



Venezia2021

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

Linea 4.1

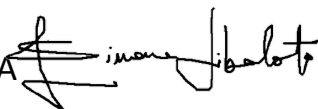
Modellistica della rete trofica

Rapporto Finale

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

Simone Libralato (OGS)

06/12/2022

FIRMA 

EXECUTIVE SUMMARY

1. Principali risultati emersi dalla Linea riferiti agli obiettivi iniziali

È stato realizzato un modello End-to-End dell'ecosistema lagunare Veneziano che integra off-line gli output del modello idrodinamico-biogeochimico SHYFEM, realizzato in Linea 1, con il modello ECOSPACE della laguna di Venezia sviluppato con il pacchetto software Ecopath with Ecosim. Il modello rappresenta l'ecosistema dal plancton all'avifauna e la pesca, risolve le dinamiche delle popolazioni e delle variabili ambientali e di habitat ad una risoluzione di 250 metri.

Nonostante le difficoltà di reperire serie continue nello spazio e nel tempo di dati biologici di confronto, il modello ha dimostrato buone capacità di rappresentazione dei dati disponibili nella fase di calibrazione e corroborazione sui dati storici disponibili dal 2000 al 2020. Il modello di ecosistema è stato utilizzato per fornire proiezioni future del cambiamento dell'ecosistema lagunare in funzione dei cambiamenti climatici, delle attività di pesca e venericoltura, e delle attività di regolazione delle acque con il MOSE.

I risultati mostrano buone capacità del modello di rappresentare dinamiche spazio-temporali di dettaglio. Le proiezioni future al 2050 in diversi scenari con diversi gradi di gestione della laguna mostrano minime variazioni delle biomasse delle componenti ecologiche che sono molto influenzate dal cambiamento climatico e generalmente poco sensibili alle altre ulteriori modifiche gestionali. In particolare l'attività del MOSE, con gli effetti stimati dall'oceanografia fisica e biogeochimica, non sembrano avere sostanziali effetti sulle componenti della rete trofica. Risultano invece più rilevanti gli effetti della gestione delle altre attività antropiche in laguna, quali la pesca e le concessioni per la venericoltura, in particolare sulle variabili che rappresentano le specie commerciali.

Nel complesso gli indicatori utilizzati per descrivere sinteticamente gli output del modello costituiscono uno strumento utile per valutare sia effetti della gestione che eventuali trade-offs tra cambiamenti climatici e diverse attività gestionali rappresentate (pesca, venericoltura, attività del MOSE).

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

2.1 Modello dell'ecosistema lagunare ad alta risoluzione, dinamico nel tempo e nello spazio

Nella Linea 4.1 è stato sviluppato un modello di rete trofica dinamico nello spazio e nel tempo. Il modello descrive le specie della laguna in gruppi funzionali dal 2000 al 2019 con una risoluzione di 250 x 250m. È collegato ai risultati di altre forme modellistiche fisiche e biogeochimiche del Programma Venezia2021 in modo da costituire in modello End-to-End.

