



Venezia2021

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

Linea 5.2

***Impatti vulnerabilità e rischi indotti dal
cambiamento del clima***

Rapporto Finale

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

Andrea Critto

Andrea Critto (UNIVE)

30/09/2022

EXECUTIVE SUMMARY

1. Principali risultati emersi dalla Linea riferiti agli obiettivi iniziali

Una serie di attività differenti e concatenate è stata svolta per raggiungere il principale obiettivo della Linea di ricerca, ovvero fornire un quadro conoscitivo degli impatti, vulnerabilità e rischi indotti dai cambiamenti climatici sulla laguna di Venezia e la sua città metropolitana. La attività di ricerca sviluppate in questa Linea si focalizzano, quindi, da una parte, sulla modellazione e valutazione degli impatti rilevanti sugli ecosistemi lagunari analizzando, nello specifico, gli effetti di eventi climatici estremi (es. perduranti condizioni di temperatura elevata, drastiche variazioni di salinità legate a prolungati periodi siccitosi) e le variazioni delle principali caratteristiche biogeochimiche ipotizzabili rispetto agli scenari climatici considerati nel progetto; dall'altra, sulla valutazione della vulnerabilità fisico-ambientale dei recettori potenzialmente esposti agli impatti del cambiamento climatico e del rischio di impatti potenziali, in considerazione anche della messa in funzione del MOSE.

L'attività *Sviluppo del modello digitale in 3D del sistema terra-acqua della gronda lagunare e della città metropolitana di Venezia*, finalizzata all'arricchimento dei quadri conoscitivi, necessari per la valutazione della vulnerabilità in ambiti complessi come la laguna, ha riguardato la realizzazione di un modello digitale in 3D¹ del sistema terra-acqua della gronda lagunare e della Città Metropolitana di Venezia (CMVE). Il modello 3D è la base su cui, con tecniche differenti e parallele, sono state elaborate una serie di operazioni per valutare a livello preliminare la distribuzione di alcuni impatti climatici rilevanti per il fragile sistema della conterminazione lagunare. L'uso combinato del modello 3D con informazioni spaziali prodotte dal gruppo di ricerca tramite l'uso di tecniche di remote sensing ha consentito lo sviluppo di specifiche metodologie di analisi di supporto alla valutazione della vulnerabilità territoriale e del rischio come esito di impatti generati dall'aumento di frequenza degli eventi estremi: ondate di calore, precipitazioni e mareggiate intense. Gli impatti considerati hanno riguardato: isole di calore urbane (UHI), inondazioni urbane (Urban runoff) e acqua alta (High Tide).

Parallelamente, la valutazione degli impatti acuti dei cambiamenti climatici sulle risorse alieutiche lagunari, finalizzata alla valutazione della vulnerabilità degli organismi alle ondate di calore, ha riguardato lo sviluppo di modelli di "tolerance landscape" che consentono di stimare dopo quanto tempo l'esposizione a temperature superiori ad una certa soglia possa causare la morte della metà degli individui di una certa specie. I dati disponibili in letteratura hanno consentito di parametrizzare i modelli per le due principali specie di molluschi allevate in laguna, la vongola verace (*Ruditapes philippinarum*) e il mitilo (*Mytilus galloprovincialis*). Grazie anche ai dati di temperatura del sedimento rilevati durante il progetto, è stato possibile stimare la sopravvivenza delle due specie nelle decadi future. Queste proiezioni, basate sugli attuali scenari evolutivi della temperatura delle acque lagunari, indicano una elevata probabilità che le ondate di calore provochino massicce mortalità di molluschi a partire dalla decade 2060/2070.

I modelli sviluppati nelle Linee 1.3 e 2.2 e le forzanti climatiche prodotte con i modelli regionali nella Linea 5.1 (Bucchignani et al., 2016; Zanchettin et al., 2021; Zollo et al., 2016²) sono stati utilizzati per realizzare

¹ La realizzazione del modello 3D si basa sui dati spaziali in alta risoluzione messi a disposizione dalla Città Metropolitana di Venezia relativi alla campagna di rilevamento effettuata nel 2014. Questa fonte, attraverso l'uso di un raster digitale delle superfici (DSM), restituisce un'immagine tridimensionale del territorio.

² Bucchignani, E., Montesarchio, M., Zollo, A. L., & Mercogliano, P. (2016). High-resolution climate simulations with COSMO-CLM over Italy: performance evaluation and climate projections for the 21st century. *International Journal of Climatology*, 36(2), 735-756.

Zanchettin D., et al. (2021). Sea-level rise in Venice: historic and future trends (review article), *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 21, 1–35, 2021, <https://doi.org/10.5194/nhess-21-1-2021>

delle simulazioni di scenario climatico fisico e biogeochimico della laguna di Venezia. Nello specifico, sono stati prodotti: 1. I setup delle simulazioni di scenario RCP 4.5 e RCP 8.5 elaborando i dati climatici, acquisendone di ulteriori, al di fuori del progetto (Solidoro et al., 2022; Reale et al., 2022³), e producendo delle analisi statistiche per definire le condizioni forzanti meteo e le condizioni chimico-fisiche e biogeochimiche al contorno. 2. Simulazioni di scenario (RCP 4.5 e RCP 8.5) idrodinamico e chimico-fisico fino al 2100, con MOSE operativo, ad alta risoluzione spaziale e temporale con il modello SHYFEM Venlag_BIO20 con produzione di output di livello dell'acqua, temperatura, salinità. 3. Simulazioni di scenario biogeochimico RCP 8.5, con MOSE operativo, 'mid-future' (2049-50) e 'far-future' (2090 e 2099) con produzione di output di nutrienti, clorofilla e ossigeno disciolto. 4. Simulazioni di scenario RCP 8.5 con modello di accrescimento di *Ruditapes philippinarum* integrato al modello biogeochimico per stimare l'effetto potenziale delle alterazioni fisiche e biogeochimiche sulla biomassa di questi bivalvi nelle aree di concessione lagunari nel 'mid-future' (2049) e 'far-future' (2090).

Per quanto riguarda lo *Sviluppo ed applicazione di una metodologia di analisi di vulnerabilità e rischio ai cambiamenti climatici*, sono stati identificate e priorizzate le aree della laguna e della Città Metropolitana e le relative vulnerabilità fisico-ambientali e sociali che maggiormente potrebbero essere influenzate da eventi pericolosi legati a scenari di cambiamento climatico tramite la selezione di un pool di indicatori chiave e l'elaborazione di un framework concettuale di multi rischio. Inoltre, è stata effettuata una stima del rischio di impatti potenziali, in considerazione a scenari futuri di cambiamento climatico nonché gestionali legati alla messa in funzione del sistema MOSE. I rischi, passati e futuri (per il 'mid-future' e 'far-future'), sono stati stimati per gli ambiti lagunare, costiero e terrestre del territorio dell'area metropolitana di Venezia, tramite metodi di Intelligenza Artificiale (IA). Gli scenari futuri risultanti vedono le stime di: i. pericolo di eutrofizzazione della laguna di Venezia, ii. alluvioni costiere, erosione e perdita di qualità dell'acqua (all'interfaccia terra-mare) e iii. Alluvioni pluviali che agiscono sulle aree terrestri.

Infine, sono stati stimati gli impatti economici associati agli eventi alluvionali a Venezia Centro Storico in base al clima storico (2000-2019) ed a una proiezione del clima che prevede un'elevata concentrazione di gas a effetto serra (2040-2050; RCP 8.5) utilizzando un modello di danno da alluvione calibrato ad hoc per questo progetto. Secondo i risultati, si prevede che il danno annuale stimato totale diretto e indiretto dovuto alle inondazioni aumenterà di oltre tre volte rispetto ai livelli attuali nello scenario RCP 8.5 entro la metà del secolo se il MOSE non viene attivato. Quando il MOSE viene attivato a livelli d'acqua superiori a 130 cm, il danno annuale si riduce di oltre il 90%.

2. Risultati concreti divulgabili ai decisori politici/ pubblico generico

2.1 Modello 3D del sistema lagunare

È stato prodotto un modello 3D del sistema lagunare. Tale modello consente differenti ed ulteriori elaborazioni (aperte ed aggiornabili nel continuo) in campo morfologico e geo-statistico. Diverse simulazioni sono state eseguite per alcuni impatti del cambiamento climatico (CC) (simulazione degli

Zollo A. L., Rillo V., Bucchignani E., Montesarchio M. & Mercogliano P. (2016). Extreme temperature and precipitation events over Italy: assessment of high-resolution simulations with COSMO-CLM and future scenarios. *International Journal of Climatology*, 36(2), 987-1004.

³ Reale M., Cossarini G., Lazzari P., Lovato T., Bolzo, G., Masin, S., Solidoro C. and Salon S. (2021). Acidification, deoxygenation, nutrient and biomasses decline in a warming Mediterranean Sea, *Biogeosciences Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/bg-2021-301>, in review, 2021.

Solidoro C, Cossarini G, Lazzari P, Galli G, Bolzon G, Somot S and Salon S (2022). Modeling Carbon Budgets and Acidification in the Mediterranean Sea Ecosystem Under Contemporary and Future Climate. *Front. Mar. Sci.* 8:781522. doi: 10.3389/fmars.2021.781522

impatti da isole di calore urbane (UHI), inondazioni urbane (Urban runoff) e acqua alta (High Tide)). È stata inoltre eseguita una valutazione preliminare delle vulnerabilità di area vasta, tramite una caratterizzazione geografica degli impatti orientata ad evidenziare le aree territoriali predisposte a subire gli effetti negativi dei CC, fra cui:

- UHI. Valutazione della vulnerabilità territoriale che evidenzia la correlazione spaziale fra lo stato termico della superficie terrestre e le caratteristiche di uso del suolo (Fig. 1).
- Urban runoff. Valutazione della vulnerabilità territoriale che simula il comportamento delle acque superficiali riconoscendo aree dotate di una diversa criticità idraulica.
- High Tide. Valutazione della vulnerabilità territoriale che simula l'interazione dell'evento estremo in relazione alla caratterizzazione morfologica del contesto insulare veneziano⁴.

