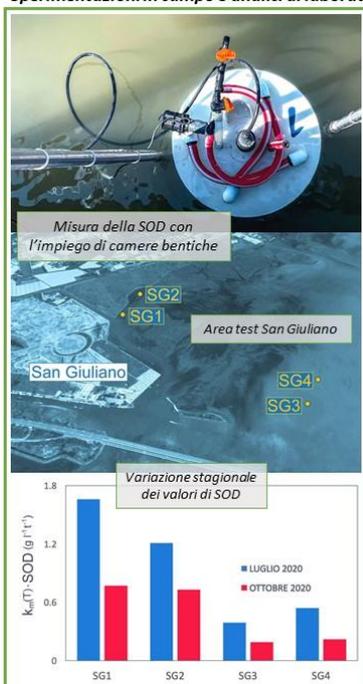
È stato sviluppato, testato e calibrato un modello integrato della dinamica del mercurio accoppiato ad un modello idrodinamico agli elementi finiti (SHYFEM) e ad un modello semplificato della dinamica dei sedimenti sviluppato appositamente all'interno di questo progetto. Il modello integrato permette di simulare dinamicamente i processi di trasporto e trasformazione delle specie del mercurio in laguna in un dominio ad alta risoluzione spaziale, [fornendo una stima dell'evoluzione delle concentrazioni e della distribuzione spaziale del Hg e MeHg in laguna](#) e, in generale, dei processi che non vengono investigati direttamente sul campo. Il modello integrato del mercurio è stato sviluppato sulla base delle conoscenze pregresse acquisite dalla comunità scientifica e verrà confrontato e integrato ove possibile con i nuovi dati prodotti nel progetto. Lo sviluppo di modelli biogeochimici consente anche di condurre analisi di scenario per esplorare l'effetto della variazione delle condizioni ambientali, come ad esempio, l'incremento della temperatura delle acque e le modifiche della circolazione e dell'idrodinamismo indotte dalla regolazione delle acque alte e dai cambiamenti climatici.

Un'analisi preliminare delle dinamiche attuali e degli scenari futuri di variazione dei carichi di mercurio alla laguna è stata svolta, nella prima fase del progetto, con il box-model WASP (Rosati et al., 2020*) ed è stata usata anche come riferimento per la scelta dei parametri nel modello ad alta risoluzione, che presenta costi computazionali più elevati. Il modello integrato ad alta risoluzione è stato inizializzato con concentrazioni spazialmente variabili delle specie del mercurio nei sedimenti, in accordo con i dati

* Rosati G., Solidoro C., Canu D. (2020) Mercury dynamics in a changing coastal area over industrial and postindustrial phases: lessons from the Venice Lagoon. Science of the total environment. Volume 74315. Article 140586.

di Zonta et al. (2018)[†] per il mercurio totale (HgT) e con le concentrazioni di MeHg estrapolate in base al lavoro condotto con il modello a box (Rosati et al., 2020). Dopo un anno di simulazione il modello predice un decremento del Hg inorganico nel sedimento: fino a 0.03 µg/g nella parte nord e centrale della laguna e un decremento più modesto, o in alcuni punti un leggero accumulo, nella parte sud (±0.01 µg/g per anno). Contrariamente al Hg inorganico, il MeHg tende ad aumentare nel sedimento di tutta la laguna (+0.0025 ng/g per anno) e in particolare nell'area centrale (fino a +0.15 ng/g per anno).

Sperimentazioni in campo e analisi di laboratorio



Modello biogeochimico integrato per il mercurio

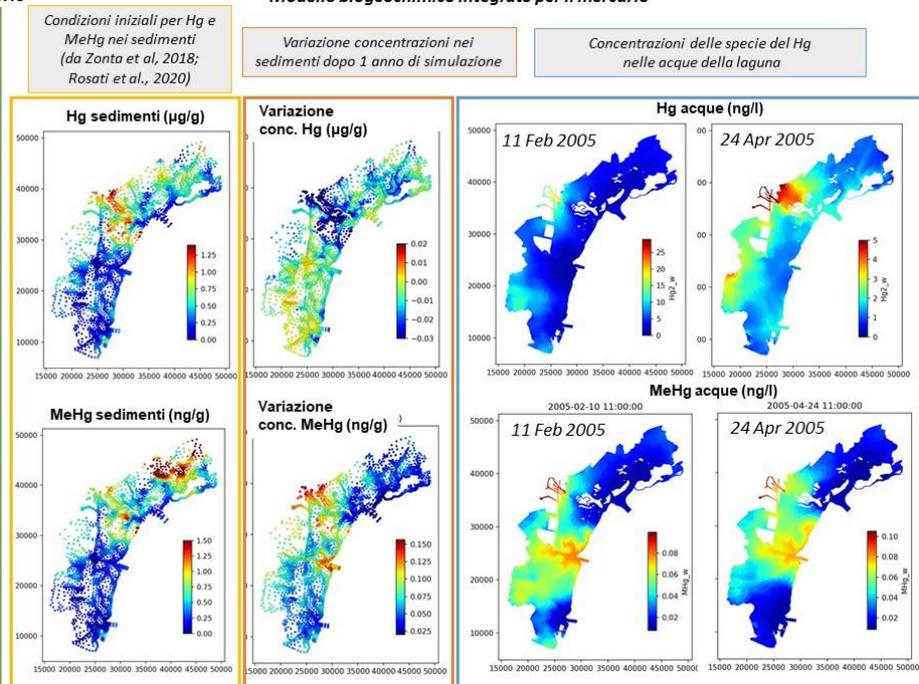


Figura 6. Articolazione delle attività della Linea di ricerca ed esempi di risultati,

[†] Zonta R., Botter M., Cassin D., Bellucci L.G., Pini R., Dominik J. (2018) Sediment texture and metal contamination in the Venice Lagoon (Italy): a snapshot before the installation of the MOSE system. Estuar. Coast. Shelf Sci. 205, 131–151

Linea 2.3 Contaminanti emergenti in laguna, esposizione ed effetti

La Linea ha lo scopo di approfondire la conoscenza sullo stato di contaminazione delle acque, sedimenti e biota della laguna di Venezia da parte dei contaminanti emergenti (CEC, *Contaminants of Emerging Concern*), di individuarne le principali sorgenti e di indagarne distribuzione e destino nell'ambiente lagunare, sia sperimentalmente che modellisticamente.

Attraverso i dati di esposizione, di effetti ecotossicologici e di rischio ambientale associato a questi contaminanti, verranno identificate quali sostanze richiedono di essere incluse in una *Watch List* specifica per la laguna di Venezia e, quindi, essere possibile oggetto di future attività di monitoraggio.

Dopo una prima fase di approfondita ricerca bibliografica, sono stati scelti 20 contaminanti emergenti da indagare, comprendenti erbicidi e pesticidi, farmaci e cosmetici, composti perfluoroalchilici (PFAS), bisfenolo A, microplastiche.

Per valutarne l'esposizione sono state eseguite 4 campagne di campionamento nelle 4 diverse stagioni, di acqua e sedimento, in 6 siti differenti (7 nelle ultime due campagne, con l'aggiunta del sito "Rio Marin"). I risultati delle 4 campagne sono attualmente in fase di completamento ed hanno evidenziato, finora, che i siti di campionamento della laguna nord (Sant' Erasmo e Foce del fiume Dese) e quello in prossimità dell'Ospedale di Venezia registrano generalmente concentrazioni maggiori degli altri siti, sia nelle acque che nei sedimenti. Tra gli inquinanti, dai dati preliminari, i neonicotinoidi sono i pesticidi da tener maggiormente sotto controllo, sia per le concentrazioni riscontrate, sia per la diffusione, che si dimostra ubiquitaria, raggiungendo aree generalmente poco inquinate della Laguna.

Alcuni contaminanti tra quelli analizzati, come sostanze estrogeniche, antibiotici e BHT (antiossidante di origine industriale), vengono quantificati più frequentemente nei sedimenti rispetto alle acque, riflettendo le diverse caratteristiche chimico-fisiche dei composti analizzati.

Dai dati di concentrazione acquisiti finora emerge quindi che, per un eventuale monitoraggio dei

CEC nella laguna di Venezia non va sottovalutato il ruolo dei sedimenti, che fungono sia da ricettori che da sorgente secondaria per la colonna d'acqua sovrastante.

Lo studio degli effetti dei CEC si è focalizzato inizialmente sullo sviluppo larvale nei bivalvi, in seguito è proseguito valutando gli effetti subletali a medio e lungo termine sui copepodi (*Acartia tonsa*), scelti come indicatore biologico per via del loro ruolo cruciale nella rete trofica lagunare in quanto consumatori primari e di detrito, nonché "riserva" di cibo per invertebrati e vertebrati della colonna d'acqua. I test di sviluppo larvale sono stati eseguiti sui neonicotinoidi e sulle fragranze ed hanno evidenziato un significativo ritardo nello sviluppo larvale a concentrazioni già inferiori a 10 ng L⁻¹ per alcune fragranze (exilsalicilato ed amilsalicilato), mentre i neonicotinoidi esercitano la loro azione tossica a partire da concentrazioni superiori a 100 ng L⁻¹. I test cronici, eseguiti solo sui neonicotinoidi, hanno messo in risalto come effetti sulla capacità riproduttiva dei copepodi si possano manifestare a concentrazioni inferiori a 10 ng L⁻¹ (thiacloprid e clothianidin).

