



Venezia2021

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

Linea 5.1

***Scenari di cambiamento climatico
per Venezia e la sua laguna***

Rapporto Finale

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

Davide Zanchettin (DAIS-UNIVE)

06/09/2022

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Davide Zanchettin".

EXECUTIVE SUMMARY

1. Principali risultati emersi dalla Linea riferiti agli obiettivi iniziali

Il progetto di ricerca “Scenari di cambiamento climatico per Venezia e la sua laguna” ha definito l’evoluzione più probabile, e l’incertezza associata, dei parametri meteo-climatici rilevanti per la valutazione di rischio ambientale nell’area veneziana nei prossimi decenni, utilizzando metodologie innovative, in un contesto altamente interdisciplinare.

Per quanto riguarda le previsioni di cambiamento del livello relativo del medio mare a Venezia e degli eventi di acqua alta, i risultati della ricerca ottenuti da proiezioni climatiche di tipo probabilistico sulla base di due scenario socio-economici (uno ottimistico, RCP2.6, e un pessimistico, RCP8.5, in termini di emissione antropica di CO₂ in atmosfera) sono pari ad un innalzamento a fine secolo di 47 cm (con incertezza nell’intervallo 32–62 cm) per lo scenario RCP2.6 e di 81 cm (con incertezza nell’intervallo 58–110 cm) per lo scenario RCP8.5, rispetto alla media del periodo 1986–2005. La ricerca ha permesso di stabilire che **l’innalzamento del livello relativo medio del mare è la causa primaria dell’aumento osservato della frequenza di eventi di mareggiata a Venezia nel corso degli ultimi 150 anni**. L’innalzamento del livello relativo medio del mare è attribuito in parti quasi uguali all’innalzamento dei mari a causa del cambiamento climatico e alla subsidenza, ovvero all’abbassamento del suolo, in gran parte causato nel secolo scorso ad un contributo antropico legato all’estrazione di acqua dal sottosuolo. Su questa base, è stato possibile stimare che per lo scenario RCP8.5, **l’evento di mareggiata del secolo (ovvero quello che avviene una volta ogni 100 anni) potrebbe aumentare di 26–35 cm entro metà secolo e di 53–171 cm a fine secolo, rispetto al valore attuale**. La ricerca ha dimostrato che esiste una variabilità significativa nel livello del mare a Venezia su scala interdecadale legata a fenomeni climatici che riguardano soprattutto l’Oceano Atlantico settentrionale; questa variabilità potrebbe comportare in futuro periodi lunghi anche alcuni decenni in cui il livello del mare a Venezia non aumenta, come già osservato tra gli anni ‘60 e ‘90’. Simulazioni numeriche col modello idrodinamico FESOM-C applicato all’Adriatico e alla laguna di Venezia indicano che nella laguna di Venezia l’innalzamento del medio mare potrebbe essere caratterizzato, a metà secolo, da differenze tra porzione settentrionale e porzione meridionale di 1-1.5 cm (livelli più elevati nord) che raggiungono i 2.5-3 cm nel caso di valori estremi, probabilmente legate a variazioni nella ripartizione del trasporto di acqua attraverso le bocche di porto.

Per quanto attiene il clima ondoso in prossimità delle bocche di porto nel contesto del cambiamento climatico, i risultati della ricerca hanno mostrato che l’intensità media dei venti sul mare attesi per il trentennio 2021-2050 è simile a quella del periodo storico recente 1981-2010, mentre una riduzione fino a circa 1 m/s è attesa per gli eventi più estremi (99° percentile) e maggiormente nel settore più settentrionale del Mare Adriatico. L’intensità delle mareggiate segue un andamento simile: in particolare, **davanti alle tre bocche di porto della laguna di Venezia, i valori futuri dell’altezza significativa** (che rappresenta un indicatore dell’energia del moto ondoso) **sono previsti in riduzione di circa il 3-4% (scenario intermedio, RCP4.5) e circa l’8-9% (RCP 8.5)**. In ogni caso, per i venti nel Nord Adriatico, le mareggiate di Bora (da nord-est) sembrano soggette ad una maggiore variazione rispetto alle mareggiate di Scirocco (da sud-est), tenuto conto che le differenze tra i due regimi sono comunque minime (contenute entro il 2%). **Queste modifiche comportano un sostanziale aumento dei tempi di ritorno degli eventi più estremi**, di circa due volte per lo scenario RCP4.5 e di tre volte per lo scenario RCP8.5, il quale sembra quindi maggiormente impattare il clima ondoso locale. Per quanto attiene gli scenari di precipitazione, i dati ottenuti da diversi modelli (MedCORDEX e modelli CMCC ad altissima risoluzione) forniscono indicazioni diverse per le diverse stagioni, domini spaziali considerati (Nord Italia e provincia di Venezia) e orizzonte temporale dello scenario considerato (metà secolo o fine secolo), in alcuni casi con incertezze sostanziali. Tra i risultati più consistenti si segnalano, per i valori simulati a metà secolo e con scenario socio-economico RCP8.5, un aumento delle precipitazioni giornaliere in inverno sull’area del Nord Italia (in particolare sulla catena alpina) ed autunno (in particolare nella parte orientale del dominio) e una diminuzione in estate piuttosto uniforme su tutto il dominio (uno dei modelli utilizzati, CNRM, indica invece un aumento). Per lo

stesso periodo e scenario, le precipitazioni giornaliere in provincia di Venezia sono attese in diminuzione in estate e in aumento in autunno.

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

2.1 Scenari di innalzamento del livello relativo del mare a Venezia

Gli scenari di innalzamento del livello relativo del mare a Venezia, basati su proiezioni climatiche indicano, per lo scenario RCP8.5, con emissioni antropiche di CO₂ compatibili con quanto osservato attualmente, un **aumento del livello medio del mare a fine secolo compreso tra 58–110 cm rispetto alla media del ventennio 1986-2005**. Va notato che l'innalzamento potrebbe raggiungere i 180 cm se dovesse verificarsi uno scenario di forte scioglimento delle calotte polare, scenario poco probabile ma possibile. Le proiezioni sono dunque caratterizzate da una forte incertezza, dovuta alle incognite circa le emissioni antropiche future di CO₂ in atmosfera e alle limitazioni degli strumenti predittivi utilizzati (i modelli climatici). A queste variazioni nel livello medio corrispondono variazioni nelle statistiche degli eventi di acqua alta: per lo scenario RCP8.5, l'evento di mareggiata del secolo (ovvero quello che avviene una volta ogni 100 anni) potrebbe aumentare di 26–35 cm entro metà secolo e di 53–171 cm a fine secolo, rispetto al valore attuale. All'aumento del livello del mare e della durata di eventi di acqua alta oltre la soglia di controllo corrisponderà un aumento del tempo di chiusura del MOSE nell'arco dell'anno; **la chiusura delle bocche a mare per un totale di 3 settimane all'anno è improbabile prima del 2050 ma virtualmente sicuro entro fine secolo**, anche nel caso di scenari di emissione ottimistici. Per lo scenario RCP8.5, la chiusura del MOSE per un totale di 6 mesi all'anno potrebbe avvenire entro fine secolo (vedasi Figura 1).