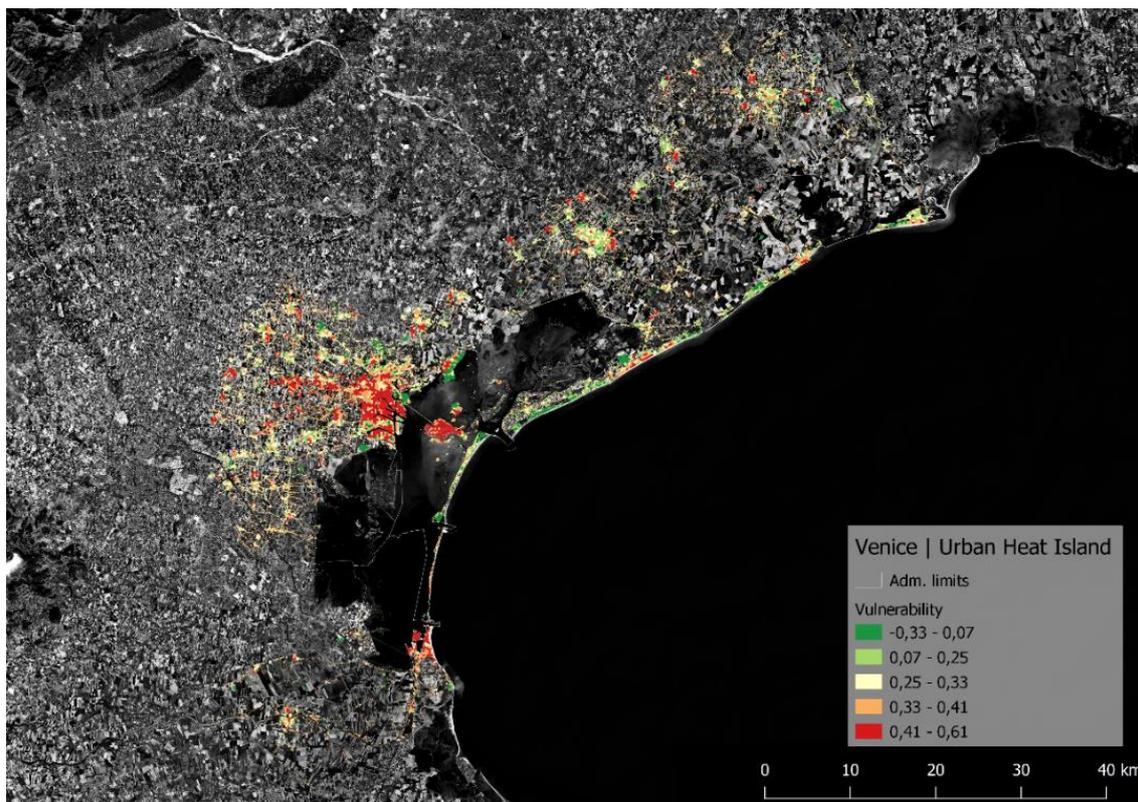


Figura 1. Città Metropolitana di Venezia: vulnerabilità urbana a ondate di calore.

⁴ Si precisa che l'indagine dell'acqua alta è stata condotta solo sull'ambito insulare, escludendo Lido e Pellestrina. Questa scelta è dettata dal fatto che solo per questo ambito territoriale si dispone di un dato altimetrico del DTM più raffinato, grazie alla sua fusione con il progetto RAMSES. RAMSES è un progetto del Comune di Venezia attuato da Insula spa per realizzare una rappresentazione tridimensionale della pavimentazione del centro storico con una precisione centimetrica e producendo una fotografia 3D delle zone pedonali (www.smu.insula.it). Per mantenere una certa coerenza d'ambito, alle indagini del centro storico veneziano sono state affiancate anche le elaborazioni di quota condotte sulle isole di Murano Burano, Mazzorbo e Torcello.

2.2 Modelli specie-specifici per la valutazione dei rischi di impatti acuti sulla funzionalità ecosistemica e sulle risorse alieutiche

L'attività si è focalizzata nella raccolta ed elaborazione di dati ambientali utili sia alla definizione di scenari di mortalità di *Ruditapes philippinarum* e *Mytilus galloprovincialis* nel corso delle decadi 2030-2100, sia alla previsione a breve termine di temperatura dell'acqua e ossigeno disciolto. Nello specifico sono stati prodotti:

- Modelli per la previsione della sopravvivenza di vongole veraci (*Ruditapes philippinarum*) e mitili (*Mytilus galloprovincialis*) (esempio in Fig.2);
- Nuovi modelli dinamici di accrescimento individuale delle vongole veraci (*Ruditapes philippinarum*) e mitili (*Mytilus galloprovincialis*), in grado di prevedere anche le quantità di CO₂ emesse dai processi fisiologici e inglobate nella conchiglia: questi modelli potrebbero essere di estremo interesse per un eventuale inserimento della molluschicoltura nel mercato dei crediti carbonio;
- Modelli statistici per la previsione sito-specifica a breve termine della temperatura e della concentrazione di ossigeno disciolto nelle acque lagunari, potenzialmente utilizzabili per il monitoraggio di questi parametri e la gestione delle risorse alieutiche lagunari.

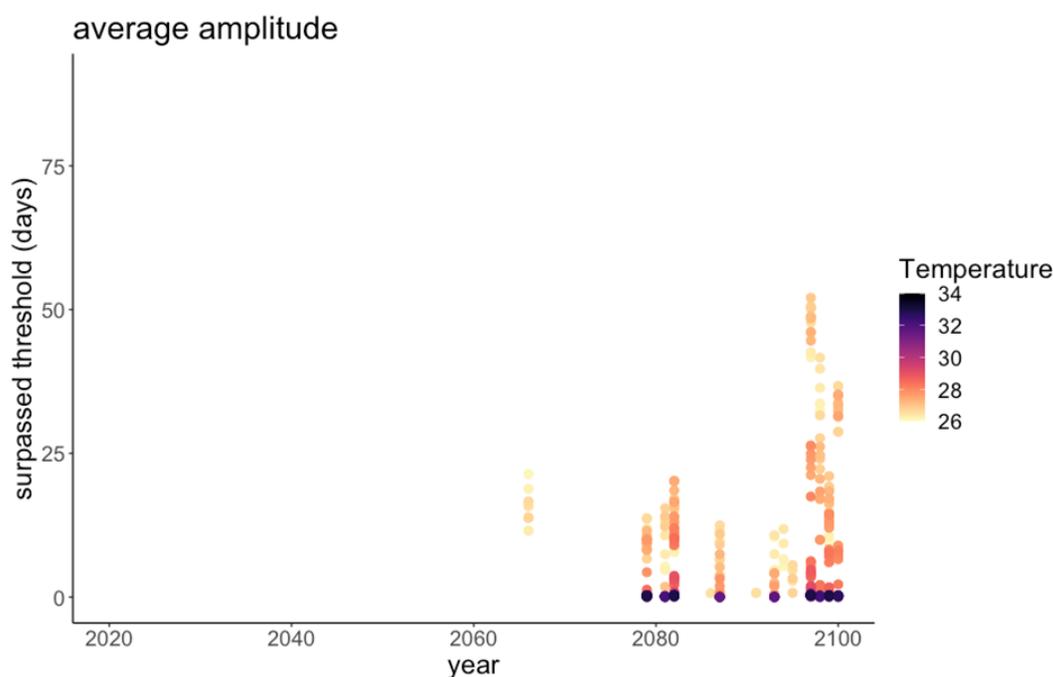


Figura 2. Numero di giorni in cui viene previsto il superamento della soglia di mortalità critica del 50% per *Mytilus galloprovincialis*.

2.3 Applicazione di modelli integrati trasporto-biogeochimica semplificati e modelli di nicchia per la stima degli effetti di possibili scenari di cambiamento climatico

Grazie al modello integrato idrodinamico SHYFEM (chimico-fisico e biogeochimico sviluppato nella Linea 1.3) sono stati ottenuti i seguenti risultati : i. mappe dell'evoluzione temporale (media mensile) di temperatura, livello e salinità delle acque della laguna di Venezia fino al 2100, per gli scenari RCP 4.5 e 8.5, ad alta risoluzione spaziale (Fig. 3); ii. Mappe dell'evoluzione temporale (media giornaliera) di nutrienti, ossigeno disciolto, clorofilla, temperatura, livello, acidificazione, salinità delle acque della laguna di Venezia, a medio (2049-50) e lungo termine (2090, 2099) per lo scenario RCP 8.5, ad alta risoluzione spaziale. iii. Mappe dell'evoluzione temporale (media giornaliera) degli accrescimenti di *Ruditapes philippinarum* nelle

aree lagunari di concessione per la molluschicoltura, a medio (2049) e lungo termine (2090), per lo scenario RCP 8.5.

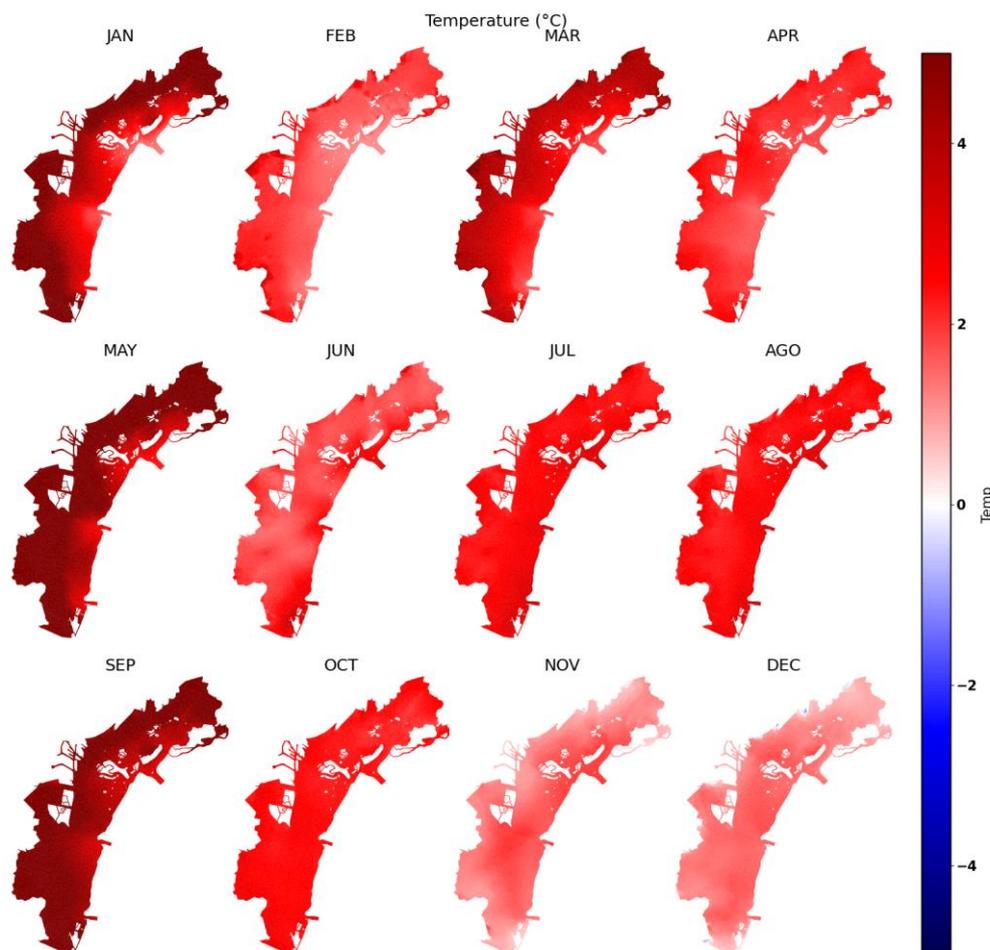


Figura 3. Evoluzione spaziale e temporale dell'anomalia della temperatura media mensile delle acque lagunari per lo scenario futuro RCP 8.5 di medio termine (2049-50). L'anomalia è stata calcolata sulla media mensile degli anni 2019 e 2049.