Sono stati inoltre valutati gli effetti di alcuni CEC su bivalvi d'interesse commerciale per la laguna di Venezia, esposti in condizioni controllate a concentrazioni ambientali di singoli composti. A questo fine sono state applicate metodiche molecolari volte alla caratterizzazione dei profili di espressione genica e del microbiota, analisi cellulari e biochimiche e analisi chimiche per determinare l'eventuale bioaccumulo. In diversi esperimenti gli animali (vongole e mitili) sono stati esposti a glifosato e al suo metabolita AMPA, e alla fragranza amilsalicilato. Mentre le analisi dei campioni esposti ad amilsalicilato sono in corso d'opera, i risultati ottenuti dall'esposizione al glifosato e AMPA hanno sollevato ulteriori preoccupazioni sui potenziali effetti negativi di questi composti in specie marine. Infine, per la prima volta si sono valutati gli effetti del C6O4, un PFAS di nuova generazione, che sta sostituendo l'ampiamente utilizzato in passato PFOA, e che sta destando una crescente preoccupazione nella comunità scientifica e negli enti di controllo. Questo studio

ha messo in evidenza la [presenza di C6O4 e PFOA in basse concentrazioni nei tessuti di vongole provenienti dalla laguna di Venezia](#) (0.22 e 1.5 ng/g, rispettivamente). In condizioni sperimentali è stato dimostrato il possibile bioaccumulo di C6O4 nel corpo molle degli animali, nonostante il fattore di bioconcentrazione sia 5 volte inferiore a quello riscontrato nell'esposizione al PFOA. L'analisi molecolare e cellulare di animali esposti a questo composto ha dimostrato effetti simili a quelli riscontrati in seguito all'esposizione al PFOA.

La [valutazione modellistica dell'esposizione degli organismi lagunari a CEC](#) ha reso necessario innanzitutto lo sviluppo di un inventario delle emissioni di questi contaminanti nell'area oggetto di studio. Il carico medio annuale che giunge in laguna è stato stimato integrando informazioni sulle quantità di vendita regionali dei farmaci e dei prodotti fitosanitari con dati sulla distribuzione spaziale della popolazione e

del terreno agricolo. Per simulare il comportamento e il destino dei contaminanti nell'ambiente lagunare è stato parametrizzato e applicato un modello multicompartimentale di distribuzione e trasporto dei contaminanti nell'ambiente lagunare, con il quale è stata effettuata una stima preliminare delle concentrazioni nell'acqua e nel sedimento. I risultati modellistici ottenuti saranno affinati utilizzando i dati sperimentali ricavati dalle quattro campagne di campionamento. [Le stime di esposizione saranno successivamente integrate con la valutazione della pericolosità dei contaminanti emergenti per gli organismi lagunari](#) (ottenuta dall'elaborazione di dati di letteratura insieme ai risultati dei test ecotossicologici) [al fine di ottenere una stima del rischio ecologico di screening, volta a supportare lo sviluppo di una "Watch List" per la laguna di Venezia.](#)

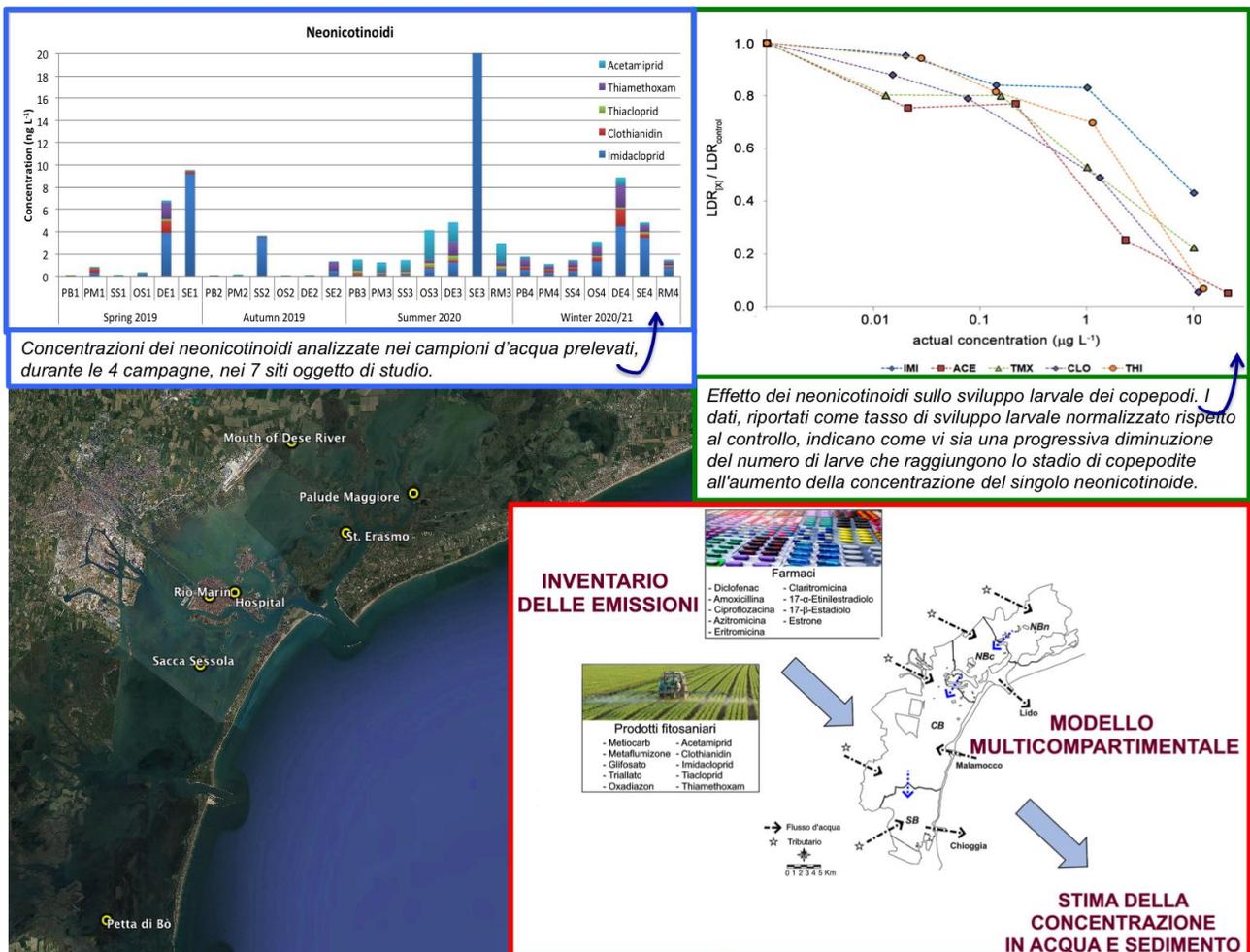


Figura 7. Articolazione delle attività della Linea di ricerca ed esempi di risultati.

Linea 3.1 Subsidenza della laguna di Venezia e evoluzione morfologica connessa a processi erosivi e deposizionali combinati a Relative Sea Level Rise

L'aumento del livello medio del mare a causa dei cambiamenti climatici combinato con la subsidenza del suolo, ovvero il *Relative Sea Level Rise*, è uno dei processi che più pesantemente minaccia le pianure costiere di tutto il mondo. L'idea concettuale della ricerca condotta dalla Linea 3.1 si basa su due punti chiave:

- 1) ad un aumento del livello medio del mare che può essere considerato spazialmente omogeneo a scala del bacino nord Adriatico si contrappone una dinamica verticale del suolo, in particolare la subsidenza, caratterizzata da una notevole variabilità;
- 2) i tassi di subsidenza naturale nella pianura costiera alto adriatica sono principalmente controllati dalla compattazione dei sedimenti superficiali, in particolare dei depositi olocenici.

La Linea 3.1 si è quindi posta come obiettivi [la quantificazione della subsidenza naturale ed antropica della laguna di Venezia, la caratterizzazione delle forzanti geologiche e la simulazione dell'evoluzione morfologica in considerazione dei processi erosivi e deposizionali combinati al Relative Sea Level Rise.](#)

Per raggiungerli, la Linea 3.1 si avvale di dataset di movimenti del suolo, di un esteso programma di indagini sismo-stratigrafiche e geo-meccaniche per caratterizzare il sottosuolo e di simulazioni numeriche per prevedere l'evoluzione delle morfologie lagunari in funzione del *Relative Sea Level Rise*.

Nel corso del progetto, è stata condotta una [valutazione della vulnerabilità al Relative Sea](#)

[Level Rise](#) considerando le condizioni morfologiche, idrografiche, l'eterogeneità dei movimenti del suolo e alcuni scenari disponibili di innalzamento del livello del mare (Figura A), ed è in corso l'analisi dei meccanismi che guidano il processo di subsidenza sia a scala regionale che locale.

Circa 300 km di rilievo sismico ad altissima risoluzione acquisiti nei bassi fondali lagunari hanno consentito lo [studio dell'architettura del sottosuolo, mappandone l'eterogeneità e l'individuazione dei livelli di riferimento per l'analisi integrata della subsidenza olocenica](#) (Figura C).

Due test di carico sperimentali realizzati in siti pilota hanno consentito di [definire le proprietà geo-meccaniche del sottosuolo](#) interessato dai processi sedimentari in atto nelle barene di Lazzaretto Nuovo e La Grisa (Figura B).