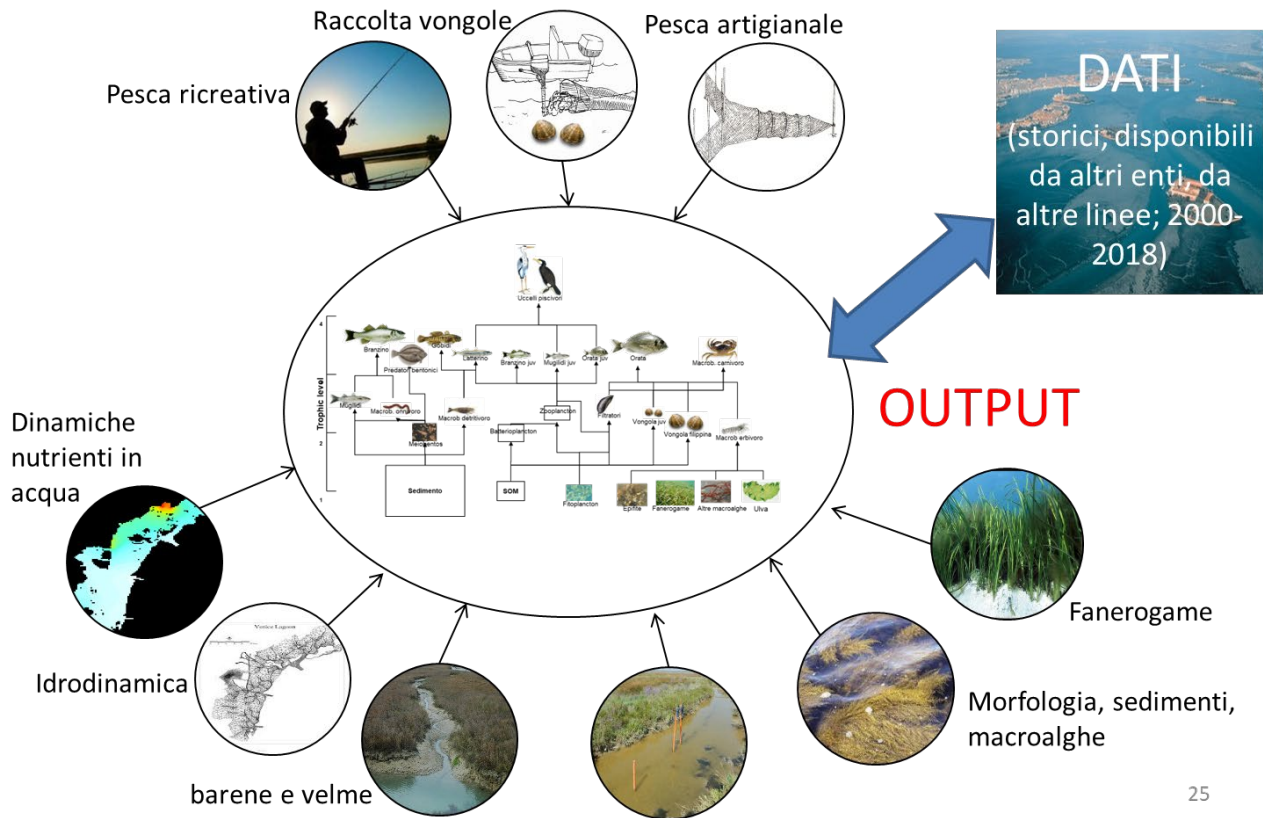


Figura 1. Struttura del modello di rete trofica, dei fattori implementati nell'accoppiamento End-to-End e confronto con i risultati.

Il modello è costruito usando in modo integrato e complementare molti dati disponibili sul plancton, sugli invertebrati, i pesci, l'avifauna e la pesca in laguna. Alcune informazioni sono state efficacemente utilizzate per un confronto delle capacità del modello di rappresentare i dati raccolti (Figura 2).