2.4 Valutazione multi-scenario del rischio

Grazie a tecniche di Intelligenza Artificiale che hanno utilizzato anche i risultati del modello integrato trasporto-biogeochimica semplificato, ed in particolare le produzioni dell'evoluzione temporale dei parametri biogeochimici delle acque della laguna di Venezia, a medio (2049-50) e lungo termine (2090, 2099) per lo scenario RCP 8.5), si sono elaborati e comparati diversi scenari riguardanti il modulo lagunare che mostrano variazioni annuali e stagionali di clorofilla nel medio (2049) e lungo (2099) termine, evidenziando un trend decrescente per i valori di clorofilla più bassi, mentre si nota un trend crescente per i valori di clorofilla più alti. A livello stagionale l'estate resta la stagione con i più alti valori di clorofilla in tutti gli scenari, sebbene nel 2099 ci si aspetta anche un incremento dei valori di clorofilla durante la stagione primaverile. Nei risultati del modulo costiero si nota una predominanza della condizione di stabilità della linea di costa fino al 2030, mentre si prospetta un incremento della deposizione di sedimenti lungo la costa nella decade tra il 2041 e 2050, la quale è anche associata ad un peggioramento delle condizioni della qualità dell'acqua, in termini di materiale particolato sospeso. Infine, il modello di Intelligenza Artificiale sviluppato per il comparto terrestre prevede per gli scenari futuri con RCP 4.5 un rischio maggiore di inondazioni pluviali nel primo e quarto trimestre per ciascuno dei tre decenni futuri. In particolare, si prevede che il quarto trimestre del periodo 2041-2050 sia il più critico. Nello scenario peggiore RCP 8.5, i

modelli evidenziano un aumento consistente di eventi estremi per i decenni futuri rispetto allo scenario di baseline (Fig. 4).

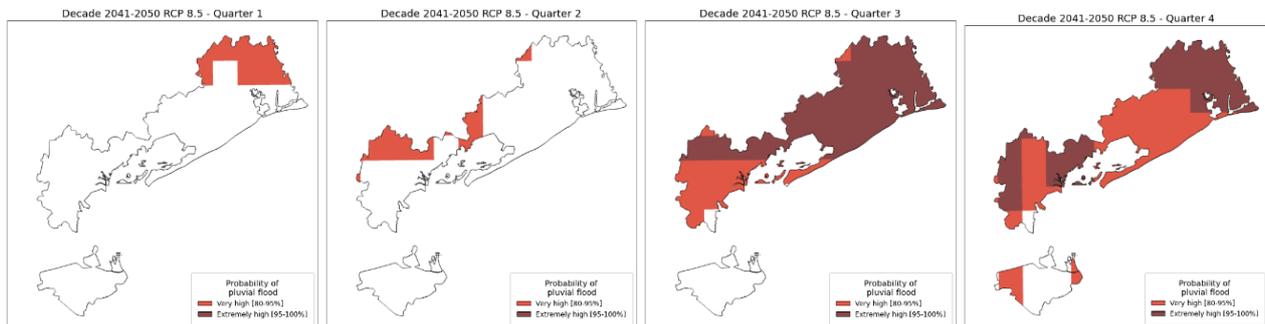


Figura 4. Distribuzione spaziale delle più alte classi di rischio di alluvione da piogge intense (I quartile, II, III e IV quartile) per lo scenario futuro 2041-2050, RCP 8.5, per la città Metropolitana di Venezia.

2.5 Stima degli impatti economici legati ai fenomeni indotti dai cambiamenti climatici

Utilizzando un modello di profondità-danno (stage-damage) da alluvione calibrato per questo progetto (ottenuto in combinazione con i dati di elevazione ad alta risoluzione (25 cm) del Modello 3D del sistema lagunare, i dati di subsidenza del terreno e i dati del livello della superficie del mare simulati dall'ISMAR-CNR bias-corretto utilizzando i dati di marea dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale), si è stimato che entro 30 anni, in uno scenario di cambiamento climatico ad alte emissioni, senza l'attivazione del MOSE i danni annuali dovuti agli eventi di Acqua Alta aumenteranno di oltre tre volte rispetto ai livelli attuali. Laddove il MOSE fosse attivato a livelli d'acqua superiori a 130 cm, si prevede che l'aumento dei danni annuali sarebbe ridotto di oltre il 90% (Fig. 5).

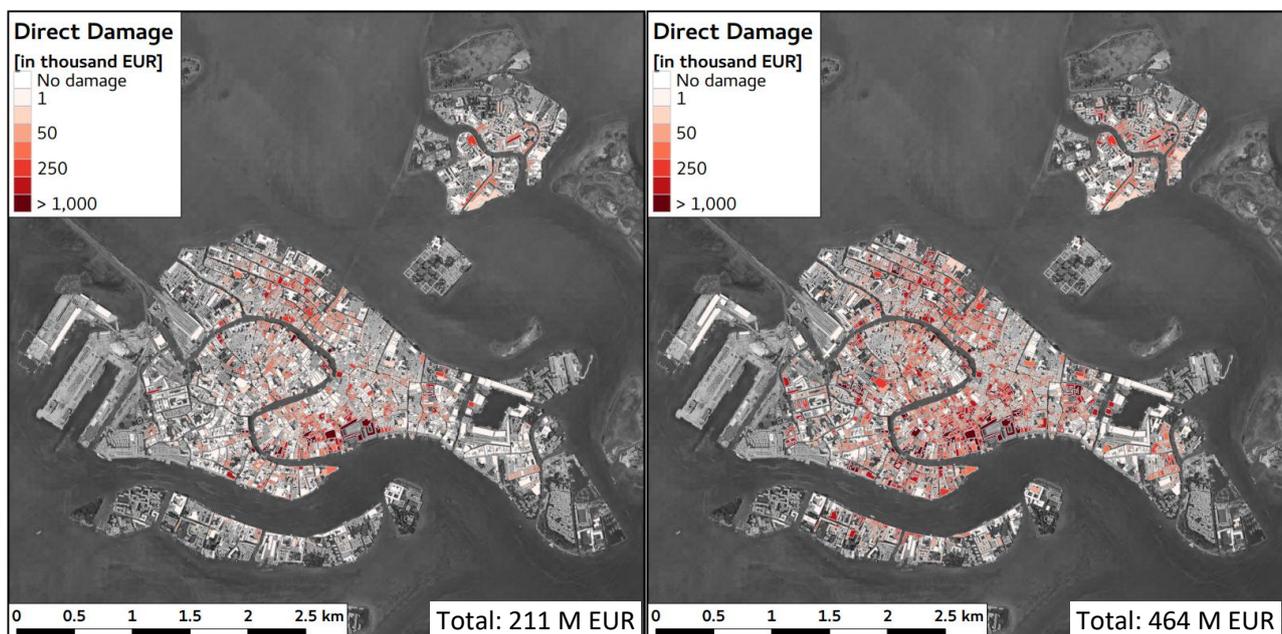


Figura 5. Danni diretti totali agli edifici in migliaia di EUR per eventi con periodo di ritorno pari a 100 anni per il periodo storico (2000-2019) (pannello di sinistra) e la proiezione delle alte emissioni per gli anni 2040 (pannello di destra).

3. Spunti per il futuro

Per l'attività "Sviluppo del modello digitale in 3D del sistema terra-acqua della gronda lagunare e della città metropolitana di Venezia" un'ipotesi di sviluppo futuro potrebbe riguardare la gestione della vulnerabilità e

del rischio urbano considerando l'impatto del cambiamento climatico attraverso la formulazione di scenari integrando il comportamento morfologico del territorio con gli scenari climatici globali (RCPs). Per sviluppare questa nuova dorsale di ricerca è necessario che il trend climatico venga opportunamente incrociato con i fattori morfologici locali. Il riconoscimento di una convergenza climatica tra variabili morfologie e fenomeni climatici può risultare utile per capire in che modo le caratterizzazioni di uso del suolo siano effettivamente predisposte ad acuitizzare gli effetti generati da uno o più impatti climatici. Questo processo può favorire la restituzione di condizioni di vulnerabilità in grado di differenziare e orientare gli interventi di adattamento urbano in funzione ai diversi settori di pericolosità climatica (o hazard).

Per gli avanzamenti dell'attività "Sviluppo di modelli specie-specifici per la valutazione dei rischi di impatti acuti sulla funzionalità ecosistemica e sulle risorse alieutiche" si ritengono di estremo interesse:

- lo sviluppo di modelli di "tolerance landscape" anche per altre specie di interesse per la pesca lagunare e, in generale, importanti per il funzionamento dell'ecosistema lagunare: ciò richiederebbe, attività sperimentali specifiche in condizioni controllate di laboratorio;
- l'estensione dei modelli di "tolerance landscape", includendovi altri potenziali co-stressori, quali, ad es., bassi livelli di ossigeno disciolto, scarsa disponibilità di alimento, presenza di patogeni;
- lo sviluppo di scenari di produttività della molluschicoltura lagunare, basati sull'accoppiamento dei modelli di accrescimento e di sopravvivenza: questo obiettivo si potrebbe raggiungere con uno sforzo limitato, utilizzando come dati di ingresso gli scenari di evoluzione della temperatura e della densità fitoplanctonica prodotti dal progetto;
- l'approfondimento del ruolo della molluschicoltura nel ciclo del carbonio lagunare, in relazione anche alla prospettiva di ingresso di questo settore nel mercato dei crediti di carbonio;
- l'integrazione dei modelli statistici per la previsione a breve termine in un sistema osservativo dell'ecosistema lagunare veneziano.