È stato implementato un modello geomeccanico accoppiato per l'interpretazione della prova di carico ed è in corso lo sviluppo di un modello 3D a griglia adattativa in grado di simulare le grandi deformazioni che caratterizzano la consolidazione naturale dei terreni superficiali del bacino lagunare. Questo permetterà di sviluppare [scenari previsionali della subsidenza naturale olocenica](#) attraverso la modellazione numerica che tiene conto del processo di subsidenza regionale, della sedimentazione, della compattazione indotta dal carico del nuovo sedimento e dall'erosione.

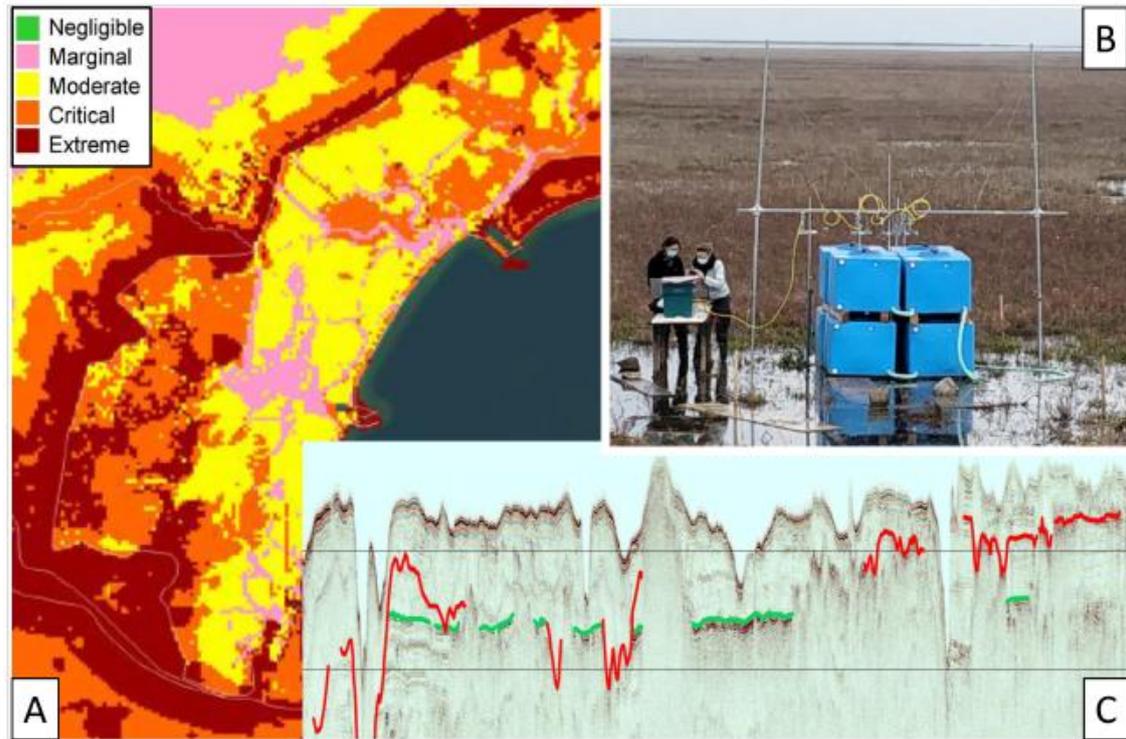


Figura 8. A) Analisi della vulnerabilità all'innalzamento del livello marino relativo. B) Prova di carico per la determinazione delle caratteristiche geo-meccaniche delle barene. C) Linea sismica che evidenzia l'architettura del sottosuolo lagunare: la linea rossa rappresenta il limite Pleistocene-Olocene; la linea verde un livello torboso; le aree colonnari opache rappresentano probabili risalite di gas.

Linea 3.2 Dinamiche erosive e morfosedimentarie in laguna di Venezia

Le attività della Linea si prefiggono di analizzare l'evoluzione bio-geomorfologica delle morfologie lagunari, ed in particolare delle superfici di barena e di bassofondale e delle reti di canali a marea che le innervano.

Le attività di analisi di dettaglio dei processi erosivi e deposizionali in zone critiche tramite *remote sensing* si sono focalizzate sul monitoraggio delle morfologie dei canali a marea (nelle aree del Canale Malamocco-Marghera e del canale San Felice), che sono state analizzate attraverso la mappatura morfobatimetrica ad alta risoluzione con strumentazione acustica (*multibeam echosounder*). Inoltre, si è svolta un'attività di sorvolo della barena San Felice, volta alla [realizzazione di un Modello Digitale del Terreno](#). Il modello superficiale ottenuto è stato quindi integrato con i rilievi batimetrici eseguiti mediante *multibeam echosounder*.

È stato sviluppato un [nuovo metodo per stimare l'abbondanza frazionaria delle diverse specie alofile e del suolo nudo](#) (che si basa su una classificazione Random Forest, Yang et al., 2020[‡]). Il metodo è stato applicato ad un'immagine multispettrale WorldView-2 acquisita per la barena San Felice, caratterizzata da un'elevata diversità delle specie di vegetazione (Figura, in alto). Questo è il primo fondamentale passo [per confrontare l'attuale distribuzione della vegetazione con distribuzioni spaziali passate e future al fine di monitorare le variazioni bio-morfologiche della superficie di barena](#).

I processi erosivi e deposizionali sono stati analizzati sulla base di indagini in campo condotte in modo continuativo a partire da ottobre 2018. In particolare, si è misurato l'apporto di sedimenti in 5 barene (San Felice, Sant'Erasmus, Conche, Fondo dei Sette Morti e Pagliaga) per effetto delle maree astronomiche e

meteorologiche, sulla base di 39 stazioni di misura distribuite lungo 13 transetti, per un totale di 1778 campioni di sedimento analizzati. Il pannello superiore della figura riporta, a titolo di esempio, i tassi di sedimentazione mediati sulle 12 stazioni nella barena San Felice da ottobre 2018 a gennaio 2021, assieme al livello di marea misurato in prossimità dell'area di studio. I periodi caratterizzati da livelli di marea più elevati per effetto di eventi meteomarinari particolarmente intensi (in particolare durante l'autunno), presentano tassi di sedimentazione molto maggiori rispetto agli altri periodi. Le analisi dimostrano che, [in media, il 70% della sedimentazione vitale per la sopravvivenza delle barene è legato agli eventi meteomarinari intensi, mettendo in luce il loro ruolo nei processi di accrescimento delle barene e le possibili conseguenze dei cambiamenti climatici](#) (es. aumento del livello del medio mare) [e delle attività antropiche](#) (es. regolazione dei colmi di marea e conseguente diminuzione dell'apporto di sedimento).

È stato infine sviluppato un nuovo modello eco-geomorfologico bidimensionale, spazialmente esplicito, in grado di simulare le dinamiche della vegetazione alofila sulle superfici di barena. Il modello è in grado di riprodurre le dinamiche spaziali della vegetazione non solo in funzione della qualità dell'habitat locale, ma anche in funzione di meccanismi locali di dispersione e competizione tra diverse specie. I pattern di vegetazione simulati sono in buon accordo con quelli osservati, evidenziando come il modello fornisca un valido [strumento per analizzare l'evoluzione eco-geomorfologica delle barene in risposta ai cambiamenti climatici e agli interventi antropici](#) (es. regolazione dei livelli di marea).

[‡] Yang Z., D'Alpaos A., Marani M. and Silvestri S. (2020) Assessing the Fractional Abundance of Highly Mixed Salt-Marsh Vegetation Using Random Forest Soft Classification. *Remote Sens.* 2020, 12, 3224; doi:10.3390/rs12193224

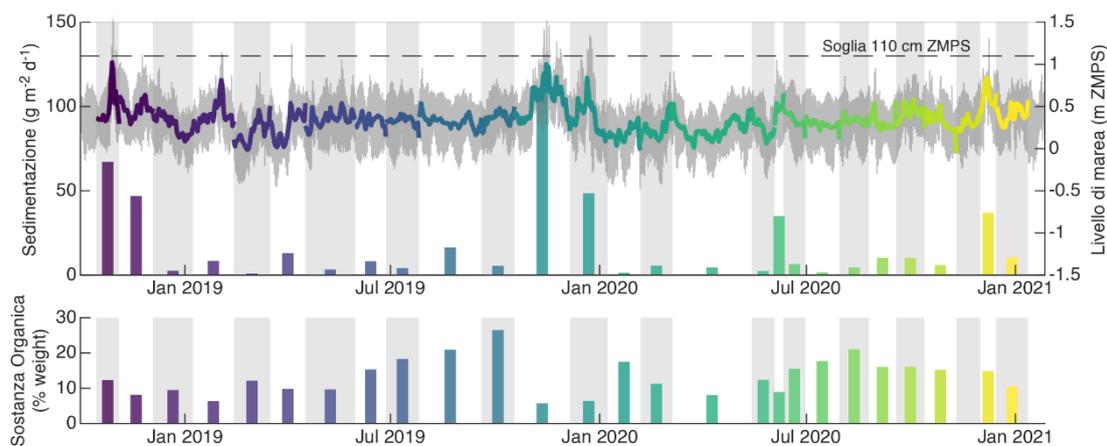
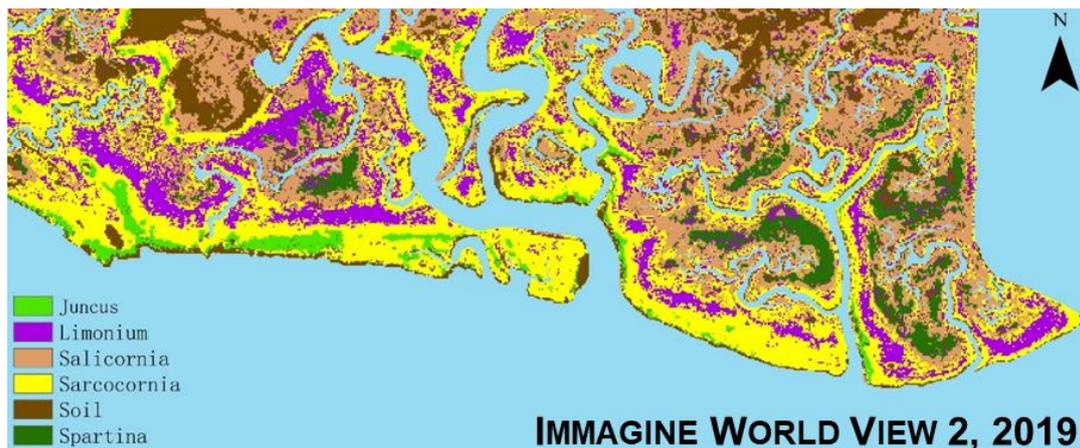