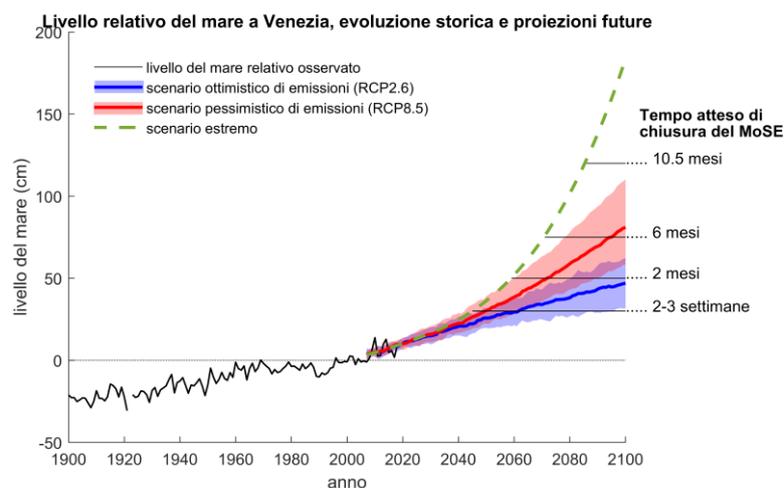


Figura 1. Evoluzione storica e proiezioni future del livello del mare a Venezia con indicati i tempi attesi di chiusura del MOSE (dati da Lionello et al., 2021¹, e Zanchettin et al., 2021²). Gli scenari si riferiscono a due diverse ipotesi di emissioni antropiche di gas climalteranti (emissione ridotte in blu, emissioni elevate in rosso) e ad una ipotesi (scenario estremo, linea verde tratteggiata) in cui ad emissioni elevate e ad un forte riscaldamento globale si associa uno scioglimento spinto delle calotte polari, con un conseguente forte contributo di massa all'innalzamento degli oceani. Per i due scenari di emissioni considerati, le proiezioni sono illustrate come variazione media fornita dai modelli climatici (linea) e incertezza legata alle specificità dei modelli (ombreggiatura).

¹ Lionello P., Nicholls R. J., Umgiesser G. and Zanchettin D. (2021) Venice flooding and sea level: past evolution, present issues, and future projections (introduction to the special issue), *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 21, 2633–2641, <https://doi.org/10.5194/nhess-21-2633-2021>

² Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 21, 2643–2678, 2021 <https://doi.org/10.5194/nhess-21-2643-2021>

2.2 Scenari di intensità delle mareggiate in Adriatico

Nel prossimo trentennio 2021-2050 è previsto che l'intensità delle mareggiate (valore dell'altezza significativa H_s) nel Mare Adriatico diminuisca, soprattutto durante gli eventi più estremi (99° percentile). Questo risulta per entrambi gli scenari IPCC di emissione RCP4.5 ed RCP8.5, come si può notare in Figura 2.

Di fronte alle tre bocche di porto della laguna di Venezia, in prossimità delle opere del MOSE, l'energia delle mareggiate è prevista in riduzione per il periodo 2021-2050 (scenari RCP4.5 e d RCP8.5), sia per il quadrante di Bora che per quello di Scirocco.

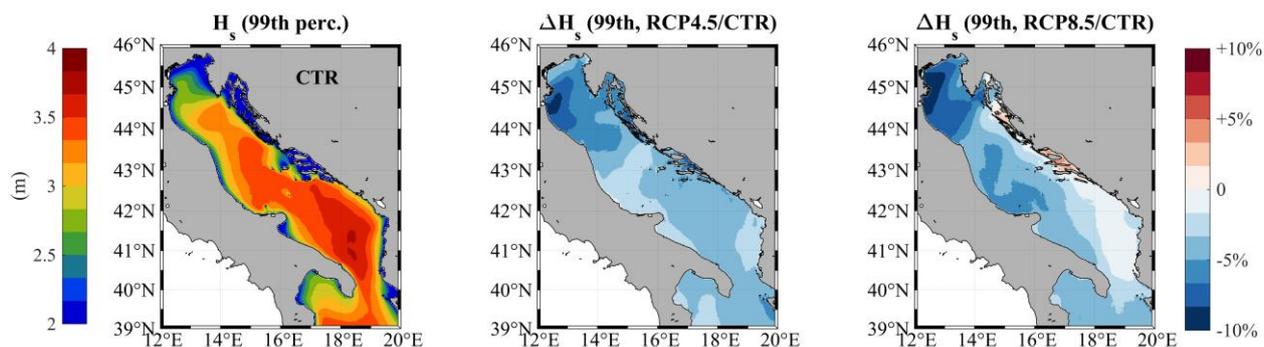


Figura 2. Intensità delle mareggiate estreme (99° percentile) e proiezioni future della sua variazione

2.3 Scenari di previsione degli eventi piovosi

L'analisi di simulazioni storiche e di scenario futuro effettuate con modelli climatici regionali ad alta e altissima risoluzione hanno permesso di fornire indicazioni circa le variazioni attese nella precipitazione sull'area della provincia di Venezia. Il segnale climatico delle precipitazioni giornaliere che risulta dalle analisi stagionali dei modelli sul dominio provincia di Venezia in Figura 3, indica una diminuzione in estate, piuttosto uniforme su tutto il dominio ed un aumento delle precipitazioni giornaliere in autunno, più evidente per il modello climatico CCLM URB a 3 km.

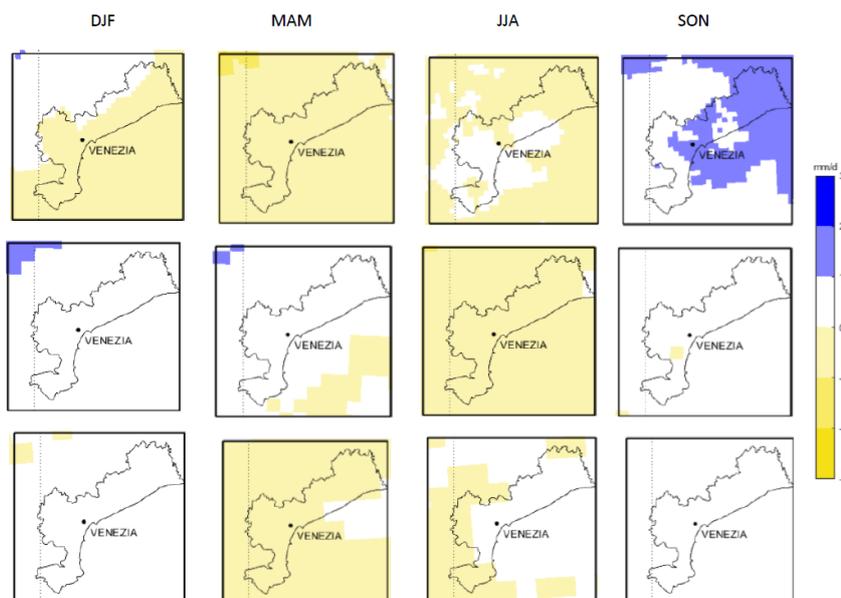


Figura 3. Mappe di variazioni nella precipitazione giornaliera sul dominio della provincia di Venezia per le quattro stagioni (inverno DJF, primavera MAM, estate JJA, autunno SON) simulate da modelli a diversa risoluzione (in alto: modello CCLM-URB a 3 km; in mezzo: modello ITALY-CCLM a 8 km; in basso: media di simulazioni con vari modelli EURO-CORDEX a 12 km).