Per quel che concerne il modello biogeochimico sviluppato nell'attività "Applicazione di modelli integrati trasporto-biogeochimica semplificati e modelli di nicchia per la stima degli effetti di possibili scenari di cambiamento climatico", esso ha dimostrato una buona capacità di riprodurre le principali scale di variabilità spazio-temporale della biogeochimica lagunare. Tuttavia, i risultati evidenziano margini di miglioramento che possono essere ottenuti: 1) migliorando le capacità descrittive dei processi, 2) raffinando la struttura del modello numerico, 3) migliorando la rappresentazione delle condizioni esterne al sistema aumentando la frequenza di acquisizione dei dati (forzanti esterne, carichi, scambio con il mare), 4) applicando sistemi di assimilazione dei dati nel modello, 5) esplorando ulteriormente l'incertezza relativa al carico del bacino scolante per gli scenari futuri. Il modello di accrescimento della vongola *R. philippinarum* potrebbe essere ulteriormente integrato con il modello SHYFEM-BFM passando da un accoppiamento off-line ad un accoppiamento on-line, e quindi ad una rappresentazione spazialmente esplicita delle dinamiche del bivalve. Inoltre, se in prima battuta sono state considerate solo le dinamiche di crescita individuale, in futuro il modello potrebbe essere sviluppato per rappresentare le dinamiche di popolazione.

Per procedere nella ricerca affrontata nell'attività di "Valutazione del pericolo, esposizione, sensibilità e rischio", varie opzioni possono essere ipotizzate per il futuro: 1) l'avanzamento dell'aspetto modellistico di Intelligenza Artificiale con algoritmi e tecniche (es. deep learning, transfer learning, graph neural networks e physics-informed machine learning) che possano aumentare l'accuratezza dei modelli e quindi diminuire l'incertezza degli scenari di rischio. 2) L'inclusione dei cinque scenari futuri aggiornati all'ultimo report IPCC – AR6, dal più ottimistico a quello da evitare a tutti i costi, rispettivamente: l'SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5. Tali scenari di emissioni darebbero agli scenari di rischio il valore di dipendere sia dalla velocità con cui l'uomo ridurrà le emissioni di gas serra, che dai cambiamenti socioeconomici in aspetti quali la popolazione, la densità urbana, l'istruzione e la ricchezza. 3) I nuovi scenari di rischio potrebbero venire elaborati non solo in accordo con i diversi SSPs ma anche con gli scenari futuri di uso del suolo (es. LUISA (Land Use-based Integrated Sustainability Assessment) e LUC@CMCC (land use change model) al fine di includere le problematiche connesse allo sviluppo antropico inserito in un contesto di crescita territoriale.

Infine, per quel che riguarda l'attività di "Stima degli impatti economici legati ai fenomeni indotti dai cambiamenti climatici", il lavoro futuro dovrebbe includere: 1) lo sviluppo di un modello idrodinamico dipendente dall'aspetto meteorologico del centro di Venezia, del Lido, delle comunità basse sulla terraferma che includa l'allagamento diretto dalla laguna ed i flussi fognari inversi. 2) Dovrebbero essere eseguite simulazioni che ottimizzino l'attivazione del MOSE a diversi livelli d'acqua e con alcuni ingressi lasciati aperti e/o attivati a diversi livelli d'acqua, al fine di comprendere i costi/benefici economici di ciascuno scenario. 3) Per le stime dei costi indiretti, sarebbe vantaggioso includere i costi del turismo venuto a mancare durante i grandi eventi di acqua alta, ad esempio, le perdite generate a causa dell'annullamento di viaggi (hotel, pasti, trasporti, ecc.) anche in luoghi che non hanno vissuto danni significativi come quelli avvenuti nel novembre 2019. 4) Dovrebbero essere presi in considerazione ulteriori scenari di cambiamenti climatici per diverse concentrazioni di gas serra (es. mitigazione) e periodi temporali diversi e di più lungo termine (es. 2041-2060 e 2081-2100).

DESCRIZIONE ESTESA

4. Descrizione delle attività

Di seguito si riporta una sintesi descrittiva delle principali attività svolte nell'attività "Sviluppo del modello digitale in 3D del sistema terra-acqua della gronda lagunare e della città metropolitana di Venezia" Complessivamente l'attività ha riguardato tre fasi principali:

- la costruzione del modello digitale in 3D del sistema lagunare;
- la sperimentazione sul modello integrando gli scenari relativi agli impatti climatici;
- il supporto fornito alle altre Linee di ricerca del progetto.

Particolarmente rilevante risulta la seconda, relativa alla sperimentazione condotta dal punto di vista della dimensione climatica. Seguendo la consequenzialità logica, le attività in cui è scomposta possono essere articolate in tre macro-livelli di indagine.

Il primo livello attiva una serie di metodologie di valutazione della vulnerabilità territoriale supportate dall'uso delle nuove tecnologie dell'informazione spaziale e implementate da informazioni prodotte attraverso il processamento di immagini satellitari Sentinel 2 e Landsat 8. Le metodologie riguardano le seguenti valutazioni di vulnerabilità territoriale: vulnerabilità da UHI; vulnerabilità da Urban runoff, vulnerabilità da High Tide.

1. Lo studio dell'UHI si avvale dell'uso di immagini satellitari, considerando l'incidenza di parametri vegetazionali e termici capaci di descrivere la struttura delle relazioni morfologiche del territorio, e i diversi gradi di vulnerabilità degli elementi antropici e naturali.
2. Lo studio dell'UF utilizza un algoritmo spaziale per la stima dei deflussi superficiali delle acque meteoriche. L'algoritmo analizza la correlazione spaziale tra usi del suolo, orografia e morfologie del terreno, nello specifico: pendenze, depressioni, elevazioni di terreno ed avvallamenti.
3. Lo studio dell'HT si avvale di una fase di processamento delle quote altimetriche del Modello Digitale del Terreno (DTM) della Città Metropolitana di Venezia integrato con il dato RAMSES.

Il secondo livello indaga il rapporto tra vulnerabilità ed esposizione⁵ attraverso l'analisi delle relazioni spaziali mediante l'uso di modelli logici in grado di catturare le componenti urbanistiche (economiche e sociali) attraverso un processo di raccolta di dati eterogenei.

Il terzo livello identifica le tecniche di valutazione e di spazializzazione degli impatti in relazione alle attività urbane, considerate come fattori esposti ad un potenziale rischio indotto dai cambiamenti climatici. Il processo per la valutazione del rischio cui un territorio è soggetto inizia da un'analisi approfondita del territorio, data dalla sensibilità, ovvero l'insieme delle caratteristiche fisiche che "debilitano" uno spazio, interpolata con la capacità di adattamento, che tiene conto delle qualità fisiche che mitigano un determinato impatto. Questo processo di sottrazione permette di ottenere il grado di vulnerabilità a cui un territorio è esposto.

Nell'attività "Sviluppo di modelli specie-specifici per la valutazione dei rischi di impatti acuti sulla funzionalità ecosistemica e sulle risorse alieutiche", sono stati rilevate in aree dedicate alla molluschicoltura: i) serie storiche di variabili di qualità dell'acqua (salinità, temperatura, pH, concentrazioni di ossigeno disciolto e clorofilla) mediante sensori in continuo; ii) serie storiche di apertura delle valve di mitili; iii) serie storiche di temperatura del sedimento. Tali attività sono state realizzate in collaborazione

⁵ La definizione dell'esposizione contribuisce a giungere al rischio: il rischio deriva dall'interazione della vulnerabilità (di un sistema interessato), dalla sua esposizione (ad uno specifico pericolo), nonché dal pericolo (legato al clima) e dalla probabilità del suo verificarsi.

con la Linea 2, WP 2.1.4: in questo ambito, sono stati rilevati anche valori stagionali dei principali parametri biometrici che consentono di valutare l'accrescimento di vongole veraci (*Ruditapes philippinarum*) e mitili (*Mytilus galloprovincialis*). I dati rilevati nell'ambito del progetto e le serie storiche raccolte sin dai primi anni 2000 dalla rete di monitoraggio delle principali variabili di qualità dell'acqua precedentemente gestita dal Magistrato alle Acque di Venezia e ora dal Provveditorato Interr. per le Opere Pubbliche per il Veneto, Trentino Alto-Adige e Friuli Venezia-Giulia, rete "Ex-Samanet", sono stati utilizzati per sviluppare modelli dinamici di processo e modelli statistici, finalizzati alla previsione degli effetti delle ondate di calore sulle risorse alieutiche lagunari. Tale attività è stata focalizzata sulla molluschicoltura, quale settore di rilevanza economica e particolarmente vulnerabile agli effetti dei cambiamenti climatici. Sono stati messi a punto:

- modelli di "tolerance landscape", per la previsione della probabilità che le ondate di calore causino mortalità massicce, uguali o superiori al 50% della biomassa allevata di vongola verace (*Ruditapes philippinarum*), e mitilo (*Mytilus galloprovincialis*);
- nuovi modelli bioenergetici, in grado di prevedere l'accrescimento individuale di vongola verace (*Ruditapes philippinarum*), e mitilo (*Mytilus galloprovincialis*) in funzione, rispettivamente, della temperatura del sedimento superficiale o dell'acqua lagunare, e della concentrazione di clorofilla e di POC (Particulate Organic Carbon): rispetto ai modelli disponibili in letteratura e precedentemente applicati alle lagune alto-adriatiche, essi includono nel bilancio energetico anche la formazione del guscio, consentendo di valutare i tassi di assimilazione e rilascio di CO₂;
- un modello statistico per la stima della temperatura del sedimento superficiale in funzione di quella dell'acqua;
- una metodologia per la selezione di modelli sito-specifici di previsione a breve termine della temperatura dell'acqua e della concentrazione di ossigeno disciolto, basati sul processamento in tempo reale di dati di qualità dell'acqua rilevati da sensori in continuo di previsioni meteorologiche;
- una metodologia per costruire scenari di valori orari di temperatura dell'acqua e giornalieri della temperatura del sedimento, partendo da previsione dei valori medi mensili: questi scenari sono indispensabili per stimare gli effetti sugli organismi di eventi di durata relativamente brevi, quali le ondate di calore, ma in grado di provocare stress letali agli organismi acquatici e bentonici.