Figura 9. In alto: distribuzione spaziale delle specie alofile dominanti ottenute dalla classificazione dell'immagini WV2 del 2019, sulla base del nuovo algoritmo sviluppato (Yang et al., 2020). Al centro: andamento dei livelli di marea (orari in grigio e medi giornalieri a colori) e della sedimentazione media nella barena San Felice durante il periodo di osservazione. In basso: andamento nel tempo della percentuale di materia organica media durante il periodo di osservazione.

Linea 3.3 Produzione primaria, comunità microbica, bentonica, planctonica e nectonica lagunare

Lo scopo della Linea è di fornire dati aggiornati sulle diverse componenti biologiche e su alcuni fattori, quali la trofia, per contribuire alla comprensione dell'evoluzione del sistema lagunare, integrando i risultati con quelli delle altre Linee di ricerca del progetto Venezia2021. Attraverso l'applicazione di metodiche già sperimentate e tecniche nuove, la ricerca si è focalizzata sullo studio delle diverse componenti biologiche, a livello di comunità (microbiche, virali, planctoniche, macrofite, nectoniche) e di singoli organismi lagunari (pesci tipicamente lagunari e caratteristici delle bocche di porto; ostriche). I campionamenti delle diverse componenti hanno interessato l'intero sistema lagunare e hanno incluso il confronto fra aree poste a diversa distanza dalle bocche di porto, con l'obiettivo di rilevare i principali gradienti e le variazioni spaziali che interessano la laguna stessa. I dati raccolti vengono analizzati nell'ottica di studiare sia i cambiamenti rispetto al passato, grazie alla disponibilità di dati pregressi, sia le variazioni più recenti, effetto delle attività in corso alle bocche di porto e delle chiusure delle paratoie del MoSE.

Le attività condotte hanno incluso un'intensa attività di campionamento delle diverse componenti, sia in laguna che alle bocche di porto, e una sperimentazione attraverso mesocosmi (*enclosure*) per simulare eventi di riduzione dei ricambi idrici, come in occasione di eventi di chiusura del MoSE.

Le analisi sulle diverse componenti biologiche del sistema lagunare hanno messo in evidenza alcuni processi in atto. Per quanto riguarda le macrofite, nell'ultimo anno si è assistito ad un generale aumento sia delle fanerogame marine che delle macroalghe, soprattutto quelle di maggior qualità ecologica. In particolare, [le fanerogame marine, componenti molto importanti per l'ecosistema lagunare, hanno espanso il loro areale e si è verificata la ricolonizzazione dei fondali da parte di *Ruppia cirrhosa*, specie scomparsa dalla laguna libera alla fine degli anni '80.](#)

L'analisi della componente nectonica e, in particolare, dei primi stadi del ciclo vitale (uova e

larve di pesci), ha evidenziato l'importante ruolo della laguna per molte specie migratrici che si muovono periodicamente fra questo ambiente ed il mare. Le maggiori abbondanze di uova e larve di pesce sono state riscontrate in [tardo inverno-primavera, indicando l'importanza di questi periodi per il reclutamento dell'ittiofauna, e con differenze fra il mare e la gronda lagunare](#) (figura). Anche giovanili ed adulti di due specie tipicamente lagunari, il ghiozzo go e il latterino, utilizzate come specie modello, mostrano differenze fra le diverse aree, in particolare fra i tre sottobacini (settentrionale, centrale e meridionale), ad evidenziare come il [sistema lagunare fornisca una varietà di ambienti caratterizzati da diversi parametri dell'acqua e caratteristiche del fondale](#). Le bocche di porto, infine, costituiscono non solo la zona di passaggio e di scambi fra mare e laguna di diversi organismi, ma anche ambienti dove si riproducono due specie ittiche di valore commerciale, corvina e ombrina, studiate durante questo progetto, che producono suoni. Le analisi acustiche realizzate alle bocche di porto hanno anche messo in evidenza un elevato rumore di origine antropica.

L'analisi della componente planctonica e, per quanto riguarda la componente microbica, anche quella bentonica, nelle diverse zone della laguna ha permesso una caratterizzazione delle stesse e della loro variabilità spaziale e temporale e le relazioni con i parametri ambientali. Per quanto riguarda gli esperimenti in *enclosure*, le analisi dei campioni, ancora in corso, forniranno [dati importanti per valutare gli effetti della chiusura del MoSE sulle diverse componenti biologiche e sui parametri dell'acqua e del sedimento, alla luce anche delle chiusure prolungate che il MoSE ha avuto nel 2020.](#)

La Linea di ricerca ha infine esteso l'indagine sull'occorrenza dei *reef* di ostriche in laguna di Venezia e sulle relazioni con le caratteristiche ambientali, incluse le escursioni di marea, considerato l'importante ruolo di questi ambienti in sistemi costieri e lagunari.

I risultati delle analisi delle diverse componenti biologiche, della loro variabilità spaziale e

temporale e in relazione ai diversi parametri della laguna di Venezia, integrate con i risultati delle altre Linee di ricerca, andranno a costituire una base di partenza importante per la valutazione

sul medio e lungo termine degli effetti del funzionamento del MoSE sull'ecosistema lagunare.

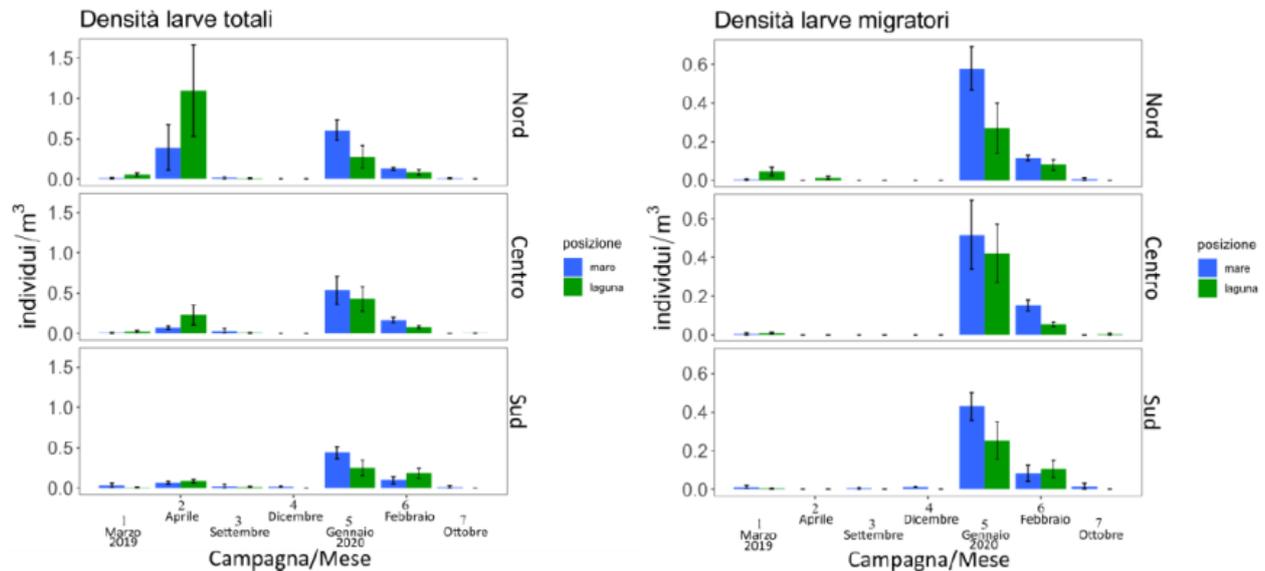


Figura 10. Densità totale delle larve di pesci e delle larve dei migratori nei tre sottobacini, in mare e laguna, e nei diversi mesi di campionamento.