3. Spunti per il futuro

Per quanto attiene l'innalzamento del livello del mare a Venezia, gli scenari che è stato possibile sviluppare nell'ambito di questa ricerca sono affetti da grande incertezza, con valori che si estendono da 32 a 110 cm, tenendo conto del fattore antropico (quindi gli scenari di emissione di CO₂) ed escludendo il caso "high-end" (ovvero di massimizzazione di tutti i contributi al cambiamento climatico avverso per Venezia). Si tratta chiaramente di un range troppo ampio per poter essere utile ad una discussione costruttiva sul futuro di Venezia. È dunque necessario continuare a approfondire impegno nella ricerca dedicata alla comprensione dei fatti fondamentali che riguardano le variazioni del livello del mare a Venezia, incluso lo sviluppo e l'applicazione di modelli numerici. Inoltre, la ricerca condotta in Venezia2021 ha permesso per la prima volta di sondare la possibilità di effettuare previsioni di variazioni del livello del mare a Venezia di breve termine, ovvero per il prossimo decennio o poco oltre. Il traguardo raggiunto finora è quello di un proof-of-concept più che un sistema predittivo, che richiede ulteriori sforzi e risorse per poter essere definito e testato. Nello specifico, sul tema delle previsioni e proiezioni del cambiamento del livello del mare a Venezia si intravedono i seguenti ambiti di sviluppo:

- utilizzo di un modello idrodinamico che copra l'intero Mare Mediterraneo e parte dell'Oceano Atlantico orientale per consentire un *downscaling* ottimale delle informazioni ottenute da modelli climatici globali al caso della laguna di Venezia;
- una connessione più diretta e meglio integrata con proiezioni climatiche e con sistemi per la previsione climatica di medio-termine, sia di tipo deterministico (ovvero modelli climatici) che di tipo statistico, per favorire la robustezza dei risultati;
- migliore integrazione degli scenari di cambiamento climatico con scenari di subsidenza per la laguna di Venezia, in particolare considerando scenari di subsidenza che tengano conto dell'eterogeneità spaziale dei moti verticali della superficie e della componente antropica, legata ad esempio alla subsidenza indotta da nuove installazioni, incluso il MOSE. I risultati ottenuti col modello FESOM-C dimostrano infatti che la circolazione nella laguna cambia con l'innalzamento climatico e variazioni di batimetria, soprattutto nei pressi delle bocche di porto, potrebbero essere importanti in questo senso. Questi scenari combinati andrebbero esplorati col modello menzionato nel primo punto.

Sul tema delle previsioni e proiezioni degli effetti del cambiamento climatico sul moto ondoso si intravedono i seguenti ambiti di sviluppo:

- estensione delle proiezioni climatiche verso la fine del secolo attuale, al fine di coprire il periodo di vita utile del MOSE (per questa ricerca ci si è fermati al 2050);
- indagine dell'impatto del climate change sulla stabilità e mobilitazione dei litorali del Nord Adriatico;
- uso di un ensemble di modelli climatici per stimare l'incertezza delle previsioni future.

DESCRIZIONE ESTESA

4. Descrizione delle attività / Unità Operative

Per quanto attiene la task 5.1.1.1 “Previsioni di medio termine tramite modelli statistici” (Davide Zanchettin, UNIVE) le attività hanno riguardato soprattutto l’analisi statistica della serie storica dei livelli relativi del mare a Venezia tramite l’utilizzo di metodi statistici avanzati, inclusi un modello statistico di tipo gerarchico Bayesiano e un modello di decomposizione del segnale di tipo “Singular Spectrum Analysis” (SSA), applicati entrambi anche in fase predittiva. Il modello gerarchico Bayesiano è descritto nel dettaglio nella milestone M5.1.1.3 e nel deliverable D5.1.1.1 e si ricordano qui solo le sue caratteristiche principali: innanzitutto è in grado di separare i diversi contributi (o livelli) che compongono il dato osservato di un fenomeno e le incertezze ad esso associate, ovvero la misura, il processo fisico di interesse, e i parametri del modello statistico utilizzato per la sua analisi; quindi, all’interno del livello che descrive il processo, il modello è in grado di distinguere diverse componenti della variabilità, inclusi trend non-lineari e l’effetto di covariate. La decomposizione SSA è un metodo indipendente che permette, similmente al modello gerarchico, di estrarre il contributo deterministico e quindi predicibile di una serie storica, a sua volta separato in modi di variabilità, dal rumore. La base di partenza per le analisi è stata la serie storica del livello relativo del mare ottenuta dai mareografi di Venezia, in particolare quello di Punta della Salute, che copre circa 150 anni come illustrato nella figura qui sotto. La disponibilità dei dati degli estremi mareali a scala giornaliera ha permesso di studiare nel dettaglio la relazione tra incremento del livello del medio mare e incremento nella frequenza di mareggiate, come illustrato a titolo esemplificativo nella Figura 4.

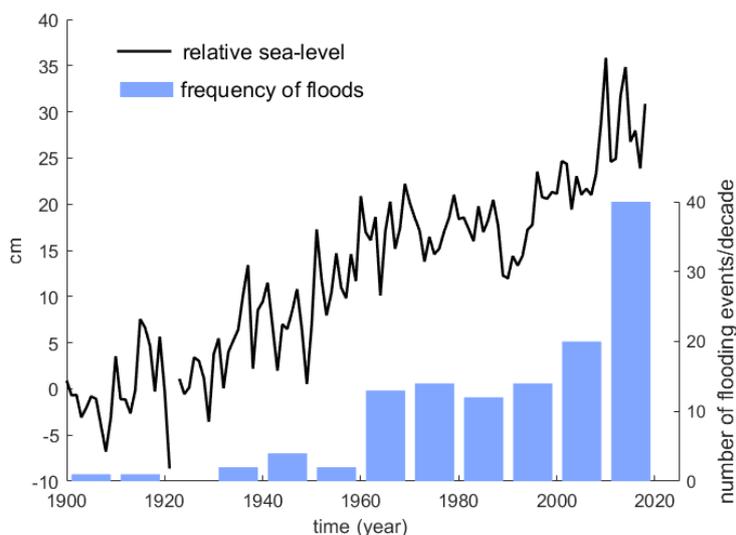


Figura 4. Andamento della serie storica del livello relativo del mare a Venezia (media annuale) dal 1900 e associato incremento della frequenza di mareggiate (acque alte con picco superiore a 120 cm).

È stato organizzato uno *splinter meeting* alla conferenza internazionale EGU General Assembly 2019 (Milestone M5.1.1.2) che ha portato alla creazione un gruppo di discussione sui temi dell’innalzamento del livello del mare a Venezia e all’elaborazione di scenari di innalzamento del mare a Venezia condivisi da un nutrito gruppo di scienziati internazionale e, infine, alla special issue “Venice flooding and sea level: past evolution, present issues, and future projections” pubblicata nella rivista *Natural Hazards and Earth System Sciences*.