L'attività "Applicazione di modelli integrati trasporto-biogeochimica semplificati e modelli di nicchia per la stima degli effetti di possibili scenari di cambiamento climatico" è stata condotta dall'UO del centro di ricerca OGS. Le finalità del task sono state inizialmente riviste a livello di linea per rispondere alla necessità di produrre degli scenari di temperatura, salinità e livello delle acque della laguna di Venezia ad alta risoluzione spaziale e temporale. Di conseguenza l'attività è stata riprogrammata con l'obiettivo di realizzare:

1. Simulazioni di scenario idrodinamico e chimico-fisico, in continuo dal presente fino al 2100, con MOSE operativo, per gli scenari RCP 4.5 e 8.5.
2. Simulazioni di scenario biogeochimico RCP 8.5, con MOSE operativo e SENZA MOSE operativo, 'mid-future' (2049-50) e 'far-future' (2090 e 2099).
3. Simulazioni di scenario RCP 8.5 'mid-future' (2049) e 'far-future' (2090) integrando il modello biogeochimico e un modello bioenergetico di *Ruditapes philippinarum* per la stima dell'effetto potenziale delle modificazioni fisiche e biogeochimiche sugli accrescimenti.

Nel dettaglio:

Sono stati individuati gli strumenti modellistici: il modello accoppiato idrodinamico e biogeochimico agli elementi finiti (SHYFEM-BFM), sviluppato nella Linea 1.3, con 53 variabili di stato biogeochimiche, utilizzando la griglia di calcolo a risoluzione variabile VenlagBio_20, costituita da 6017 nodi e 10417 elementi, con il dominio delimitato dalla linea di conterminazione lagunare.

Sono stati individuati gli scenari climatici e le informazioni necessarie per definire le condizioni al contorno marine, fluviali e meteo per le variabili fisiche e chimiche e per le variabili biogeochimiche. Sono state inoltre prodotte delle analisi statistiche per la definizione delle condizioni forzanti meteo e delle condizioni chimico-fisiche e biogeochimiche al contorno.

Sono stati acquisiti i dati giornalieri delle simulazioni storica (HISTORICAL, 1981-2005) e climatica CCLM (COSMO_CLM) RCP 8.5 2006-2100, a risoluzione di 8 km (0.0715 gradi) (Bucchignani et al., 2016; Zollo et al., 2016) di: pressione SLM, velocità del vento (u e v), precipitazione totale, umidità relativa, temperatura media dell'aria a 2m dalla superficie, radiazione solare alla superficie terrestre, radiazione termica al suolo (forniti su richiesta per le attività di questo task).

I dati di *boundary marino* (temperatura, salinità e biogeochimica alle bocche di porto) sono stati acquisiti dal modello CMCC NEMO (Reale et al., 2021; Solidoro et al., 2022), tenendo conto dell'anomalia, ovvero della differenza tra i valori delle variabili biogeochimiche simulate e quelle misurate allo stato di riferimento (anno 2019).

I dati del *livello marino* sono stati calcolati applicando un trend con un aumento lineare del livello tra il 2005 e il 2100, fino ad un massimo di 0.71 m nel 2100 per lo scenario RCP 8.5 e di 0.59 per lo scenario RCP 4.5, in accordo a Zanchettin et al., (2020).

Lo scenario di *chiusura del MOSE* è stato introdotto seguendo la procedura di chiusura descritta in alcuni report interni del Consorzio Venezia Nuova, e in Umgiesser et al., (2006)⁶. Gli scenari di chiusura sono stati applicati alle simulazioni del 2049 e 2090, impedendo lo scambio alle bocche in corrispondenza dei picchi di marea che superano i 110 cm, nell'intervallo che va dal raggiungimento di 90 cm in marea entrante al raggiungimento del livello prefissato per la riapertura.

Sono state effettuate delle simulazioni per *valutare diverse ipotesi di carico* di nutrienti per lo scenario futuro.

È stato applicato il modello di accrescimento di *Ruditapes philippinarum* confrontando le performance per 3 scenari (2019, 2049, 2099).

Le attività "*Valutazione del pericolo in relazione a potenziali scenari di cambiamento climatico*", "*Analisi dell'esposizione e sensibilità dei sistemi esposti ai possibili impatti dei cambiamenti climatici*" e "*Sviluppo ed applicazione di una metodologia di analisi di vulnerabilità e rischio*" hanno riguardato lo sviluppo di un approccio innovativo di analisi di rischio che integra metodi basati sull'analisi di sistemi complessi e strumenti di modellistica basati sull'*Intelligenza Artificiale (IA)* per valutare i rischi legati a molteplici fattori di pericolo, esposizione e vulnerabilità e alle loro interazioni su diverse unità spaziali e scale temporali. Le potenzialità dell'IA sono state qui sfruttate per modellare alcuni sistemi naturali e antropici del territorio della Città Metropolitana di Venezia, potenzialmente minacciati dal cambiamento climatico che sta ponendo rischi significativi tra cui l'erosione, l'inondazione costiera, l'eutrofizzazione e l'allagamento pluviale.

La metodologia proposta ha previsto un approccio a livelli successivi di approfondimento composto da 4 attività principali: *i.* l'identificazione e lo sviluppo di indicatori di pericolo, esposizione vulnerabilità, *ii.* la caratterizzazione di un framework concettuale di rischio per l'area metropolitana della città di Venezia, *iii.* il training e testing dei modelli di IA nello scenario baseline, *iv.* l'analisi di scenari di rischio futuri tramite IA integrando scenari climatici e ove possibile gestionali del MOSE.

Per quanto riguarda gli indicatori per la caratterizzazione dei rischi associati agli impatti dei cambiamenti climatici (*i*), sono state identificate le metriche utili per caratterizzare l'intensità e la frequenza di pericoli quali mareggiate, erosione costiera, allagamenti urbani ed eutrofizzazione ma anche per rappresentare i recettori esposti e il loro grado di vulnerabilità all'interno del territorio della città Metropolitana di Venezia e la sua laguna.

⁶ Umgiesser G., Matticchio B. (2006). Simulating the mobile barrier (MOSE) operation in the Venice Lagoon, Italy: global sea level rise and its implication for navigation. *Ocean Dynamics* 56, 320–332. <https://doi.org/10.1007/s10236-006-0071-4>

Nella fase successiva è stato caratterizzato un framework concettuale di rischio, comprendente le principali componenti associate agli impatti dei cambiamenti climatici nel territorio terrestre, costiero e lagunare della città Metropolitana di Venezia (ii). Il framework di analisi rischio è stato delineato sulla base delle linee guida dell'IPCC (Fifth IPCC Assessment Report (AR5) e IPCC Special Report on 'Global Warming of 1.5°C').

Tale framework ha posto le basi teoriche e concettuali per l'analisi di specifici rischi che sono stati esaminati a livello quantitativo tramite IA. Data la molteplicità delle variabili considerate, si è adottato un approccio modulare in cui il framework è stato suddiviso in 3 ambiti principali: 1. modulo lagunare, che si riferisce al pericolo di eutrofizzazione della laguna di Venezia, 2. modulo costiero, relativo ai rischi associati ai pericoli, quali alluvione costiera e perdita di qualità dell'acqua, che agiscono sulle aree costiere (o all'interfaccia terra-mare), e 3. modulo terrestre, riguardante i rischi associati al pericolo di alluvione pluviale che agisce sulle aree terrestri.

Secondo l'approccio proposto, per i suddetti tre moduli è stata sviluppata l'analisi di rischio, la quale ha previsto una prima valutazione nello scenario di baseline in cui alcuni modelli di IA selezionati vengono allenati e testati sui dati osservati (serie storiche passate) nel periodo baseline (iii). Infine, per quanto riguarda le analisi di rischi futuri, a partire dai modelli di IA nel baseline sono stati elaborati scenari di medio e lungo termine in cui sono stati inseriti dati di input per il futuro derivati da modelli climatici e biogeochimici con scenari RCPs 4.5 (forte mitigazione) e 8.5 (*business as usual*) (iv).

In particolare per il modulo lagunare, sono stati messi a punto differenti scenari di livelli di clorofilla (indicatore dell'eutrofizzazione) considerando sia condizioni climatiche future per gli anni 2049 e 2099, sia un contesto comprendente le chiusure del MOSE stimate per gli anni 2049 e 2090. Tali scenari sono stati possibili grazie alla collaborazione con l'attività "Applicazione di modelli integrati trasporto-biogeochimica semplificati e modelli di nicchia per la stima degli effetti di possibili scenari di cambiamento climatico" condotta da OGS nella presente linea, che ha elaborato e fornito le variabili biogeochimiche ottenute dal modello Shyfer-BFM. Il modulo costiero ha riguardato invece la formulazione di scenari del rischio di erosione costiera e della qualità dell'acqua, integrando in un modello probabilistico a reti bayesiane i dati resi disponibili dai ricercatori della Linea 5.1 sulle simulazioni di onde, livelli del mare e mareggiate per la regione del Nord Adriatico. Infine, per il modulo terrestre, che vede l'analisi degli scenari futuri di allagamento da piogge intense per la città Metropolitana di Venezia, si sono utilizzati i dati di precipitazione future del modello regionale COSMO-CLM del CMCC, che simula la precipitazione cumulativa giornaliera futura.

Nell'attività "Stima degli impatti economici legati ai fenomeni indotti dai cambiamenti climatici", sono stati stimati gli impatti economici legati ai fenomeni indotti dai cambiamenti climatici considerando gli scenari di cambiamento climatico elaborati dalla linea 5.1 e gli indicatori di pericolosità, esposizione e rischio sviluppati nelle attività precedenti, gli impatti economici del fenomeno di acqua alta per la laguna di Venezia e la sua città metropolitana e come questo viene amplificato dall'innalzamento del mare e subsidenza del terreno. In particolare, sono stati analizzati sia gli impatti di tipo finanziario, quindi relativi ai danni diretti al capitale costruito e materiale, che quelli di tipo economico, in termini di perdita di produzione e quindi di Prodotto Interno Lordo (PIL).