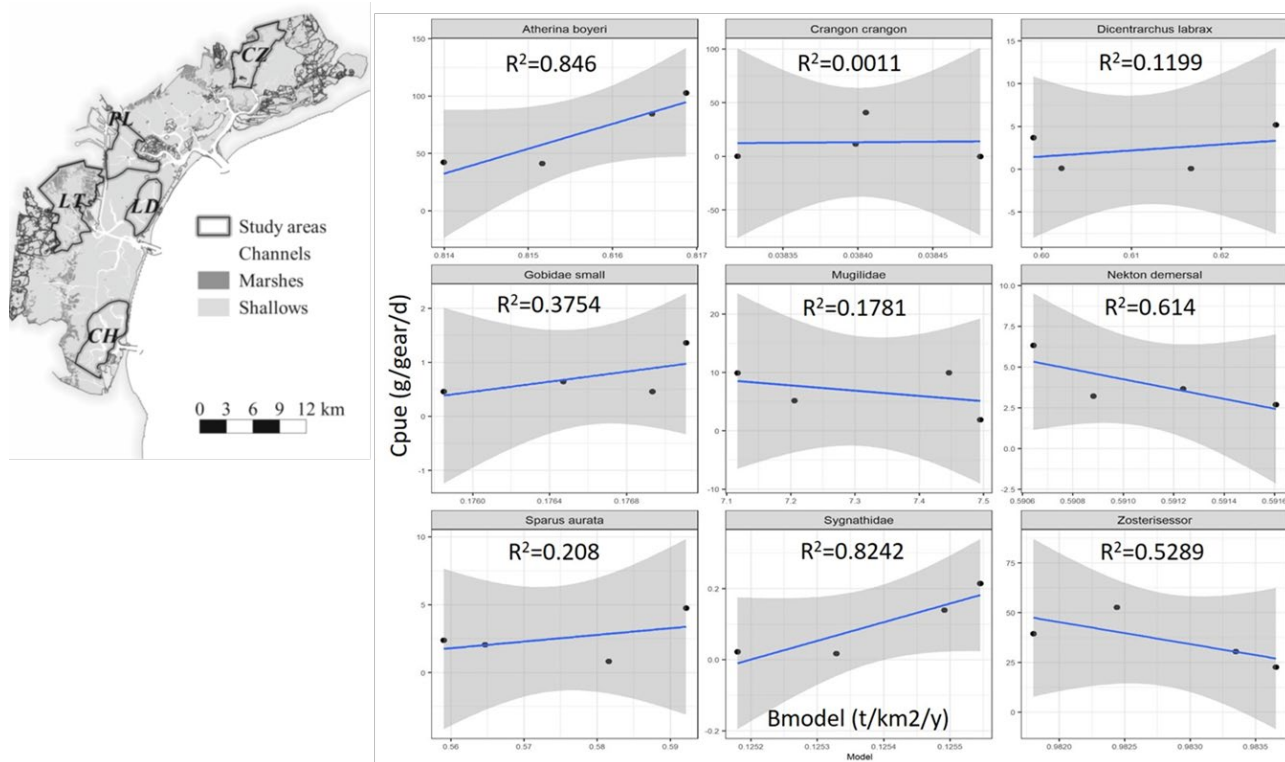


Figura 2. Validazione delle biomasse da modello con le catture per unità di sforzo (CPUE) di 9 importanti gruppi ittici. I 4 punti per taxon sono relativi rispettivamente agli anni 2009, 2010, 2013 e 2015 (fonte dati: Zucchetta et al., 2016¹).

2.2 Produzione di scenari di gestione della laguna

Il modello è stato utilizzato per valutare alcuni scenari della laguna regolata al 2050, introducendo modifiche all'attività di pesca, alle concessioni, effetti del cambiamento climatico e dell'attivazione del MOSE. Oltre alle modifiche in termini di biomasse, il modello ha consentito il calcolo di indicatori per ogni anno del periodo simulato e per tutta la laguna.

Sono stati sperimentati 8 scenari climatici e di laguna regolata, che sono stati confrontati con uno scenario di riferimento (S0) in cui le forzanti climatiche e di pesca sono tenute costanti come nel 2019. Tutti gli scenari sviluppano le dinamiche spazio temporali dal 2000 al 2050, includono la stessa fase di calibrazione (2000-2019) e si differenziano per le dinamiche spazio-temporali del futuro (2020-2050). Per facilitare la presentazione dei risultati, gli stessi sono stati raggruppati per periodi di 5 anni ed i confronti hanno riguardato il "presente" (2015-2019) ed il futuro (2046-2050).

Gli scenari sviluppati consentono di valutare le modifiche spazio temporali di biomassa di tutti i gruppi funzionali, catture di ogni specie bersaglio e accidentale, e sforzo delle diverse attività di pesca, dal 2020 al 2050, usando lo scenario di riferimento per determinare deviazione nell'evoluzione spazio-temporale (Figura 3).

Particolarmente interessanti, tuttavia, sono le differenze (anomalie) tra gli scenari climatici e di gestione e lo scenario di riferimento nell'ultima parte della simulazione (anomalie 2046-2050). Come esempio si

¹ Zucchetta M., Scapin L., Cavraro F., Pranovi F., Franco A. & Franzoi P. (2016). Can the effects of anthropogenic pressures and environmental variability on nekton fauna be detected in fishery data? Insights from the monitoring of the artisanal fishery within the Venice lagoon. *Estuaries and Coasts*,39(4), 1164-1182.

riportano i risultati per 3 scenari rappresentativi (climatico con scenario IPCC RCP 8.5, S1; climatico con MOSE attivo e riduzione delle concessioni di pesca alle vongole del 25%, S5; climatico con MOSE attivo, riduzione delle concessioni di pesca alle vongole del 25%, ed aumento dello sforzo di pesca del 25%, S7).