Per quanto attiene la task 5.1.1.2 “Previsioni di medio e lungo termine tramite ensemble di simulazioni con modelli dinamici (Silvio Gualdi, CMCC) sono stati analizzati i dati riguardanti le previsioni di medio e lungo termine ottenute tramite simulazioni con modelli regionali per il bacino del Mediterraneo, in particolare due modelli sviluppati nell’ambito del programma Med-CORDEX: il modello COSMO-MED implementato

dalla Fondazione CMCC ed il modello CNRM-ALADIN52 (sostituito da CNRM-RCSM4 solo per il livello medio mare) sviluppato del CNRM. La risoluzione atmosferica dei due modelli è dell'ordine di 0.11 gradi (circa 11 km) e i rispettivi oceani hanno una risoluzione di 0.06 gradi (circa 6 km) e 0.12 (circa 12 km) per il modello CMCC e CNRM rispettivamente. Lo scenario scelto per le analisi è l'RCP8.5 riferito ad un aumento del forzante radiativo di 8.5 W/m² al 2100, rispetto al 1850. Le variabili diagnostiche considerate sono state temperatura dell'aria a 2 metri, precipitazione, pressione sul livello del mare, intensità del vento e livello medio mare (per maggiori dettagli consultare la milestone M5.1.1.4).

Per quanto attiene la task 5.1.1.3 "Previsioni di medio termine modelli numerici del CMCC ad altissima risoluzione" (Paola Mercogliano, CMCC), la divisione REMHI della Fondazione CMCC ha sviluppato il "Database dalle simulazioni climatiche alla risoluzione di 8 km" (per maggiori dettagli consultare la Milestone 5.1.1.1). Tali dati climatici a frequenza giornaliera ottenuti dal modello COSMO-CLM ad alta risoluzione (8 km) sono stati condivisi con le altre Linee di ricerca consentendo la valutazione del moto ondoso nell'area lagunare. Inoltre la divisione REMHI della Fondazione CMCC ha condotto un "Confronto simulazioni EURO-CORDEX e hi-res" (per maggiori dettagli consultare la Milestone 5.1.1.5) consentendo la valutazione dei risultati della simulazione con modello climatico non idrostatico COSMO-CLM ad altissima risoluzione (circa 3 km), relativi al periodo di controllo (2000-2009) e all'esperimento di "evaluation". I risultati forniscono indicazione, in generale, dell'esistenza di un valore aggiunto della simulazione ad altissima risoluzione in zone ad elevata complessità orografica (catene montuose come le Alpi). Infine la divisione REMHI della Fondazione CMCC ha sviluppato il "Downscaling dinamico ad altissima risoluzione" (per maggiori dettagli consultare il Deliverable 5.1.1.3) che ha consentito analisi di dati climatici, in riferimento sia al periodo storico che allo scenario, derivati dal modello regionale non idrostatico COSMO-CLM ad altissima risoluzione (circa 3 km), per valutare, in termini sia medi che estremi, le variazioni del clima attese sull'area della città di Venezia. Il modello, grazie alla sua elevata risoluzione, è anche in grado di includere delle parametrizzazioni specifiche per una migliore rappresentazione delle dinamiche urbane. Le analisi dei dati climatici si riferiscono ad un box centrato su provincia di Venezia (11.8°E – 13.1°E ; 45°N – 45.9°N) e ad un dominio su Nord Italia (8°E - 16°E ; 44°N – 48°N). Le variazioni attese in termini di temperature massime e minime sono illustrate Figura 5.

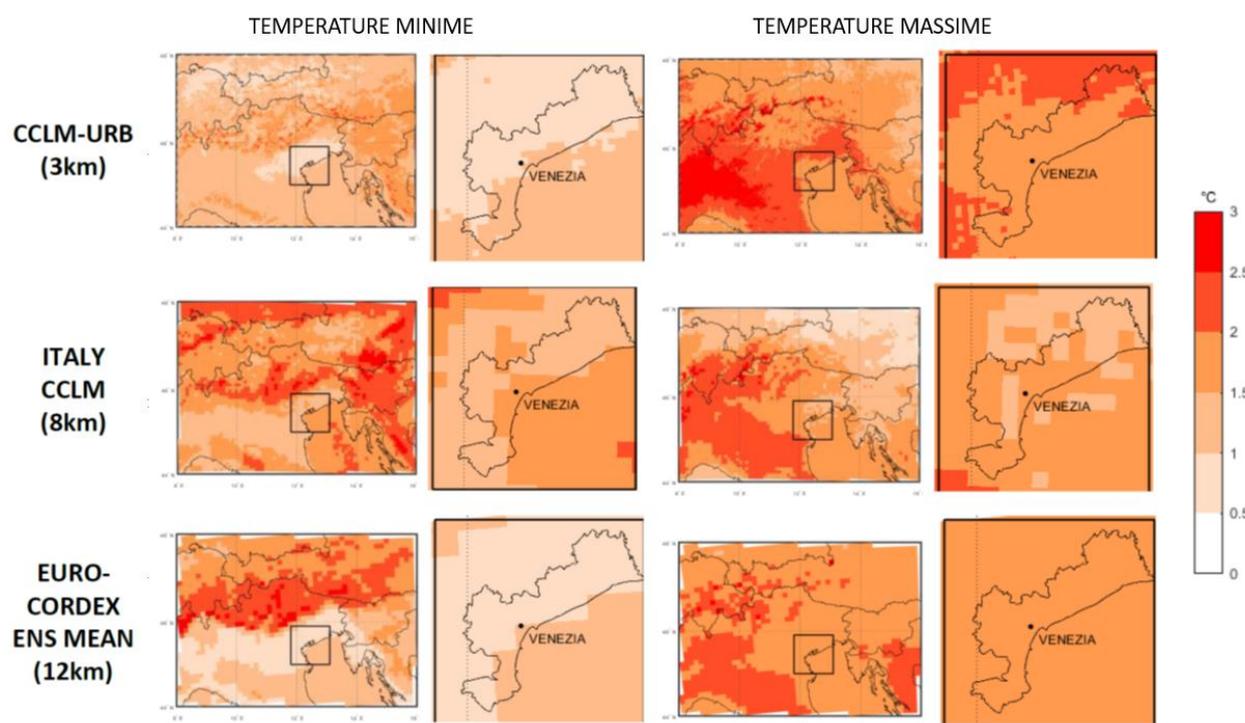


Figura 5. Variazioni di temperatura attese a metà secolo (2041-2050) in Nord Italia e nella provincia di Venezia per lo scenario socio-economico SSP8.5 rispetto ai valori storici (1996-2005) ottenute da diversi modelli. Sinistra: temperature minime (10° percentile); destra: temperature massime (90° percentile).

A causa dell'elevato costo computazionale richiesto per lo svolgimento di tali simulazioni, anche in accordo ai protocolli stabiliti da progetti attualmente in sviluppo (e.g. CORDEX FPS: Convective Phenomena over Europe and Mediterranean) è stato simulato un periodo di 10 anni, 2041-2050 (utilizzando lo scenario IPCC RCP8.5) e, per quanto attiene il periodo storico, il decennio 1996-2005. La scelta dello scenario RCP8.5 è dovuta all'obiettivo di considerare un "worst case" ed uno scenario realistico a livello globale rispetto al confronto con le osservazioni. Sono stati effettuati dei confronti tra i risultati della simulazione a 3 km del modello COSMO-CLM che include delle parametrizzazioni urbane, con quelli ottenuti con il medesimo modello climatico regionale COSMO-CLM ad 8 km circa di risoluzione, ottimizzato sull'area italiana dal CMCC, ed i risultati dei modelli disponibili nel programma EURO-CORDEX (Giorgi et al., 2009) alla risoluzione di 12 km circa, in riferimento agli esperimenti "historical", periodo 1996-2005, e "scenario", periodo 2041-2050 utilizzando lo scenario RCP8.5.