Per una stima delle proiezioni relative a livelli del mare estremi (ESL) storici e futuri, sono stati combinati i dati di elevazione ad alta risoluzione (25 cm) del modello 3D sviluppato, i dati di subsidenza del terreno e i dati del livello della superficie del mare simulati dall'ISMAR-CNR (Task 5.1.1) bias-corretto utilizzando i dati di marea dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. Per la proiezione futura, si presume che le maree astronomiche varino in base al periodo storico e si presume che il livello medio del mare sia di 17 cm superiore al valore storico in linea con l'RCP 8.5 per l'anno 2040. Gli ESL per ciascun mareografo sono adattati a una distribuzione di valori estremi generalizzata per i tempi di ritorno 2, 5, 10, 20, 50, 75, 100, 200, 250, 500 e 1000 anni e poi interpolati alla griglia di simulazione in cui vengono eseguite le correzioni del bias. I livelli di inondazione sulla terraferma sono calcolati confrontando gli ESL con l'elevazione della superficie terrestre inclusa la subsidenza per ogni scenario climatico e ogni scenario operativo MOSE (ossia MOSE non attivato e MOSE attivato a livelli ZMPS di 90 cm, 110 cm e 130 cm).

Gli impatti economici diretti sono calcolati in base al livello di inondazione per ciascun tempo di ritorno ESL e al valore dei beni esposti all'alluvione considerando sia i danni agli edifici (compresi i costi di ricostruzione) sia i costi e i danni al loro contenuto. I valori esposti sono caratterizzati dalla combinazione di informazioni geometriche sugli edifici esposti (posizione e dimensione), tipologie edilizie (residenziali, commerciali, industriali, agricole, trasporti, pubbliche e culturali) e di quartiere (es. sestieri) ottenute da OpenStreetMaps (ovvero palazzi e tipologia edilizia) con la valutazione economica dei costi di ricostruzione estratti da stime catastali. I livelli di inondazione sono applicati a funzioni di profondità-danno che traducono la grandezza di un evento alluvionale in un fattore di danno economico (danno percentuale): uno associato ai costi di ricostruzione che tengono conto dei danni alle strutture edilizie (livello dell'acqua all'esterno dell'edificio) e un altro associato ai costi generati dai danni al contenuto dell'edificio (acqua all'interno dell'edificio). Poiché la maggior parte degli edifici vulnerabili alle inondazioni a Venezia ha un certo grado di protezione contro di esse, la soglia del livello d'ingresso dell'acqua nell'edificio è impostata ad un valore più alto per la funzione di danni al contenuto dell'edificio.

Gli impatti economici indiretti legati ai diversi scenari alluvionali sono stati valutati utilizzando un modello Computable General Equilibrium (CGE) disaggregato spazialmente a livello regionale italiano, consentendo così una migliore rappresentazione delle dinamiche spaziali del disastro. Gli input inviati al modello CGE riguardano i danni diretti associati ad una singola alluvione "shock", che si traducono in interruzioni della produzione regionale/settoriale e del PIL e si propagano a tutto il sistema economico. La somma degli impatti diretti e indiretti integrati rispetto al tempo di ritorno fornisce una stima dei danni annui attesi (EAD).

5. Risultati per attività

I risultati ottenuti dall'attività "Sviluppo del modello digitale in 3D del sistema terra-acqua della gronda lagunare e della città metropolitana di Venezia" nei tre livelli dell'indagine possono essere sintetizzati come segue. I risultati del primo livello di indagine testano e documentano nuove tecniche di analisi per il riconoscimento della vulnerabilità territoriale legata a ripercussioni climatiche di diversa natura. Domini di vulnerabilità ed esposizione richiedono la definizione di nuovi paradigmi della 'conoscenza spaziale' articolabili per diversi contesti urbani e territoriali. Le metodologie di valutazione descritte nella presente linea di ricerca contribuiscono ad incrementare e innovare i quadri conoscitivi di supporto ai processi di pianificazione e governance locale. L'innovazione riguarda la produzione del prodotto spaziale, connessa sia a fondamentali cambiamenti nella composizione e rappresentazione tecnologica del dato, sia all'uso di nuovi algoritmi di analisi spaziale orientati a migliorare la costruzione dei database su vulnerabilità, esposizione e rischio.

I risultati del secondo e del terzo livello di indagine dimostrano come l'uso delle nuove tecnologie possa migliorare la costruzione dei livelli di esposizione e rischio, attraverso una classificazione del territorio secondo unità di planning (esagoni) ancorati a piattaforme conoscitive interscalari e aggiornabili nel continuo. Interscalarità e aggiornamento dipendono dall'integrazioni di informazioni provenienti da diverse sorgenti web e dalla combinazione dei dati telerilevati (open source) con parametri di natura spaziale. Con le elaborazioni prodotte dal secondo e dal terzo livello di indagine si testa l'associazione spaziale tra vulnerabilità ed esposizione, restituendo delle rappresentazioni cartografiche in grado di sintetizzare un valido indicatore geografico per stabilire priorità gestionali e pianificatorie degli spazi urbani e territoriali. Questo approccio metodologico vuole supportare gli strumenti di governo del territorio nella valutazione di opzioni di adattamento al cambiamento climatico il più possibile attente alle priorità di intervento in fase di gestione del rischio locale.

L'attività "Sviluppo di modelli specie-specifici per la valutazione dei rischi di impatti acuti sulla funzionalità ecosistemica e sulle risorse alieutiche" ha consentito di sviluppare metodologie per la valutazione quantitativa delle potenziali conseguenze di una particolare tipologia di evento estremo, le ondate di calore, sulle risorse alieutiche lagunari. Nell'ambito del progetto, tali metodologie sono state applicate alla

molluschicoltura, considerato un settore particolarmente vulnerabile agli impatti dei cambiamenti climatici, che tuttavia riveste ancora una certa rilevanza economica nell'ambito delle attività di sfruttamento delle risorse aliutiche lagunari. Si tratta, inoltre, di un settore caratterizzato da una elevata sostenibilità ambientale, come mostrano alcuni recenti studi basata sull'Analisi del Ciclo di Vita, e, ove la filiera produttiva, il consumo e recupero dei gusci fosse gestito in maniera adeguata, potenzialmente in grado di contribuire al sequestro di CO₂. È importante, tuttavia, sottolineare che l'approccio metodologico sviluppato nel progetto è applicabile anche ad altre specie, previa l'acquisizione di adeguate informazioni sperimentali.

I principali risultati riguardano entrambi gli aspetti sopra citati, cioè la vulnerabilità della molluschicoltura agli impatti dei cambiamenti climatici e il loro potenziale ruolo nel ciclo del carbonio.

1. L'elaborazione di scenari di sopravvivenza per le decadi 2030-2100 evidenzia un progressivo aumento del rischio che ondate di calore, cioè periodi prolungati in cui da temperatura dell'acqua rimane al di sopra di valori critici per gli organismi, causino mortalità massicce sia di vongole sia di mitili: tale tendenza si accentua marcatamente dal decennio 2060-2070. Queste stime si fondano sugli attuali scenari di emissione e su una catena di modelli per il calcolo della temperatura delle acque lagunari messi a punto nel task 5.2.1.3. Sarebbe quindi importante aggiornarle periodicamente, in base ai risultati dei modelli climatici, mantenendo attiva tutta la catena modellistica messa a punto durante il progetto.
2. L'applicazione del nuovo modello di accrescimento di *Ruditapes philippinarum* ha evidenziato una marcata dinamica stagionale del bilancio di carbonio legato all'attività fisiologica degli animali, in quanto l'accrescimento e, quindi, anche le emissioni legate al processo di calcificazione del guscio e il temporaneo sequestro di CO₂ nei gusci. Poiché l'accrescimento è condizionato dalla temperatura e dalla disponibilità di particelle alimentari, il modello prevede un flusso netto di CO₂ dal comparto del DIC (Dissolved Inorganic Carbon) all'organismo nel periodo primaverile ed estivo e, viceversa una emissione di CO₂ nel periodo autunno-invernale. Su base annua, l'attività metabolica di una vongola verace conduce al temporaneo sequestro, di circa 1 grammo di CO₂, se si considera il solo processo di calcificazione, e 0.30 g CO₂, se si aggiungono le emissioni legate alla respirazione.

Questi ed altri risultati di elevato valore scientifico, quali quelli relativi all'analisi del comportamento dei molluschi in relazione alle fluttuazioni delle principali variabili ambientali, sono stati presentati in dettaglio in cinque lavori scientifici pubblicati su riviste dotate di revisori alla pari e in numerose conferenze nazionali e internazionali.

L'attività "Applicazione di modelli integrati trasporto-biogeochimica semplificati e modelli di nicchia per la stima degli effetti di possibili scenari di cambiamento climatico", come sintetizzato in Tabella 1, ha permesso di realizzare 14 simulazioni di scenario chimico fisico e biogeochimico con SHYFEM e SHYFEM-BFM, con la griglia VenlagBio_20, costituita da 6017 nodi e 10417 elementi prodotta nella Linea 1.3. Sono state prodotte delle mappe per rappresentare la variabilità spaziale e temporale delle variabili di stato a cadenza mensile. Inoltre, sono state estratte le serie temporali di alcune variabili di interesse in alcune stazioni specifiche.

Tabella 1. Simulazioni di scenario per le acque della laguna di Venezia.

Durata	Barriere MOSE	Scenario climatico	Input biogeochimici	Variabili output	Frequenza output
2019- 2100	Con e senza	RCP 8.5	-	Temperatura Salinità Livelli	Media mensile
2049-2050 2089-2090 2099-2100	Con e senza	RCP 8.5 RCP 4.5	Carico invariato e Carico ridotto	Biogeochimiche BFM Temperatura Salinità	Media giornaliera Media mensile

In particolare, per quanto riguarda le proprietà chimico-fisiche, sono state realizzate le simulazioni in continuo dallo stato attuale al 2100, per due scenari climatici (RCP 4.5 e RCP 8.5) ed inserendo anche l'operatività del MOSE. Sono state quindi prodotte:

1. due simulazioni di scenario (RCP 8.5 e RCP 4.5) con MOSE operativo per rappresentare l'evoluzione delle variabili chimico fisiche ad alta risoluzione spaziale e temporale, dal 2019 al 2100. Sono stati prodotti i campi 2D (mediando il valore sulla colonna d'acqua, e mediati mensilmente) delle variabili: temperatura, salinità, livello;
2. due simulazioni di scenario (RCP 8.5 e RCP 4.5) senza MOSE operativo per rappresentare l'evoluzione delle variabili chimico fisiche ad alta risoluzione spaziale e temporale, dal 2019 al 2100. Sono stati prodotti i campi 2D (mediando il valore sulla colonna d'acqua, e mediati mensilmente) delle variabili: temperatura, salinità, livello.