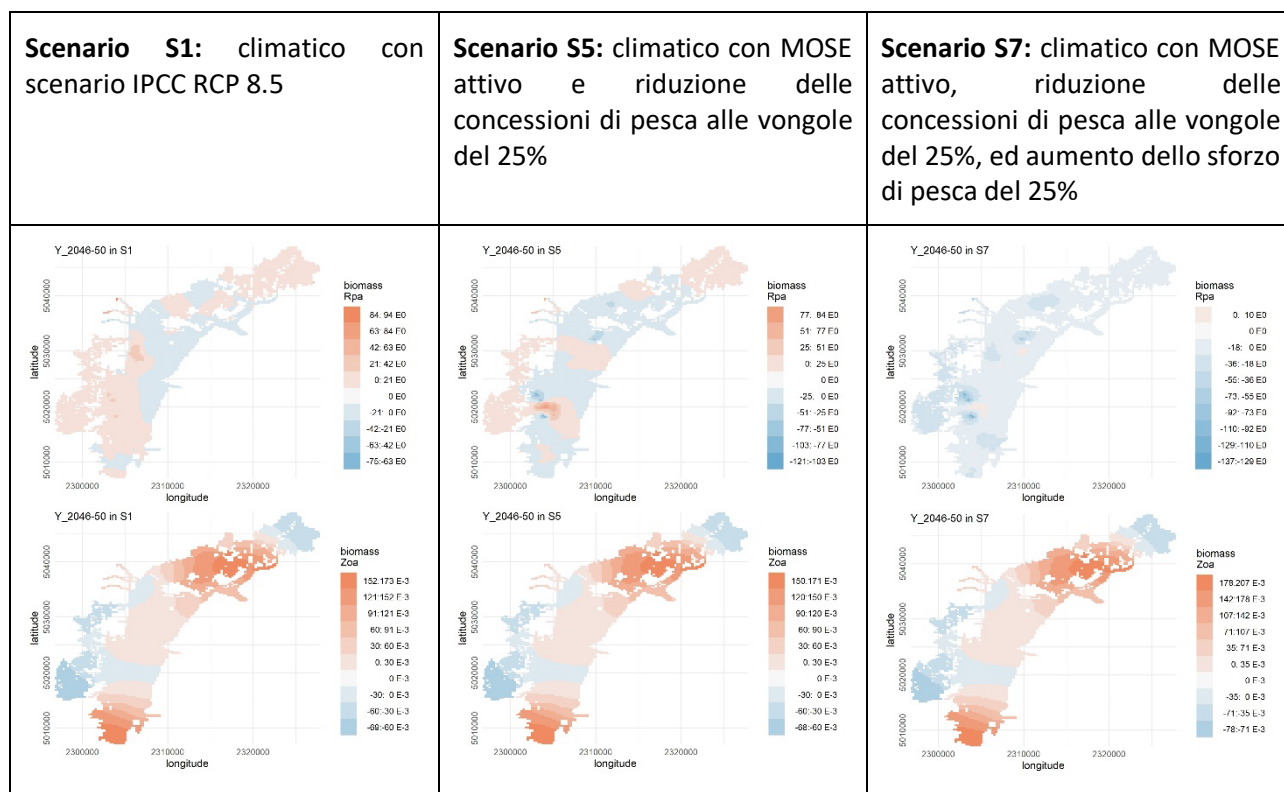


Figura 3. Differenze di biomassa (anomalie in g m⁻²) nel 2046-2050 tra scenario di riferimento (S0) e tre scenari di gestione (S1, S5 e S7) riferiti a due specie esempio del modello End-to-End della laguna: le vongole (RPa, in alto) e il go di laguna (Zoe, in basso). Le anomalie sono riferite ai tre scenari futuri di cambiamento climatico (S1), cambiamento climatico con attivazione del MOSE e riduzione delle concessioni per la venericoltura (S5) e cambiamento climatico con attivazione del MOSE, riduzione delle concessioni per la venericoltura ed aumento sforzo di pesca artigianale (S7).