Per quanto attiene la task 5.1.2.1 "Modellazione spazio-temporale della precipitazione con approccio basato sui superamenti di soglia (Peak Over Threshold)" (Carlo Gaetan, UNIVE) sono stati sviluppati una serie di modelli statistici spazio-temporali per la simulazione della pioggia applicati all'area Veneziana. I modelli sviluppati hanno riguardato i soli eventi piovosi estremi (come descritto nella milestone M5.1.2.1) e l'intera distribuzione dell'intensità degli eventi piovosi (come descritto nella milestone M5.1.2.3). I modelli si basano sul modello a sito singolo "Extended Generalized Pareto Distribution". La distribuzione considerata non richiede una specificazione di una soglia ma modella adeguatamente l'intera gamma di precipitazioni, non solo per migliorare l'inferenza per quantili elevati. Caratteristica ulteriore dell'implementazione è che i parametri della distribuzione assunta possono essere modellati come funzioni aggiuntive di variabili esplicative, ad esempio coordinate spaziali, trend temporali, scenari climatici. Il caso di studio è stato costruito sui dati di pioggia giornalieri ottenuti da stazioni meteorologiche nell'area Veneziana dal 1956 al 2018 forniti da ARPA-Veneto.

Per quanto attiene la task 5.1.2.2 "Simulazione di eventi di acqua alta a Venezia per diversi scenari di variabilità climatica di larga scala" (Angelo Rubino, UNIVE), è stata implementata una versione del modello numerico idrodinamico FESOM-C all'area del Mare Adriatico e della laguna di Venezia, con una risoluzione variabile per permettere di includere dettagli importanti della batimetria nella laguna di Venezia e nelle zone antistanti nel mare Adriatico. Dopo l'implementazione e una fase di test sono stati condotti due esperimenti: il primo consiste in un ensemble (insieme) di simulazioni storiche per il periodo ottobre-dicembre tra il 2000 e il 2010; il secondo consiste in un ensemble di simulazioni di scenario per il periodo ottobre-dicembre tra il 2040 e il 2050. Le simulazioni di scenario usano dati per il forzante atmosferico e condizioni al contorno per l'oceano che tengono conto di proiezioni di cambiamento climatico per lo scenario di emissioni RCP8.5 (per ulteriori informazioni si fa riferimento al deliverable D5.1.2.3). L'output è stato poi analizzato nell'ambito della stessa task.

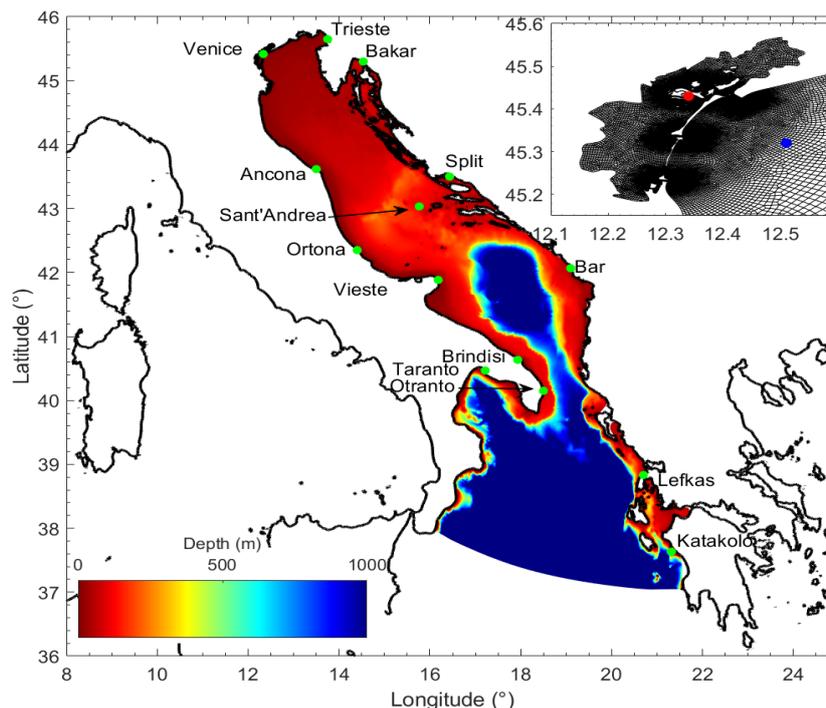


Figura 6. Domini del modello FESOM-C con batimetria e zoom sulla griglia del modello per la laguna di Venezia (riquadro in alto a destra).

Per quanto attiene la task 5.1.2.3 “Analisi del clima ondoso in prossimità delle bocche di porto e delle schiere di paratoie del MOSE nel contesto del cambiamento climatico” (Alvise Benetazzo, CNR-ISMAR), le principali caratteristiche del clima ondoso nel nord Adriatico ed in prossimità delle tre bocche di porto della laguna di Venezia (Lido, Malamocco e Chioggia, da Nord a Sud) sono state valutate nel lungo termine futuro (anni 2021-2050, corrispondente a circa il primo trentennio di attività del MOSE) utilizzando stime da modello d’onda spettrale WAVEWATCH III®, usando come forzante climatica il vento superficiale prodotto da modelli numerici del CMCC ad alta risoluzione (8 km), secondo i due differenti scenari IPCC-RCP4.5 (intermediate emission) e IPCC-RCP8.5 (high emission). Come base per la sequenza storica delle mareggiate sono stati considerati i campi orari di vento sul mare forniti dalla rianalisi ERA5 del centro climatologico Europeo (ECMWF). Nello specifico è stato usato un modello d’onda ad alta risoluzione (0.025° in longitudine e latitudine) in grado di rappresentare il mare Adriatico nella sua interezza e la fascia costiera fino alle opere di difesa delle bocche lagunari a Nord. Le analisi modellistiche hanno permesso di verificare le variazioni future delle statistiche a breve (scala temporale delle mareggiate) e lungo (scala pluriennale) termine del clima ondoso medio ed estremo (99-esimo percentile), al fine di fornire le variabili ambientali per la valutazione della sicurezza delle opere di difesa del litorale e delle bocche e dei futuri carichi di esercizio sulle paratoie del MOSE.

5. Risultati per attività / Unità Operative

Per quanto attiene la task 5.1.1.1 “Previsioni di medio termine tramite modelli statistici” (Davide Zanchettin, UNIVE) sono state ottenute proiezioni probabilistiche dell’innalzamento del livello medio del mare al 2050 e al 2100 (Figura 1). Combinando i due scenari considerati (RCP2.6 e RCP8.5), le proiezioni a fine secolo sono caratterizzate nel complesso da grande incertezza, + (21-100) cm di crescita, a cui vanno sommati i contributi di subsidenza naturale, considerata in +10.5 cm, e l’incertezza nel forcing atmosferico locale pari a ± 10 cm. Uno scenario estremo con innalzamento di +180 cm è legato ad un caso possibile ma considerato poco probabile di forte scioglimento delle calotte polari.