La biogeochimica invece è stata prodotta utilizzando il modello accoppiato SHYFEM-BFM (con la griglia VenlagBio_20, costituita da 6017 nodi e 10417 elementi) per lo scenario biogeochimico RCP 8.5 mid-future (2049-50) e far-future (2099-2100) con e senza MOSE operativo. Sono stati prodotti i campi 2D (mediando il valore sulla colonna d'acqua, e mediati mensilmente) delle variabili: nitrato, ammonio, clorofilla, ossigeno disciolto, temperatura, salinità, fosfato. Sono stati estratti i valori delle variabili in corrispondenza delle stazioni SAMANET (disponibili in formato txt) per confronto con i valori misurati tra il 2005 e il 2019.

Sono state effettuate diverse analisi sugli output dei modelli per valutare gli effetti dei cambiamenti climatici e dell'operatività del MOSE mediante analisi delle anomalie di variabili di riferimento e di variabili derivate, quali azoto totale e produzione primaria.

Infine, è stato utilizzato un modello bioenergetico di accrescimento di *Ruditapes philippinarum* confrontando le performance per 3 scenari (2019, 2049, 2099), in tre diverse aree lagunari. Il modulo bioenergetico di accrescimento è stato forzato con le condizioni fisiche e biogeochimiche prodotte con SHYFEM-BFM in tre siti di localizzati in tre aree diverse della laguna (nord, centro e sud). In accordo con Canu et al., 2010⁷, il modello indica una riduzione degli accrescimenti di *Ruditapes* e una diminuzione della biomassa prodotta.

Le attività "Valutazione del pericolo in relazione a potenziali scenari di cambiamento climatico", "Analisi dell'esposizione e sensibilità dei sistemi esposti ai possibili impatti dei cambiamenti climatici" e "Sviluppo ed applicazione di una metodologia di analisi di vulnerabilità e rischio" hanno ottenuto molteplici risultati. In prima istanza è stato caratterizzato un pool specifico di indicatori di pericolo, esposizione e vulnerabilità per l'analisi dei rischi associati agli impatti dei cambiamenti climatici; in secondo luogo è stato definito un framework concettuale di rischio, comprendente le principali componenti associate agli impatti dei cambiamenti climatici (quali mareggiate, innalzamento del livello del mare, eutrofizzazione ed allagamenti urbani) nel territorio terrestre, costiero e lagunare della città Metropolitana di Venezia. Il framework di analisi rischio ottenuto è da intendersi come strumento utile alla conoscenza delle possibili interazioni e *feedbacks* tra indicatori di pericolo, vulnerabilità ed esposizione che intercorrono nel determinare il rischio di eventi collegati ai cambiamenti climatici (IPCC, 2014; 2018) nella laguna di Venezia e la sua città Metropolitana.

In terzo luogo, i modelli di IA sviluppati per tre i ambiti considerati a partire dal framework sopramenzionato (ovvero lagunare, costiero e terrestre) sono stati allenati e testati sui dati osservati (serie storiche passate) ed hanno prodotto risultati soddisfacenti, con buone accuratezze nella previsione di tutti gli indicatori di rischio considerati (ovvero clorofilla, movimento linea di costa (NSM), coefficiente di attenuazione diffusa della luce (KD), materiale particolato sospeso (SPM) e aree soggette ad inondazioni

⁷ Canu D. M., Solidoro C., Cossarini G., and Giorgi F. (2010). Effect of global change on bivalve rearing activity and the need for adaptive management, *Clim. Res.*, 42, 13–26, <https://doi.org/10.3354/cr00859>

pluviali), confermando la capacità di questi modelli di imparare trends e patterns autonomamente dai dati storici.

Rispetto le analisi dei rischi da cambiamenti climatici per il futuro ottenute con i modelli di AI sviluppati, nel modulo lagunare i risultati mostrano le variazioni annuali e stagionali di clorofilla nel medio (2049) e lungo (2099) termine, evidenziando un trend decrescente per i valori di clorofilla più bassi, mentre si nota un trend crescente per i valori di clorofilla più alti. A livello stagionale l'estate resta la stagione con i più alti valori di clorofilla in tutti gli scenari, sebbene nel 2099 ci si aspetta anche un incremento dei valori di clorofilla durante la stagione primaverile. Per quel che concerne gli scenari che tengono conto dell'effetto congiunto dei cambiamenti climatici con le future attivazioni del MOSE, sulla base dei dati di input forniti dal modello biogeochimico Shyfem-BFM, gli scenari di output dei modelli IA non riportano differenze significative in condizione di operatività o meno del MOSE.

I risultati del modulo costiero hanno permesso di caratterizzare l'evoluzione della linea di costa del territorio della Città Metropolitana di Venezia in relazione a variabili oceanografiche e di qualità dell'acqua; negli scenari proposti si sono evidenziate lievi variazioni rilevanti nelle diverse decadi considerate (ovvero, 2021-2030, 2031-2040 and 2041-2050). Nello specifico si nota una predominanza della condizione di stabilità della linea di costa fino al 2030, mentre si prospetta un incremento della deposizione di sedimenti lungo la costa nella decade tra il 2041 e 2050, la quale è anche associata ad un peggioramento delle condizioni della qualità dell'acqua, in termini di materiale particolato sospeso.

Infine, il modello di IA sviluppato per il comparto terrestre ha permesso di individuare le aree a maggiore rischio di alluvione da piogge intense per i periodi 2021-2030, 2031-2040 e 2041-2050 suddivisi per trimestre. Gli scenari futuri con RCP 4.5 prevedono un rischio maggiore di inondazioni pluviali nel primo e quarto trimestre per ciascuno dei tre decenni futuri. In particolare, si prevede che il quarto trimestre del periodo 2041-2050 sia il più critico. Nello scenario peggiore RCP 8.5, i modelli evidenziano un aumento consistente di eventi estremi per i decenni futuri rispetto allo scenario di baseline.

L'attività "Stima degli impatti economici legati ai fenomeni indotti dai cambiamenti climatici" ha prodotto due categorie di risultati relativi agli impatti economici diretti ed indiretti.

Impatti economici diretti

Per valutare i potenziali danni economici diretti dovuti alle inondazioni di Venezia e della sua laguna, si mette a confronto uno scenario di riferimento che utilizza i dati sull'altezza della superficie del mare per il periodo storico (2000-2019) con uno scenario climatico futuro RCP 8.5 (2040-2050) che include la subsidenza del terreno (Figura 6). Si stima che i danni annuali previsti a causa delle inondazioni aumenteranno da 18 milioni di euro nello scenario storico a 61 milioni EUR nello scenario del cambiamento climatico. I danni maggiori si registrano nel sestiere di San Marco (~40%) dove c'è un'alta concentrazione di edifici a bassa quota più vulnerabili e di edifici culturali di maggior valore. I danni minori tendono a essere nei sestieri a relativamente alta quota, quali Santa Croce (~5%) e San Polo (~7%). Il danno al contenuto dell'edificio tende ad essere superiore ai costi di ricostruzione in entrambi gli scenari. Inoltre, i danni al contenuto degli edifici sono maggiori per i siti residenziali, mentre i costi di ricostruzione tendono ad essere maggiori per i siti culturali.

Eventi con una frequenza più alta e un impatto più basso dimostrano un aumento relativo dei danni maggiore rispetto a eventi di frequenza più bassa e impatto più elevato. Ad esempio, l'evento con un periodo di ritorno di 5 anni si traduce in un danno totale previsto di 9 milioni di EUR nello scenario storico e di 49 milioni di EUR nello scenario RCP 8.5 per gli anni 2040, mentre si stima che il danno totale previsto dovuto all'evento di 100 anni sia 211 milioni EUR per il periodo storico e 464 milioni EUR per il periodo futuro.

Per valutare i potenziali effetti del MOSE nella riduzione dei danni economici diretti all'edilizia a Venezia e nella sua Laguna, vengono considerati tre diversi scenari di soglia di attivazione al livello minimo: 90 cm, 110 cm e 130 cm ZMPS. Per il clima storico, quando il MOSE viene attivato a 90 cm, 110 cm e 130 cm, il danno annuo stimato diminuisce rispettivamente da 18 milioni di euro a 0,10 milioni di euro, 0,51 milioni di

euro e 1,61 milioni di euro. Questi risultati indicano che il MOSE potrebbe svolgere un ruolo fondamentale nel ridurre i potenziali impatti economici diretti dovuti alle inondazioni di Venezia e della sua laguna. Tuttavia, è importante evidenziare che i risultati della modellizzazione qui mostrati includono i seguenti assunti: i) il MOSE ha un'efficienza del 100% ai fini del mantenimento dei livelli dell'acqua all'interno della laguna di Venezia al di sotto della soglia di attivazione; ii) il MOSE viene attivato alla soglia di altezza della superficie del mare in tutte le uscite contemporaneamente; e iii) i costi di attivazione del MOSE non sono considerati nelle stime economiche.