Linea 4.1 Modellistica della catena trofica

Il mantenimento della biodiversità e dello stato di salute degli ecosistemi è un fondamentale obiettivo della collettività (che rientra negli UN-SDGs) e che è incluso in molti regolamenti che regolano gli interventi antropici. [Per la gestione degli ecosistemi è necessario l'utilizzo di strumenti \(*decision support tools*\) che consentano di valutare gli effetti delle attività umane sull'ambiente \(es. pesca, cambiamenti climatici, apporto di nutrienti, modifiche all'habitat\), i processi naturali e i servizi ambientali forniti \(es. prodotti ittici, riciclo dei nutrienti\).](#)

L'attività di Linea ha sviluppato un [modello dinamico e spazialmente esplicito dell'ecosistema lagunare descritto attraverso la rete alimentare](#) rappresentata da 36 gruppi funzionali che includono il plancton, i produttori primari, il macro-zoobentos, la componente nectonica e l'avifauna. Le attività di sfruttamento delle risorse lagunari rappresentate sono la pesca artigianale, la pesca ricreativa e raccolta delle vongole. Il modello ecosistemico 2D della laguna è sviluppato utilizzando *Ecopath with Ecosim and Ecospace* (EwE, www.ecopath.org) su un grigliato di 250m di lato e implementato grazie ad una consistente raccolta ed integrazione di dati raccolti in laguna nel corso degli anni da diversi Enti ed Istituzioni. Il sistema di informazioni raccolte include variabili ambientali e antropiche che influenzano la distribuzione delle specie rappresentate. Sono state impostate le forzanti principali per il modello, ovvero tutte le serie temporali disponibili di produzione primaria, densità di uccelli piscivori e capacità di pesca per

il periodo indicativo 2000-2018. Sono stati anche inseriti alcuni driver ambientali spazializzati (mappe) modificabili attraverso una routine denominata *habitat capacity*. In particolare, sono state integrate nel modello la mappa aggiornata di profondità (2003), tempi di residenza e di temperatura desunte dalla Linea 1.3. Esse rappresentano l'interfaccia con il mondo biogeochimico-idrodinamico e consentono di includere nella dinamica del modello alcuni effetti non trofici su alcuni gruppi funzionali principali.

La calibrazione del modello si è basata sulla modifica di alcuni parametri fondamentali relativi alle interazioni tra prede e predatori, e attraverso diverse simulazioni di calibrazione è stato ottenuto il set di parametri che consente le migliori capacità di riproduzione dei dati. I dati di produzione ittica provenienti da mercato e le catture per unità di sforzo sono state successivamente utilizzate per la validazione del modello nel tempo e nello spazio. Il modello mostra buone capacità di [rappresentare le dinamiche lagunari di *Atherina boyeri* e *Sparus aurata*, che sono importanti specie bersaglio della pesca, e dei signatidi, che sono legati all'habitat a fanerogame](#). I risultati del modello 2D sono stati utilizzati per [produrre indicatori di ecosistema che potrebbero risultare utili nella valutazione dello stato di salute lagunare](#). Il modello si presta quindi ad una analisi ad alta risoluzione dell'ecosistema lagunare e verrà utilizzato per [valutare effetti di scenari di regolazione della laguna anche attraverso la valutazione di indicatori](#).

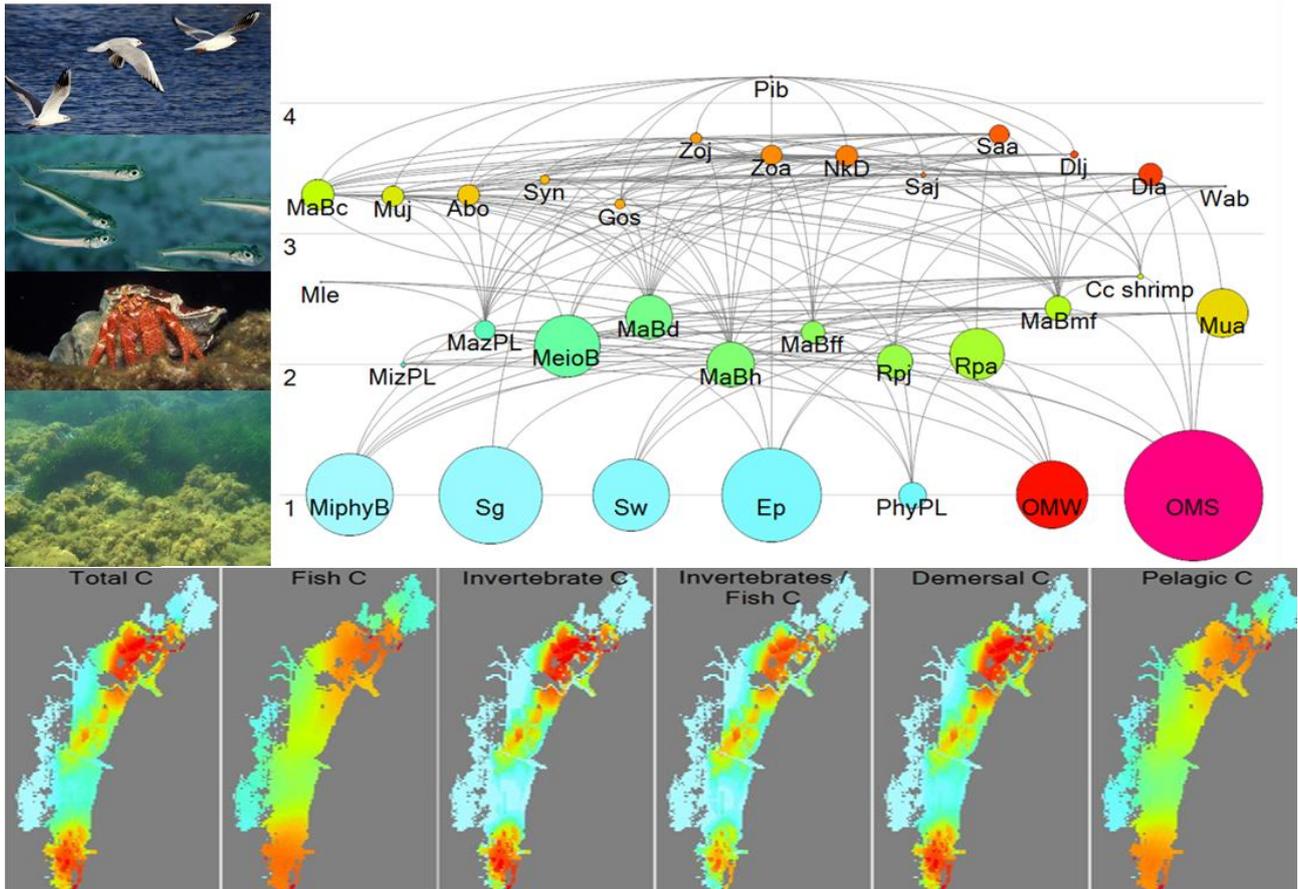


Figura 11. Schema della rete trofica lagunare in cui sono rappresentati i comparti autotrofi (livello trofico 1), erbivori/detritivori (livello trofico 2), carnivori primari (livello trofico 3) e predatori apicali (livello trofico 4). Alcuni taxa rappresentative dei comparti sono rappresentate a sinistra: epifitobentos, crostacei, latterino e uccelli piscivori. In basso, la rete trofica è rappresentata in modo dinamico su un grigliato 2D della laguna di Venezia che permette il calcolo del prelievo in termini di catture totali e per i principali taxa.

Linea 4.2 Servizi ecosistemici e gestione dell'ambiente lagunare

La Linea di ricerca si focalizza sui servizi ecosistemici (SE) forniti dall'ambiente lagunare, ovvero sul contributo offerto dall'ecosistema lagunare al benessere della società. L'uomo, infatti, trae una serie di benefici dal funzionamento ecologico della laguna, che vanno dal mantenimento di una buona qualità ambientale, attraverso processi di purificazione delle acque, attenuazione dei fenomeni erosivi e mitigazione dei cambiamenti climatici, fino allo svolgimento di attività produttive come pesca e vignicoltura, e ricreative, primo fra tutti il turismo, ma anche diportismo, educazione ambientale e attività tradizionali.

Il lavoro svolto su Servizi ecosistemici e stato ecologico dell'ecosistema lagunare, nel corso dell'ultimo anno, è consistito nell'analisi dei dati di mappatura dei servizi ecosistemici (SE), raccolti nelle precedenti fasi progettuali, concentrandosi, in particolare, sulla relazione tra SE e stato ecologico, definito ai sensi della Direttiva Acque come "espressione della qualità di struttura e funzionamento degli ecosistemi acquatici". I risultati evidenziano una scarsa correlazione tra SE e stato ecologico. Ciò potrebbe, almeno in parte, essere ricondotto al fatto che le unità spaziali utilizzate nell'ambito della Direttiva non colgono a pieno le differenze ecologiche che sono alla base del pattern di distribuzione dei SE in laguna, nonché alla natura "strutturale" degli indicatori di stato ecologico monitorati. È stata dunque esplorata la possibilità di [utilizzare i SE ai fini della definizione di una nuova zonazione che possa essere utilizzata per scopi gestionali](#) (figura). Utilizzando questo tipo di zonazione, è stata riscontrata una [concordanza tra indicatori funzionali di stato ecologico e sostenibilità dei SE, a supporto della potenziale applicazione di questo approccio a supporto della definizione/implementazione delle strategie gestionali in ambiente lagunare](#).

Per quanto riguarda la valutazione economica dei servizi ecosistemici, a gennaio 2021 è stato somministrato un questionario di analisi

congiunta, utilizzando il metodo CAWI, a un campione di residenti nella Regione del Veneto stratificato per sesso, età, educazione e reddito. Sono stati ottenuti 517 questionari completi e ben distribuiti tra le province del Veneto che hanno permesso di ottenere la [stima della disponibilità a pagare dei rispondenti per un'ipotetica politica regionale di miglioramento della qualità ambientale dell'ecosistema lagunare di Venezia](#). [Il valore economico totale complessivo stimato è compreso tra 143-167 euro per nucleo familiare](#) a seconda del modello utilizzato. Il valore economico totale aggregato stimato per la politica ipotizzata nell'indagine, che si sostanzia in una pluralità di azioni e misure che permettono il miglioramento, ripristino e conservazione dei SE della laguna di Venezia, è pari a circa 342 milioni di euro l'anno. In aggiunta al valore economico aggregato per la politica, il metodo dell'analisi congiunta permette di ottenere anche la [valutazione economica dei singoli SE considerati: servizi di habitat \(pari al 44,11% del valore complessivo stimato\), servizi culturali \(33,80% del valore complessivo\) e i servizi di regolazione \(22,09% del valore economico complessivo stimato\)](#).