Avendo determinato che la crescita del livello relativo del mare è la causa dominante dell’aumento della frequenza di eventi di acqua alta a Venezia, si sono effettuate le seguenti stime per lo scenario RCP8.5: l’evento del secolo, ovvero l’evento che ci si può attendere avvenga una volta ogni 100 anni, potrebbe aumentare nel 2050 di un valore tra 26 e 35 centimetri rispetto all’attuale magnitudo di un evento con ricorrenza centennale, e al 2100 di un valore tra 53 e 171. In altre parole prendendo come riferimento la possibilità di accadimento dell’evento, le proiezioni indicano che al 2050 la frequenza dell’attuale evento del secolo potrebbe aumentare fino a 10 volte (ovvero diventare un evento che avviene una volta ogni 10 anni), mentre al 2100 potrebbe avvenire ogni anno.

Le proiezioni indicano le risposte attese del sistema alla forzante climatica, ma hanno poco valore per i decenni futuri prossimi, quando la variabilità interna del sistema o altri agenti forzanti rispetto alle emissioni di gas serra contemplate negli esperimenti di scenario potrebbero giocare un ruolo significativo. La ricerca ha individuato una connessione stabile negli ultimi decenni tra variazioni nel trend del livello del mare a Venezia e nel Nord Atlantico. Questa zona caratterizzata da una forte variabilità interdecadale, spesso descritta tramite il fenomeno noto come Atlantic Multidecadal Variability (AMV), che oscilla periodicamente tra fasi calde e fredde. La relazione tra fasi fredde dell’AMV e periodi in cui il livello del mare a Venezia è più stabile (ovvero con minor innalzamento) è evidenziato in Figura 7. Su questa base si è sondato tramite il modello gerarchico bayesiano sviluppato in questa task il possibile effetto sui livelli del mare a Venezia di una imminente transizione dell’AMV dall’attuale fase calda ad una fase fredda. I risultati indicano che se questo dovesse accadere, i livelli nei prossimi 15 anni potrebbero crescere ad un tasso minore di quanto osservato nei primi due decenni del 21° secolo, arrivando addirittura a descrivere una pausa (“hiatus”) temporanea nell’innalzamento del livello del mare nel caso si verificasse una fase negativa dell’AMV, simile a quanto osservato tra gli anni ‘60 e ‘90 del secolo scorso.

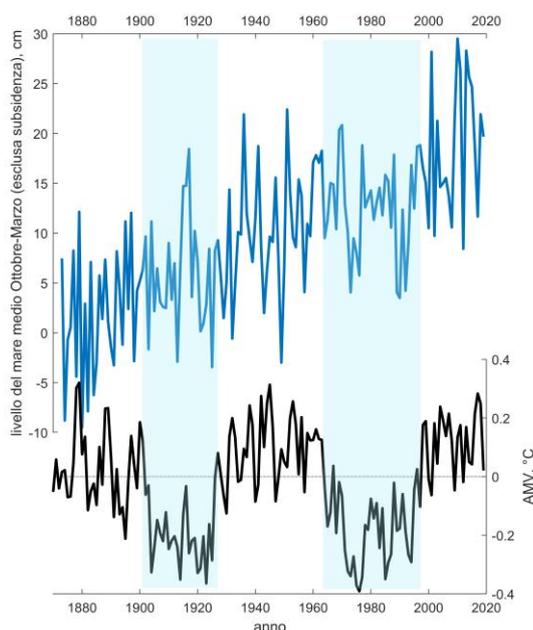


Figura 7. Evoluzione del livello del mare medio invernale (Ottobre-Marzo) a Venezia (escluso il contributo di subsidenza) e confronto con l'indice AMV che indica l'alternarsi di fasi relativamente calde e fredde nella superficie dell'Atlantico settentrionale. Si noti che fasi fredde dell'AMV (area ombreggiata in blu) corrispondono a periodi di stabilità nel livello del mare a Venezia. L'AMV potrebbe entrare nei prossimi anni in una fase negativa.

Per quanto attiene la task 5.1.1.2 "Previsioni di medio e lungo termine tramite ensemble di simulazioni con modelli dinamici (Silvio Gualdi, CMCC) i risultati principali riguardano proiezioni ottenute dai due modelli Med-CORDEX considerati per lo scenario RCP8.5, definiti come anomalie rispetto al periodo storico (1986-2005) per due periodi considerati caratterizzanti la metà e la fine del 21° secolo, ovvero i periodi 2041-2060 e 2081-2100. Per quanto riguarda la temperatura a 2 metri di altitudine, durante l'inverno (DJF) i due modelli suggeriscono un aumento variabile da 2 °C (CNRM) a 3 °C (CMCC) a metà secolo e un più marcato aumento a fine secolo, dell'ordine di 3 (CNRM) e 5 (CMCC) °C, con valori massimi (fino a 6.5 °C) proiettati sulle regioni di terra nella parte est del dominio. Durante l'estate (JJA) i due modelli suggeriscono un aumento più marcato di quanto non risulti per l'inverno, soprattutto per quanto riguarda il modello del CMCC, il quale suggerisce una proiezione di circa +4.5 °C sull'oceano e variabile da +6.5 °C a +7.5 °C sulla terra. Le proiezioni per l'estate, relative a fine secolo risultano quindi molto diverse, dipendentemente dal modello utilizzato: il modello del CNRM suggerisce un aumento variabile nello spazio da 3.5 °C a 4.5 °C, più accentuato sull'oceano, mentre il modello del CMCC suggerisce un aumento variabile nello spazio da 4.5°C a 7.5°C, più accentuato sulla terra. Focalizzando sul dominio di Venezia l'aumento di temperatura durante l'inverno, atteso per metà del secolo è di 2.5 °C / 2 °C e raggiunge 5.5 °C / 4.5 °C alla fine del secolo nel modello CMCC / CNRM. Durante l'estate invece, nonostante un aumento simile a quello invernale atteso a metà secolo, alla fine del secolo ci si aspetta un incremento delle temperature più consistente, soprattutto . se consideriamo i risultati del modello del CMCC che suggerisce un aumento di oltre 6 °C sulle regioni costiere del Veneto. Per quanto riguarda le proiezioni di precipitazione il segnale di cambiamento climatico è molto meno chiaro e consistente di quanto non sia per le proiezioni di temperatura, sia durante l'inverno che durante l'estate. Per quanto riguarda Venezia, i modelli suggeriscono cambiamenti di precipitazione trascurabili per fine secolo 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.

Per quanto attiene la task 5.1.1.3 "Previsioni di medio termine modelli numerici del CMCC ad altissima risoluzione" (Paola Mercogliano, CMCC), sono state analizzate simulazioni storiche e di scenario con modelli regionali (inclusi i modelli EURO-CORDEX) ed un modello sub-regionale ad altissima risoluzione (EUCP CCLM-URB a 3km). In generale, i risultati dei diversi modelli sono in sostanziale accordo per quanto attiene i cambiamenti attesi di temperatura, mentre il modello ad altissima risoluzione fornisce risultati diversi rispetto ai modelli regionali per quanto attiene le precipitazioni, dovuto alla capacità del primo modello di rappresentare in dettaglio le caratteristiche locali dell'area in studio, che rappresentano un importante fattore per le precipitazioni.