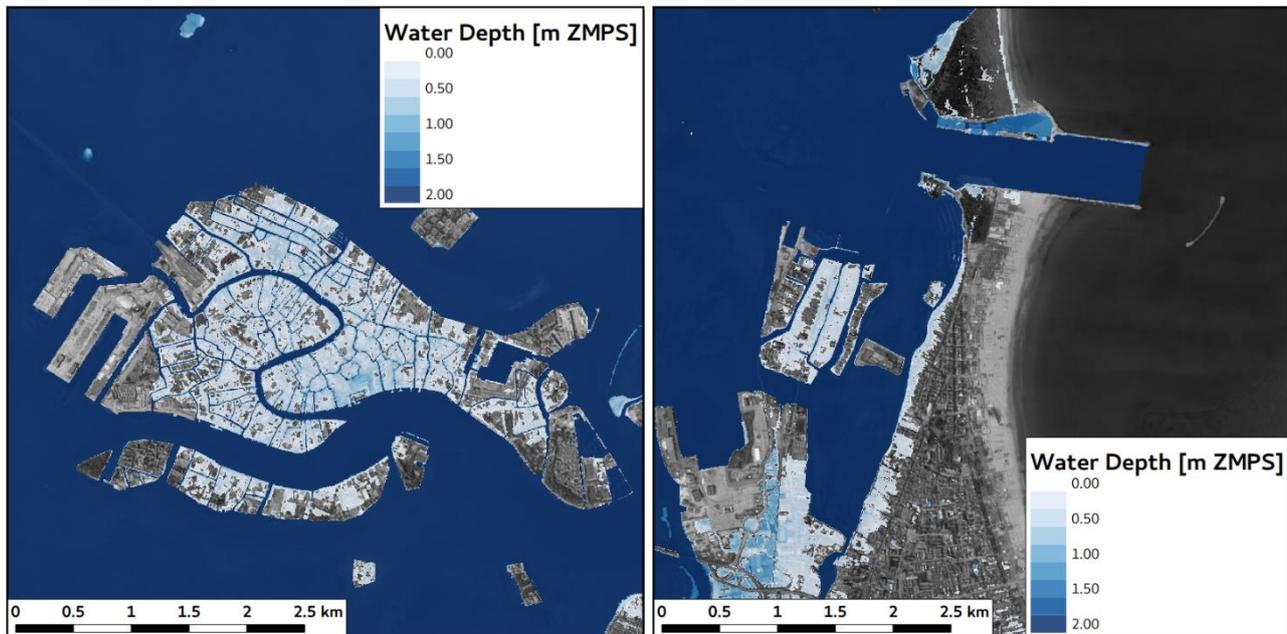


Figure 6. Mappa delle inondazioni per eventi di ritorno da 1 a 100 anni nel periodo climatico storico e utilizzando i dati ISPRA SSH. Gli scenari di inondazione rappresentano la profondità dell'acqua associata a una certa frequenza di occorrenza prevista, data una certa probabilità definita in termini di periodo di ritorno per 2, 5, 10, 20, 50, 75, 100, 200, 250, 500, 1000 anni. A sinistra, un esempio di mappa delle inondazioni del centro storico di Venezia, a destra, la mappa nei pressi di Chioggia.

Impatti economici indiretti

Le stime degli impatti indiretti dovuti alle inondazioni di Venezia e della sua laguna vengono effettuate valutando gli impatti post-evento degli impatti economici diretti sulle economie regionali e nazionali e per i principali settori produttivi, ovvero servizi, industria e agricoltura. Sia nello scenario storico che in quello futuro i danni diretti comportano un ulteriore 10% circa di costi indiretti. I costi sono prevalentemente limitati alla regione Veneto. Tuttavia, le vicine regioni di Lombardia ed Emilia-Romagna sono generalmente colpite negativamente dall'evento alluvionale in termini di PIL regionale. Ciò è dovuto all'interruzione della catena di approvvigionamento che è legata alla produttività regionale. Le regioni dell'Italia centro-meridionale mostrano un impatto scarso o nullo.

La maggior parte degli impatti economici diretti si verifica sul settore dei servizi, data la presenza di servizi di alto valore, in particolare quelli legati alle attività turistiche. Ad esempio, i danni diretti nello scenario storico risultano rispettivamente nello 0,001% e 0,027% di distruzione del capitale sociale per gli eventi di acqua alta di 5 e 100 anni, mentre nello scenario climatico RCP85 risultano nello 0,005% e 0,056% di distruzione. L'agricoltura e l'industria soffrono danni relativamente bassi a seguito dei bassissimi impatti diretti dovuti alla generale assenza di ampie aree agricole e industriali nella prossimità della laguna.

6. Obiettivi prefissati e raggiunti

È stato elaborato un modello digitale del terreno ad alta risoluzione spaziale con le seguenti finalità:

- produzione di un modello informativo tridimensionale del sistema terra-acqua della gronda lagunare rispettando le partizioni amministrative comunali del territorio;
- sviluppo di protocolli di valutazione degli impatti alimentati dal modello informativo tridimensionale e da informazioni prodotte da attività di remote sensing analysis.

Questi risultati consentono di fornire una base informativa utile per valutare e quantificare la vulnerabilità territoriale delle aree esposte agli impatti del cambiamento climatico. Si tratta di risorse informative e metodologiche che in futuro potranno arricchire il sistema tridimensionale/quantitativo al fine di supportare l'analisi degli impatti legati ai cambiamenti climatici sul sistema urbano.

È stato arricchito il quadro conoscitivo necessario alla valutazione della vulnerabilità delle risorse alieutiche lagunari ai cambiamenti climatici, mettendo a punto metodologie e strumenti operativi utilizzabili nella loro gestione, e nella pianificazione e messa in opera di azioni di adattamento, necessarie per garantire la sopravvivenza di questo settore, raggiungendo così anche l'obiettivo legato alla modellazione e valutazione degli impatti rilevanti sugli ecosistemi lagunari degli effetti di eventi climatici estremi (es. perduranti condizioni di temperatura elevata, drastiche variazioni di salinità legate a prolungati periodi siccitosi) e delle variazioni delle principali caratteristiche biogeochimiche ipotizzabili rispetto agli scenari climatici considerati nel progetto. In particolare, sono stati sviluppati modelli per la stima degli effetti di perduranti condizioni di temperatura elevata sulla sopravvivenza e accrescimento delle due principali specie di molluschi allevati in laguna di Venezia, (*Ruditapes philippinarum* e *Mytilus galloprovincialis*). Si è inoltre messa a punto una metodologia per la creazione di scenari di temperatura dell'acqua e sedimento lagunari ad elevata risoluzione temporale, che tengono quindi conto delle marcate fluttuazioni giornaliere di tali variabili nelle aree più confinate della laguna. Tali scenari potrebbero essere utilizzati per valutare le probabilità di sopravvivenza anche di altre specie rilevanti per il funzionamento dell'ecosistema lagunare. Infine, sono stati elaborati modelli sito-specifici per l'elaborazione in tempo reale di dati di qualità dell'acqua rilevati con frequenza uguale o inferiore a quella oraria, e la previsione a breve termine della temperatura dell'acqua e della concentrazione di ossigeno disciolto: questi strumenti potranno essere utilizzati per estendere i modelli di "tolerance landscape", aggiungendo alla temperatura sia la salinità sia la concentrazione di ossigeno disciolto, quali potenziali co-stressori.

Parallelamente anche l'attività "Applicazione di modelli integrati trasporto-biogeochimica semplificati e modelli di nicchia per la stima degli effetti di possibili scenari di cambiamento climatico" ha contribuito al raggiungimento dell'obiettivo legato alla modellazione e valutazione delle principali caratteristiche biogeochimiche ipotizzabili rispetto agli scenari climatici considerati, lavorando sulla produzione delle condizioni chimico fisiche e biogeochimiche delle acque della Laguna per gli scenari di cambiamento climatico a supporto della stima dei rischi di impatto climatico sulla funzionalità ecosistemica. Il modello, prodotto ad alta risoluzione spaziale e temporale permette di definire le aree a maggior rischio rispetto gli impatti attesi e il verificarsi di eventi estremi.

L'obiettivo di Programma volto a sviluppare indicatori misurabili dei possibili cambiamenti al contesto economico e sociale della città storica e del contesto metropolitano è stato affrontato tramite due fasi principali: l'identificazione e la prioritizzazione delle aree che maggiormente potrebbero essere influenzate da eventi pericolosi legati a scenari di cambiamento climatico; nonché la caratterizzazione delle vulnerabilità fisico-ambientali e sociali dei recettori naturali ed antropici esposti mediante la selezione di un pool di indicatori chiave e l'elaborazione di un framework concettuale di multi rischio, comprendente le principali componenti associate agli impatti dei cambiamenti climatici nel territorio terrestre, costiero e lagunare della città Metropolitana di Venezia. È stato inoltre stimato il rischio di impatti potenziali, in considerazione di scenari futuri di cambiamento climatico nonché gestionali legati alla messa in funzione del sistema MOSE; tali stime sono da considerarsi parte di strumenti di gestione utili alla prevenzione e riduzione di eventi potenzialmente impattanti legati ai cambiamenti climatici. Per i territori lagunare, costiero e terrestre è stata sviluppata l'analisi di rischio, per cui sono stati allenati e testati sui dati osservati

(serie storiche passate) alcuni modelli di IA (toccando anche l'obiettivo di affinare strumenti modellistici in grado di fornire previsioni a breve, medio e lungo termine), i quali hanno prodotto risultati soddisfacenti, con buone accuratezze nella previsione di tutti gli indicatori di rischio considerati (ovvero clorofilla, movimento linea di costa, coefficiente di attenuazione diffusa della luce, materiale particolato sospeso e aree soggette ad inondazioni pluviali), confermando la capacità di questi modelli di imparare trends e patterns autonomamente dai dati storici. Infine, per quanto riguarda le analisi di rischi futuri, a partire dai modelli di IA nello scenario baseline sono stati elaborati scenari di medio e lungo termine in cui sono stati inseriti dati di input per il futuro derivati da modelli climatici e biogeochimici con scenari RCPs 4.5 (forte mitigazione) e 8.5 (*business as usual*) forniti da altri task e linee della Tematica.

Infine, in relazione all'obiettivo generale di Programma di creare degli strumenti di gestione utili a provvedere a collaudare, assieme alle chiusure mobili, i mezzi atti a garantire le risposte gestionali ad una serie ampie di problematiche, per ridurre quanto possibile ogni tipo di rischio, l'attività di "Stima degli impatti economici legati ai fenomeni indotti dai cambiamenti climatici" ha raggiunto i seguenti obiettivi:

- Produzione di mappe dei tempi di ritorno per eventi di acqua alta che interessano la laguna di Venezia nel clima attuale e una proiezione del cambiamento climatico per gli anni 2040 considerando la subsidenza del terreno e il funzionamento del MOSE.
- Sviluppo di un modello di danno associato con la profondità alluvionale calibrato per le aree territoriali di Venezia, che può essere utilizzato per scenari di cambiamento climatico, scenari di funzionamento del MOSE, scenari di adattamento, ecc.
- Stima dei danni annui – sia diretti che indiretti – associati agli eventi di acqua alta nella laguna di Venezia considerando i diversi livelli del mare, la subsidenza del terreno e il funzionamento del MOSE.