La ricerca ha poi prodotto una verifica del trattamento dei principali SE lagunari negli strumenti di pianificazione, programmazione e regolazione vigenti, evidenziando la cosiddetta "domanda normata" di SE. Rispetto a questa, lo studio ha valutato la domanda espressa per alcune specifiche attività (pesca artigianale, sportiva, caccia, nautica ricreativa e a servizio del turismo, ecc.) che si svolgono in laguna, mostrando le forti interazioni positive e negative nella fornitura di "SE mediati" e "diretti". La ricostruzione del quadro degli attori che presidiano alcune attività, cioè i beneficiari di SE, consente di avanzare alcune ipotesi sul possibile loro coinvolgimento in una proposta di PES (*Payment for Ecosystem Services*), che interverrebbe ad integrazione di strumenti normativi più tradizionali.

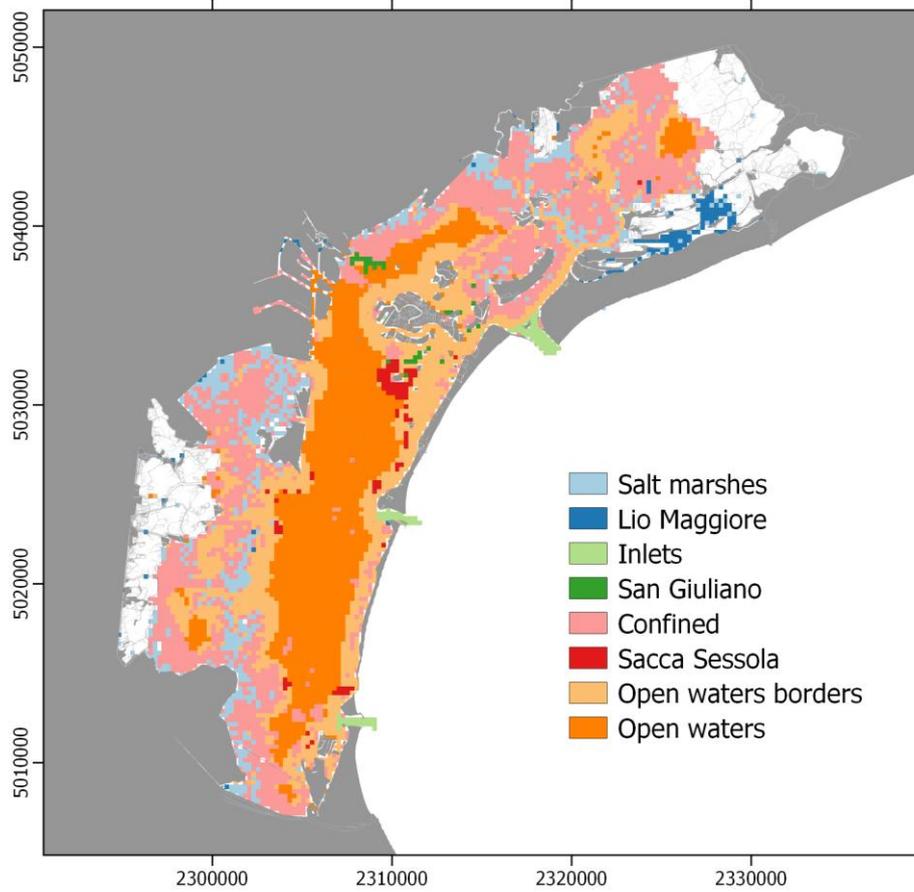


Figura 12. La zonazione della laguna in base ai servizi ecosistemici.

Linea 5.1 Scenari di cambiamento climatico per Venezia e la sua laguna

La Linea utilizza metodologie innovative diverse della geofisica, della statistica applicata e della modellistica numerica in un contesto altamente interdisciplinare al fine di [definire l'evoluzione più probabile di parametri meteo-climatici rilevanti per la valutazione di rischio ambientale nell'area veneziana nell'arco dei prossimi decenni e l'incertezza associata.](#)

È stata effettuata la review della letteratura sull'aumento del livello relativo del medio mare a Venezia, sia per quanto attiene le osservazioni storiche che le proiezioni per il 21° secolo. Nuove stime, in fase di revisione su un articolo sottomesso a Natural Hazard and Earth System Sciences, indicano [proiezioni di aumento del livello relativo del mare a Venezia per il 2100 tra 32 e 62 centimetri per lo scenario RCP2.6](#) (corrispondente ad uno scenario di evoluzione socio-economica compatibile con ridotte emissioni di gas serra in atmosfera) [e tra 58 e 110 centimetri per lo scenario RCP8.5](#) (lo scenario socio-economico più catastrofico tra quelli ritenuti plausibili, con sostenute emissioni di gas serra) (figura). Uno scenario plausibile ma improbabile dovuto a forte scioglimento delle calotte polari indica un aumento di circa 180 centimetri.

Sono state effettuate previsioni di medio termine (prossimi 15 anni) del livello relativo del mare a Venezia tramite modelli statistici. Le previsioni indicano tendenze inferiori a quanto ottenuto dalle simulazioni di scenario. Per cui, [secondo le nostre previsioni di medio termine, nei prossimi 15 anni ci potrebbe perfino essere una "pausa" nell'innalzamento del livello del mare a Venezia, analoga a quanto osservato ad esempio nel periodo 1960-1990.](#)

Sono state verificate le proiezioni climatiche attese (temperatura e piovosità) seguendo lo scenario di emissione RCP8.5, ottenute tramite due modelli regionali accoppiati atmosfera-oceano sviluppati all'interno del progetto MedCORDEX (modelli CMCC e CNRM a risoluzione bassa), e una versione ad altissima risoluzione del modello CMCC per l'atmosfera con downscaling dinamico fino a metà secolo. I risultati, su dominio della provincia di Venezia, indicano:

- i due modelli MedCORDEX focalizzati sul dominio di Venezia indicano un [aumento di temperatura atteso, sia durante l'inverno che d'estate, per metà del secolo, di 2°C/2.5°C](#). Sempre a metà secolo ma utilizzando invece il modello ad altissima risoluzione, si prevede un aumento delle temperature medie, minime e massime giornaliere che varia nell'intervallo da 1.2°C a 1.8°C, associato ad una traslazione della distribuzione statistica delle temperature (sia media che minima e massima) verso valori più alti.
- i due modelli MedCORDEX indicano un [aumento della temperatura invernale a fine secolo di circa 4.5°C/5.5°C](#) e un aumento più consistente della temperatura estiva, soprattutto se consideriamo i risultati del modello del CMCC che suggerisce un aumento di oltre 6°C sulle regioni costiere del Veneto.
- i modelli MedCORDEX indicano una comune tendenza verso variazioni trascurabili delle precipitazioni [a metà secolo](#). Al contrario, il modello CMCC ad altissima risoluzione indica una [diminuzione delle precipitazioni medie giornaliere estive ed un aumento delle precipitazioni medie giornaliere autunnali, associato all'aumento della frequenza degli eventi di forte intensità](#). La stima della precipitazione beneficia quindi molto dell'alta risoluzione.
- I due modelli MedCORDEX suggeriscono cambiamenti di precipitazione trascurabili durante l'inverno, mentre durante l'estate, quando il modello del CMCC indica riduzioni di piccola entità, il modello del CNRM suggerisce un aumento di precipitazione più incisivo, dell'ordine di 2-3 millimetri al giorno.
- il modello ad altissima risoluzione del CMCC indica un [aumento della velocità massima del vento medio giornaliero invernale che interessa l'Adriatico e il Nord della provincia a metà secolo](#) ed una prevalente diminuzione della velocità massima del vento nelle altre stagioni.

Sono state infine studiate le variazioni nell'intensità delle mareggiate per i prossimi 30

anni. Le analisi condotte hanno mostrato [una riduzione dell'intensità delle mareggiate nella parte settentrionale del Mare Adriatico, inclusa l'area in prossimità della laguna di Venezia, per il](#)

[periodo 2021-2050](#). Questo risultato è condiviso da entrambi gli scenari di emissione considerati per questa analisi, ovvero RCP4.5 (intensità di emissione di gas serra intermedia) ed RCP8.5.