In Figura 8 si evidenzia un andamento della precipitazione giornaliera comune tra i diversi modelli analizzati, con un picco in primavera ed uno in autunno. Tali picchi sono amplificati nello scenario futuro RCP 8.5, nel quale si ha un minimo di circa 1.5 mm/giorno in estate ed un massimo di circa 3.5 mm/giorno a ottobre. L'area in grigio evidenzia lo spread tra i vari modelli EURO-CORDEX. Dai cicli annuali di temperatura e precipitazione giornaliera emerge che la simulazione ad altissima risoluzione (EUCP CCLM-URB3km) ha il vantaggio di una risoluzione spaziale più alta rispetto allo stato dell'arte e non altera il segnale climatico, essendo in perfetto accordo con i risultati dell'ensemble dei modelli EURO-CORDEX ed il relativo spread.

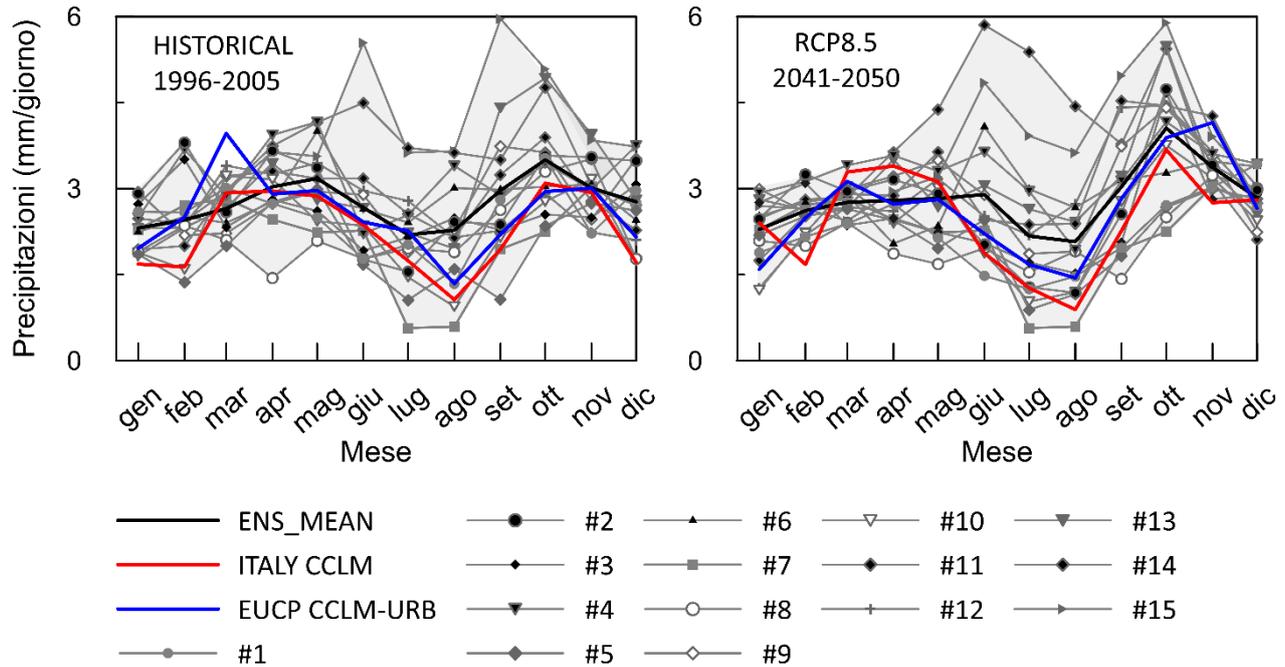


Figura 8. Ciclo annuale delle precipitazioni sul dominio di Venezia. L'area ombreggiata indica lo spread tra i vari modelli EURO-CORDEX.

Dall'analisi dei risultati del dominio di Venezia, inoltre, risulta che:

- per il periodo 2041-2050, è atteso un aumento delle temperature medie, minime e massime giornaliere che varia nell'intervallo 1.2°C a 1.8°C sul dominio della provincia di Venezia, associato ad una traslazione della distribuzione statistica delle temperature (sia media che minima e massima) verso valori più alti;
- una diminuzione delle precipitazioni medie giornaliere estiva (circa -12.5% per la simulazione a 3 km), piuttosto uniforme su tutto il dominio ed un aumento delle precipitazioni medie giornaliere autunnali (circa +37% per la simulazione a 3 km) con una tendenza, per tutte le simulazioni, più marcata in quella a 3 km, all'aumento della frequenza degli eventi di forte intensità;
- i campi atmosferici della simulazione ad altissima risoluzione mostrano una più ampia gamma di valori di precipitazione, soprattutto per i valori dei percentili più elevati (99° percentile) della rispetto ai valori medi. Questo è ancor più evidente nelle zone ad elevata complessità orografica (come le Alpi).
- I risultati discussi necessitano di essere confermati utilizzando periodi più lunghi e di una validazione con osservazioni ad altissima risoluzione.

Tale confronto, sebbene visto il periodo limitato non possa rappresentare una verifica standard dei risultati ottenuti da modelli climatici, può essere uno strumento utile per dare informazioni preliminari sulle variazioni del segnale climatico e sulla valutazione del valore aggiunto dei modelli ad altissima risoluzione, che includono anche specifiche rappresentazioni delle aree urbane, nel rappresentare le caratteristiche locali dell'area in studio. Il valore aggiunto dell'altissima risoluzione – quindi la differenza con le simulazioni a minor risoluzione - è particolarmente evidente per quanto riguarda gli eventi di precipitazione estremi.

Per quanto attiene la task 5.1.2.2 "Simulazione di eventi di acqua alta a Venezia per diversi scenari di variabilità climatica di larga scala" (Angelo Rubino, UNIVE), le simulazioni col modello FESOM-C indicano che nell'Adriatico non vi sono grandi variazioni di livello del mare rispetto a quelli imposti al contorno del bacino (per lo scenario RCP8.5 è considerato pari ad un aumento del livello del mare di +17 cm). La laguna di Venezia, invece subisce un incremento del livello del medio mare eterogeneo, quantificabile in una differenza pari a circa 1 cm tra la parte settentrionale e la parte meridionale della laguna; l'innalzamento maggiore si osserva nella parte nord della laguna e lambisce il centro storico (Figura 9). Per quanto attiene

gli eventi estremi di mareggiata, i livelli più elevati di superficie del mare (99° percentile) indicano valori inferiori agli imposti +17 cm nell'area del Nord Adriatico, come conseguenza dell'indebolimento generale della circolazione atmosferica nello scenario, il cui effetto è particolarmente rilevante nel caso di eventi meteorologici estremi. Nella laguna di Venezia (Figura 9), le anomalie di livello del mare descrivono una asimmetria nord-sud con incrementi maggiori (oltre i +18 cm, quindi superiori al valore imposto) nella porzione nord della laguna rispetto alla porzione sud (con valori sotto i +16 cm). Questo implica una asimmetria nell'aumento degli eventi estremi entro la laguna pari a circa 2.5-3 cm.