2.3 Indicatori di servizi ecosistemici

Una batteria di indicatori sono stati identificati per rappresentare i servizi ecosistemici ed applicati ai risultati di modello. Gli indicatori particolarmente sensibili alle dinamiche nello spazio sono stati la biomassa delle specie commerciali, l'indice di Shannon applicato alle biomasse (eveness) e l'indice di livello trofico medio della comunità. Mentre le biomasse dei singoli gruppi funzionali mostrano piccole variazioni negli scenari, alcuni indicatori sono in grado di rilevare in modo sensibile le variazioni indotte nell'ecosistema. In particolare le condizioni biogeochimiche al periodo 2046-2050 comportano un generale piccolo aumento di biomassa in laguna con effetti positivi sulle specie commerciali (Scenario S1, indicatore Commercial_B) ad indicare effetti positivi sui servizi ecosistemici di food provisioning, con aumento di distribuzione delle biomasse tra i gruppi funzionali e un aumento di livello trofico medio delle comunità (Figura 3). Tali effetti sono il risultato di un aumento dei gruppi planctonici a seguito delle modifiche indotte dai cambiamenti climatici ed in piccola parte all'effetto dell'aumento delle profondità per innalzamento del livello medio marino.

L'introduzione dell'attività del MOSE non comporta sostanziali modifiche, mentre l'ulteriore inclusione della riduzione del 25% delle concessioni (con conseguente riduzione della semina delle vongole) ha un effetto leggermente negativo sugli indicatori di servizio ecosistemico (Scenario S5). Lo scenario climatico futuro, con attività del MOSE, riduzione delle concessioni ed aumento dello sforzo di pesca (Scenario S7) evidenzia una situazione con riduzione del capitale naturale commerciale e della distribuzione delle

biomasse tra i comparti con conseguente riduzione dell'indicatore di diversità (eveness). Al contrario, l'indicatore di stato trofico del sistema (TL_community) presenta un generale aumento nello scenario S7 rispetto al riferimento e rispetto allo scenario climatico (S1).

I risultati mettono quindi in evidenza da un lato le risposte molto diverse delle diverse zone della laguna, il generalizzato impatto dei cambiamenti climatici su tutta la rete trofica lagunare che può essere mitigato, per alcuni aspetti, dagli interventi di regolazione.