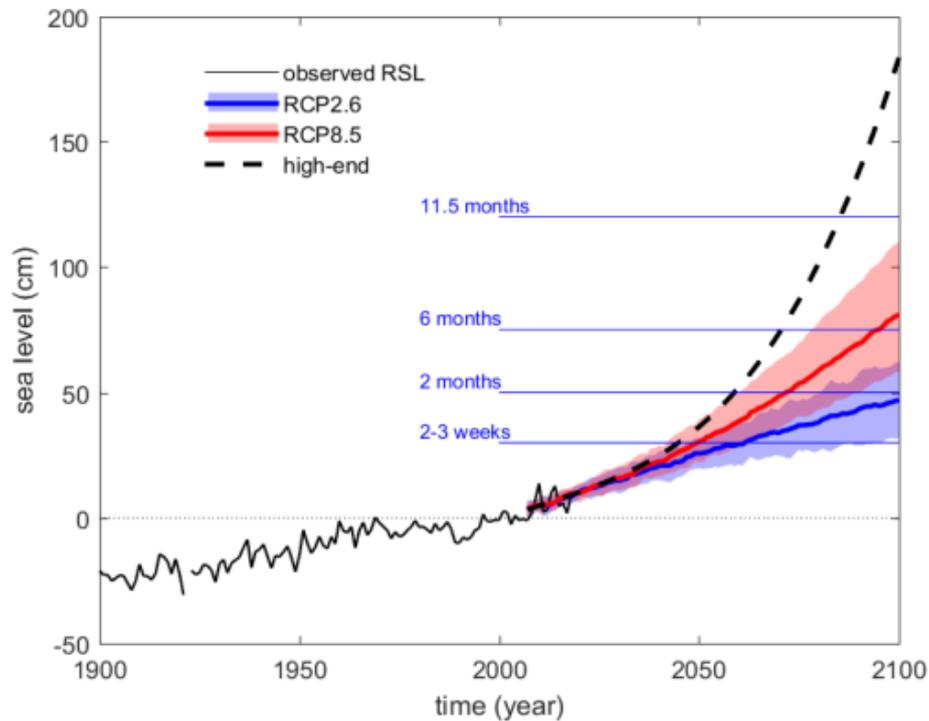


Figura 13. Le linee orizzontali e il testo in blu indicano il periodo dell'anno per cui si ritiene il MoSE resti chiuso in funzione del livello medio del mare in laguna (figura tratta da Lionello et al., 2021⁴).

⁴ <https://nhess.copernicus.org/preprints/nhess-2020-367>

Linea 5.2 Impatti, vulnerabilità e rischi indotti dal cambiamento del clima

Le attività di ricerca realizzate durante l'ultimo anno hanno prodotto risultati informativi significativi sia dal punto di vista scientifico che dal punto di vista della produzione di strumenti di supporto per la gestione della Città Metropolitana di Venezia e la sua Laguna nel contesto dei cambiamenti climatici in atto.

Sono continuate le attività relative all'implementazione dei quadri conoscitivi spaziali cogenti. L'obiettivo del lavoro è stato quello di [comprendere e identificare le eventuali acutizzazioni di impatto di carattere climatico](#). La fase di arricchimento dei quadri conoscitivi ha sviluppato dati, informazioni e conoscenze utili a [identificare le geografie delle vulnerabilità e del rischio legato ad alcuni dei principali impatti climatici, quali: isole di calore urbana, allagamenti da prima pioggia e acqua alta](#). Le informazioni prodotte sono state sviluppate con l'ausilio delle nuove tecnologie le quali hanno permesso di: *i)* costruire un modello digitale tridimensionale della gronda lagunare di Venezia mediante il quale valutare gli ambiti esposti ad acqua alta (per le isole) e allagamenti urbani (per la terraferma); *ii)* costruire un atlante delle superfici mediante il quale comprendere il valore dei servizi ecosistemici nella calmierazione della temperatura urbana; *iii)* arricchire la mappa delle attività esposte per tutti gli ambiti di studio con l'intento di caratterizzare il rischio climatico per ciascun territorio.

Parallelamente sono proseguite le attività concernenti la rianalisi di serie storiche di temperatura dell'acqua, salinità e ossigeno disciolto rilevati dalla rete di monitoraggio SAMANET, al fine di [determinare tendenze di medio periodo, che possano indicare una variazione della climatologia lagunare. I risultati hanno evidenziato annate recenti caratterizzate da ondate di calore e bassa produttività primaria in colonna d'acqua](#). I potenziali effetti di tali variazioni sulle risorse alieutiche della laguna e, più in generale, sull'ecosistema lagunare, sono stati esplorati sviluppando e applicando alla vongola verace filippina *Ruditapes philippinarum* ed al *Crangon crangon* un modello di "tolerance landscape" in grado di correlare il rischio di

mortalità alla durata e intensità delle ondate di calore (figura sinistra). [I risultati hanno evidenziato un aumento del rischio di mortalità nel tempo](#): ciò ha indotto ad introdurre nel piano sperimentale la misura della temperatura del sedimento in alcune aree della Laguna Sud dedicate all'allevamento della vongola: i dati saranno utilizzati per definire scenari di temperatura del sedimento, a partire da quelli di temperatura dell'aria e dell'acqua, indispensabili per valutare i rischi legati alle ondate di calore anche per l'infauna bentonica lagunare. Infine, il potenziale ruolo della molluschicoltura lagunare nella mitigazione dei cambiamenti climatici è stato investigato predisponendo un modello in grado di simulare l'accrescimento sia della parte molle sia della conchiglia della vongola. I risultati evidenziano che il flusso netto di CO₂ legato all'attività fisiologica delle vongole, cumulato su base annua, è prossimo a 0, caratterizzato però da variazioni stagionali piuttosto ampie. Dati aggiornati di pH e alcalinità risulterebbero utili per una valutazione più accurata dei budget di carbonio, strettamente legati al processo di calcificazione, necessario alla sintesi delle conchiglie.

Nell'ambito delle attività finalizzate all'utilizzo di modelli numerici per la [stima degli impatti del cambiamento climatico sulla biogeochimica lagunare](#), la ricerca si è focalizzata, per questo primo periodo, al completamento della simulazione climatica RCP8.5 e alla [produzione di campi mensili di temperatura dell'acqua dal 2020 al 2100](#) (figura di destra).

Per quel che riguarda lo [sviluppo ed applicazione di una metodologia di analisi di rischio](#), sono proseguite e terminate le attività relative all'identificazione dei principali fattori di pericolosità, esposizione e vulnerabilità finalizzate nella caratterizzazione di un framework concettuale di multi rischio, comprendente le principali componenti associate agli impatti dei cambiamenti climatici (quali mareggiate, innalzamento del livello del mare, allagamenti urbani e variazioni della qualità dell'acqua) nel territorio terrestre, costiero e lagunare della città Metropolitana di Venezia.

Risultati specifici includono, *i)* [la modellazione degli eventi di allagamento pluviale per la parte terrestre nello scenario baseline \(1995-2020\)](#), *ii)* [l'analisi dell'evoluzione della linea di costa per il periodo 2015-2019 in relazione alle variazioni dei trend dei parametri fisici oceanografici e di qualità dell'acqua](#), *iii)* [la modellazione e previsione dei valori di clorofilla come indicatore dei processi di eutrofizzazione sulla base delle variazioni delle componenti chimico-fisiche](#) (es. ossigeno disciolto, torbidità, salinità), [idrologiche](#) (es. flusso dei fiumi del bacino scolante in laguna) e [meteorologiche](#) (es. precipitazioni nel bacino idrografico).

Infine, sono iniziate le attività relative alla [stima degli impatti economici legati ai fenomeni indotti dai cambiamenti climatici](#). Risultati specifici includono: *i)* [caratterizzazione del territorio in termini di esposizione e vulnerabilità](#) (e.g. modello digitale della superficie, tenendo conto anche degli edifici nel centro storico di Venezia); *ii)* [armonizzazione dei diversi dataset](#) a livello spaziale e temporale per la mappatura e simulazione degli scenari di inondazione, e; *iii)* [setup del modello idrodinamico 2D ANUGA per il centro storico di Venezia](#), tenendo conto anche delle misure di adattamento già esistenti (e.g. paratie anti-allagamento a livello di edificio, MoSE a livello lagunare).