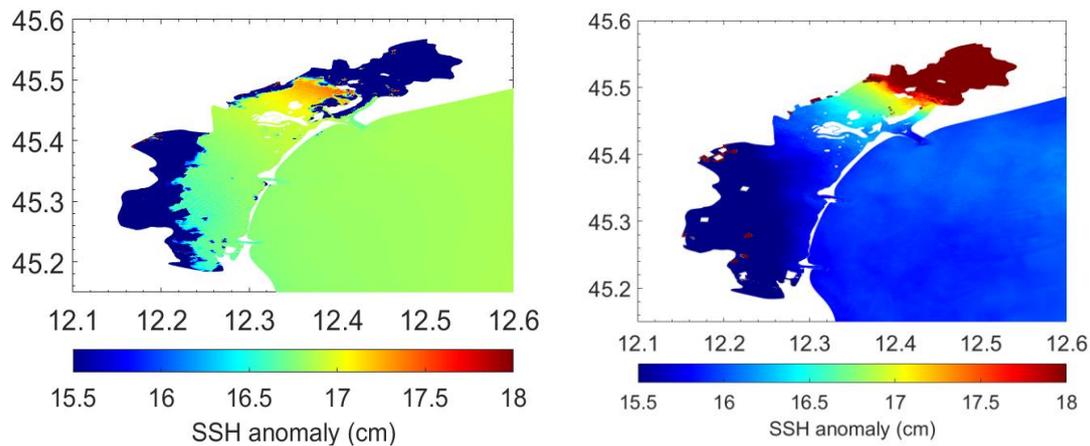


Figura 9. Innalzamento del livello medio del mare (sinistra) e dei livelli estremi (99° percentile) in laguna di Venezia ottenuto come differenza tra le simulazioni di scenario e storiche.

Per quanto attiene la task 5.1.2.3 "Analisi del clima ondoso in prossimità delle bocche di porto e delle schiere di paratoie del MOSE nel contesto del cambiamento climatico" (Alvise Benetazzo, CNR-ISMAR), i risultati emersi dallo studio hanno messo in evidenza una riduzione futura (anni 2021-2050, rispetto al trentennio 1981-2010) della intensità delle mareggiate nel Nord Adriatico (vedasi Figura 2). La variabile considerata è l'energia significativa che rappresenta un valore integrale dell'energia del moto ondoso. L'attesa riduzione compete sia i venti di Bora (quadrante Nord-Est) che quelli di Scirocco (quadrante Sud-Est), che sono i venti dominanti nel Nord Adriatico e responsabili delle mareggiate più significative. Per gli eventi più intensi con tempo di ritorno di 30 anni, la riduzione prevista è fino a quasi il 10%, con piccole differenze tra le tre bocche di porto lagunari. Nell'ambito delle approssimazioni usate per l'analisi, questo risultato, permette di considerare il clima ondoso futuro potenzialmente meno energetico di quello presente. Una sintesi ragionata dei risultati dello studio è stata pubblicata sulla rivista Water (Benetazzo et al., 2022³).

³ <https://doi.org/10.3390/w14101590>

6. Obiettivi prefissati e raggiunti

L'obiettivo della Tematica 5 era sviluppare un sistema integrato di analisi, valutazione, pianificazione, gestione e monitoraggio dell'area veneziana e del suo patrimonio storico, artistico e culturale, in grado di supportare la città e le attività che in essa operano, attraverso azioni coordinate di adattamento che mirino ad accrescere la sostenibilità e la resilienza ai cambiamenti climatici nel suo complesso. Con questa premessa, gli obiettivi della Linea 5.1, mirati a determinare l'evoluzione più probabile di parametri meteo-climatici rilevanti per la valutazione di rischio ambientale nell'area veneziana nell'arco dei prossimi decenni, erano pensati come base per molta parte della ricerca condotta nell'ambito della Tematica 5. Nonostante le difficoltà create dalla pandemia, che hanno portato ad alcuni ritardi nel completamento di alcune task, tutti gli obiettivi principali della ricerca sono stati raggiunti, con sei articoli già pubblicati, diversi articoli in fase di revisione e/o preparazione e varie partecipazioni a convegni. In particolare, il work package 5.1.1 aveva come obiettivo principale la realizzazione di previsioni di medio e lungo termine di parametri fisici di rilevanza meteo-climatica per l'area della laguna di Venezia, in particolare del livello relativo medio del mare nella laguna di Venezia. L'obiettivo è stato pienamente raggiunto, utilizzando come previsto approcci complementari di *downscaling* di tipo sia statistico che dinamico. Ulteriori obiettivi si riferivano alla comprensione fisica dei meccanismi di *downscaling* associati a tale variabilità. Anche in questo caso la ricerca ha raggiunto gli obiettivi, in particolare definendo la teleconnessione tra laguna di Venezia e fenomeni di larga-scale nel settore Atlantico.

Per quanto attiene il Work Package 5.1.2, l'obiettivo principale era la stima di variazioni nell'intensità e frequenza di eventi meteo-marini estremi per l'area della laguna di Venezia e la comprensione fisica dei meccanismi di *downscaling* associati a tale variabilità. L'obiettivo è stato pienamente raggiunto, utilizzando anche in questo caso, come previsto, approcci complementari di *downscaling* di tipo sia statistico che dinamico.

Le attività di ricerca hanno permesso di mettere a disposizione del programma di ricerca una mole di informazioni e di dati, in particolare riguardanti scenari di cambiamento climatico, che rappresentano un contributo fondamentale per il raggiungimento dell'obiettivo generale del Tema 5, ovvero lo sviluppo di un sistema integrato di analisi, valutazione, pianificazione, gestione e monitoraggio dell'area veneziana e del suo patrimonio storico, artistico e culturale, in grado di supportare la città e le attività che in essa operano, attraverso azioni coordinate di adattamento che mirino ad accrescere la sostenibilità e la resilienza nel suo complesso. È stata posta, in tal senso, particolare attenzione alle esigenze della ricerca conseguita specialmente nell'ambito della Linea 5.2, anche adattando e rifocalizzando aspetti della ricerca nella Linea 5.1 per soddisfare specifiche richieste in corso d'opera.

I risultati della ricerca condotta nell'ambito della Linea 5.1 ha contribuito agli obiettivi prioritari di Venezia2021 che riguardano:

- il quadro conoscitivo, avendo prodotto, tra le altre, stime di innalzamento futuro del mare a Venezia, di intensificazione degli eventi di acqua alta e di variazioni nel moto ondoso, nonché di cambiamenti di parametri meteo-climatici quali temperatura e precipitazione, utili per la gestione sostenibile dell'ecosistema laguna di Venezia;
- modelli matematici, avendo prodotto ed effettuato esperimenti numerici con, tra gli altri, un modello idrodinamico per la laguna di Venezia e il mar Adriatico specificatamente sviluppato per Venezia2021 ed un modello d'onda per l'Adriatico allo stato dell'arte, dopo aver definito coerentemente le forzanti necessarie per effettuare proiezioni future di cambiamento climatico; sono stati altresì sviluppati, testati ed applicati modelli statistici in grado di fornire previsioni a breve e medio termine, sia per quanto riguarda il livello del mare che gli eventi piovosi;
- visione strategica, avendo fornito e discusso gli scenari di cambiamento climatico.