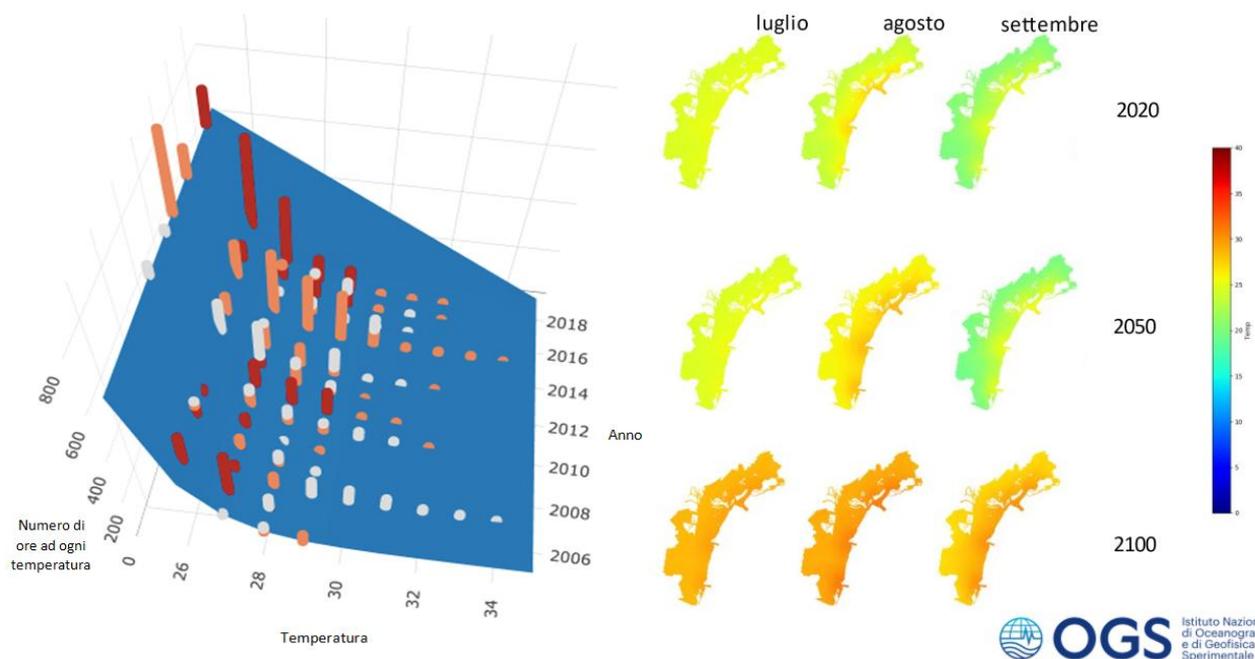


Figura 14. A sinistra, modello di tolleranza per *Crangon crangon*: il piano rappresenta la linea del modello sopra la quale si supera il livello di tolleranza e i diversi colori rappresentano 3 siti SAMANET considerati in laguna nord (Stazioni Ve-2, Ve-7 e Ve-8). Il 2014 risulta essere l'unico anno senza superamenti, mentre negli altri anni la soglia è stata superata in alcune occasioni; gli anni con superamenti più importanti sono il 2013, 2015 e il 2018. A destra, la proiezione della temperatura media mensile in laguna di Venezia, secondo il modello SHYFEM, griglia Venlag_Bio_20, con forzanti climatiche: CMCC COSMO_CLM RCP 8.5.

Linea 5.3 Piano di adattamento al cambiamento climatico e implementazione di strategie di intervento per la salvaguardia del patrimonio architettonico

Con riferimento al piano di adattamento della Laguna e della Città Metropolitana di Venezia è stato completato e predisposto il “quadro conoscitivo”, attraverso il quale le amministrazioni possono analizzare il territorio e sviluppare strumenti di gestione e politiche di adattamento e resilienza. Questo costituisce la base per la definizione ultima del piano di adattamento, utile alle amministrazioni per tutelare e salvaguardare il patrimonio e il territorio dai cambiamenti climatici considerando le peculiarità ambientali e socio-economiche. A corredo e supporto del piano si stanno attualmente identificando tutte le azioni e misure di adattamento possibili. Queste, raccolte in un portfolio che ne spiega le caratteristiche e le applicazioni, saranno uno strumento utile alle amministrazioni per selezionare azioni di resilienza anche oltre i confini e limiti del piano di adattamento stesso. Sono poi in corso di definizione altri due strumenti di supporto al piano: un sistema di gestione dell'emergenza e di ricostruzione, per preparare le amministrazioni alla gestione resiliente e sostenibile degli eventi calamitosi e un sistema di supporto alle decisioni basato su di un set di indicatori condiviso tra gli stakeholder per aiutare le amministrazioni pubbliche ad implementare e monitorare azioni di adattamento e resilienza.

Con riferimento alla valutazione della vulnerabilità e allo sviluppo di un piano di monitoraggio e controllo, l'attività di ricognizione sul campo, svolta sia a scala locale che metropolitana e territoriale, ha permesso di raccogliere informazioni che, attraverso il dialogo con i soggetti locali (studiosi, tecnici, stakeholder e imprenditori), sono state orientate al fine di redigere un “atlante” costituito di progetti e progettualità collettive o individuali sulla laguna. Il gruppo di lavoro interdisciplinare ha identificato specifici indicatori, relativi a stato di conservazione degli elementi del patrimonio (forme di degrado e alterazione correlati a processi di risalita capillare, inondazioni mareali, esposizione ambientale) e a sistemi di intervento per la mitigazione degli effetti (indicatori di compatibilità, efficacia, sostenibilità). Gli

indicatori individuati sono alla base dello sviluppo di protocolli di monitoraggio sia dello stato di conservazione sia degli interventi necessari a contrastare gli effetti individuati negli scenari identificati nella Linea 5.1 e con il supporto delle analisi sugli impatti, la vulnerabilità e il rischio eseguito dalla Linea 5.2.

Su scala architettonica sono stati elaborati i primi esiti dei monitoraggi su edifici caso di studio ai fini della valutazione della vulnerabilità. Tali monitoraggi vengono condotti con metodologie e strumentazioni da laboratorio e portatili, sperimentando la versatilità di tecniche innovative quali l'imaging iperspettrale e spettrometria. I casi di studio sono rappresentativi di situazioni di esposizione ambientale differente e il confronto dei risultati ottenuti consentirà una visione ampia e non più puntuale della dinamica degli impatti. A livello urbano (centro storico) è stata sviluppata una metodologia per valutare l'evoluzione degli effetti da umidità di risalita su murature veneziane, basata sul confronto esperto di immagini d'archivio e stato attuale. In relazione agli interventi di mitigazione degli impatti ambientali, sono state verificate modalità di verifica dell'efficacia che prevedono anche sperimentazione su modelli e cantieri pilota (figura).

A partire dall'esperienza del Workshop estivo del 2019, in relazione agli obiettivi legati alla formazione e comunicazione internazionale, sono stati sviluppati significativi materiali su Venezia e la sua laguna, incentrati sul tema della “Venezia resiliente”, che sono ora presenti fuori concorso alla Biennale 2021 nella sezione intitolata “Co-habitats” in una sotto sezione dedicata a Venezia. “The Resilience of Venice”, in esposizione alle Corderie dell'Arsenale, presenta una mappa che evidenzia i progetti portati avanti nella laguna dopo l'acqua alta del 1966 dalle varie istituzioni coinvolte (stato, regione e municipalità). L'obiettivo è quello di evidenziare una prospettiva della fragilità fisica e sociale della città, dei numerosi interventi su varia scala di cui è stata testimone e dell'enorme investimento

economico. La capacità di resilienza di Venezia, se gestita in modo appropriato, può invertire il trend che la città sta attraversando.

(<https://www.labiennale.org/it/architettura/2021/co-habitats>).

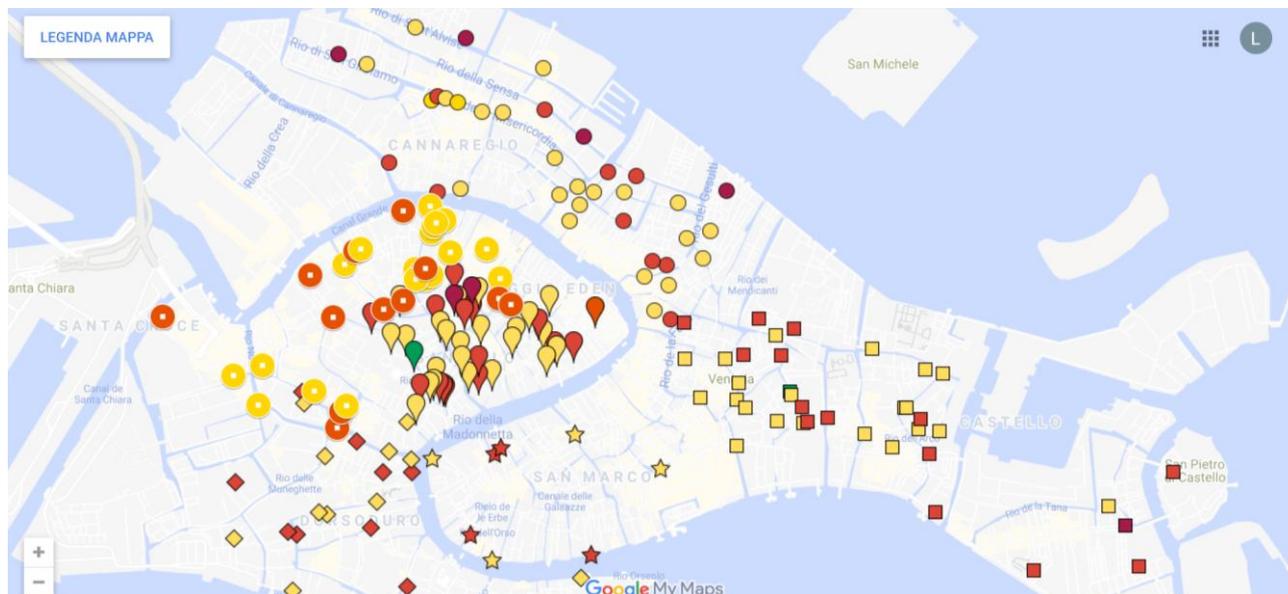
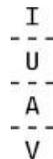


Figura 15. Mappa di Venezia riportante i principali risultati di monitoraggio relativi all'evolversi del fenomeno di risalita capillare in edifici veneziani condotto mediante confronto visivo esperto di materiale archivistico e stato attuale. La mappa mostra in particolare la variazione del parametro "altezza del fronte di risalita capillare" dal decennio 2000-2010 al periodo attuale (anni 2019-2021). Verde: fronte risalita diminuito; giallo: fronte risalita invariato; rosso: fronte risalita lievemente aumentato (entro un corso di mattoni); rosso scuro: fronte risalita fortemente aumentato. Le diverse forme delle etichette fanno riferimento al sestiere di collocazione della singola muratura analizzata.



Consiglio Nazionale
delle Ricerche



CONTATTI

CORILA

Palazzo X Savi, San Polo 19, 30125,

VENEZIA, Italia

Tel +39 041 2402526

e-mail: venezia2021@corila.it

web: venezia2021.corila.it

Facebook: [Venezia2021.corila.it](https://www.facebook.com/Venezia2021.corila.it)