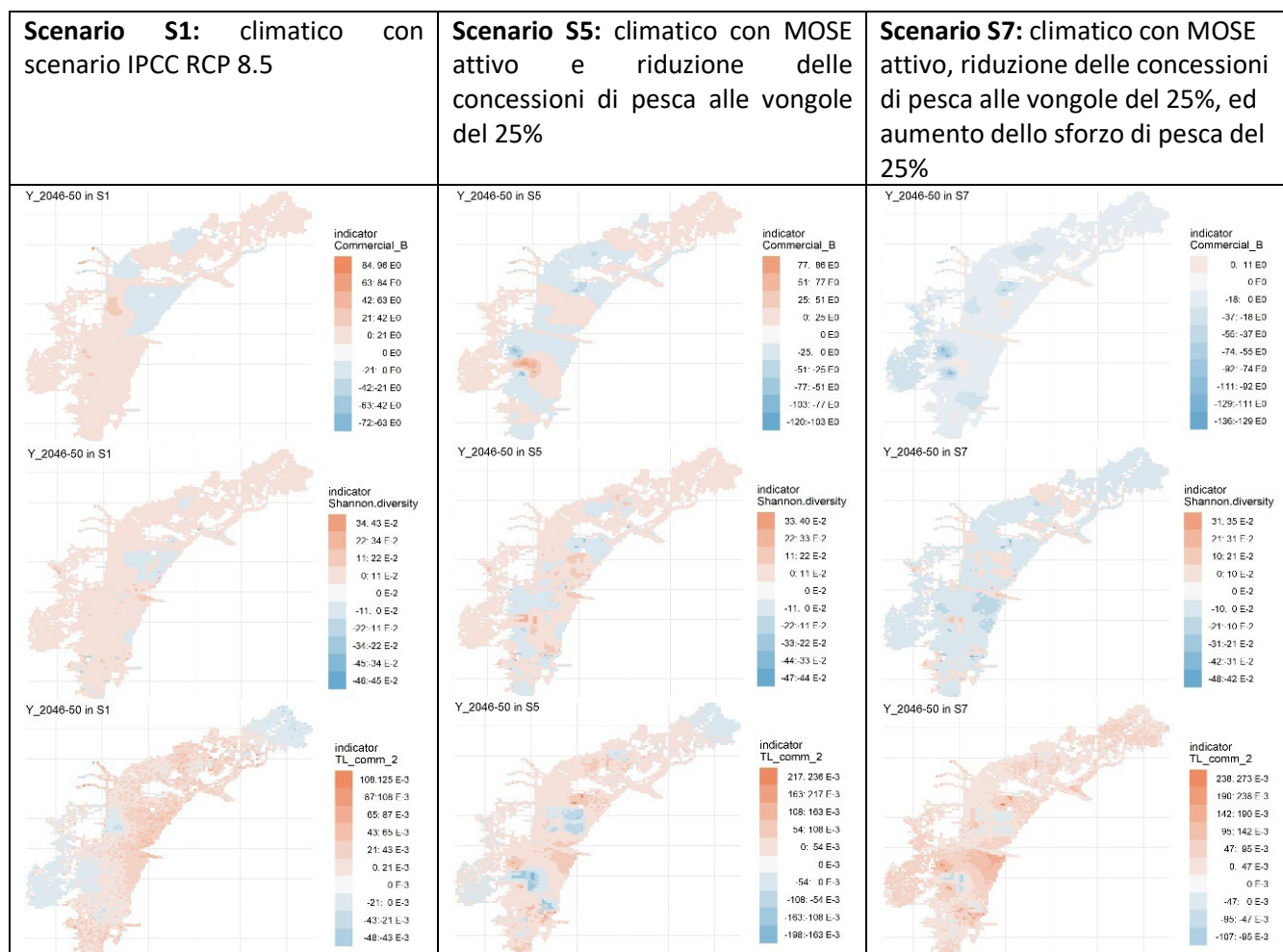


Figura 4. Anomalie degli indicatori ecologici tra scenari di regolazione della laguna (S1, S5 e S7) e scenario di riferimento nel periodo 2046-2050. Anomalie riferite agli Indicatori di biomassa delle specie commerciali (in alto), indice di Diversità di Shannon (in centro) e Livello trofico medio della comunità (in basso), calcolati con il modello End-to-End per il periodo 2046-2050.

3. Spunti per il futuro

Il modello End-to-End sviluppato si presta ad essere migliorato con qualsiasi nuova informazione relativa alla distribuzione spazio-temporale delle risorse marine rinnovabili in modo da rendere il modello sempre più accurato e utilizzato in chiave di supporto gestionale. In futuro diversi accoppiamenti tra modello SHYFEM e modello ECOSPACE potrebbero essere studiati ed opportunamente utilizzati per migliorare la rappresentazione della variabilità della distribuzione delle risorse. In particolare, futuri sviluppi potrebbero migliorare le rappresentazioni dinamiche degli habitat lagunari (barene, velme) oltre all'habitat descritto con le concessioni alla venericoltura. Infine altre forme importanti di gestione della laguna, come le valli da pesca, ed annessi impatti (caccia), potrebbero rappresentare una naturale espansione ed evoluzione dello strumento.

DESCRIZIONE ESTESA

4. Descrizione delle attività

La Linea 4.1, *Modellistica di rete trofica*, ha l'obiettivo generale di costruire un modello ecosistemico End-to-End (dalla fisica alla pesca) ad alta risoluzione spaziale della laguna di Venezia allo scopo di dotarsi di uno strumento da utilizzare per analisi e previsione degli effetti delle attività di regolazione sull'ecosistema lagunare sulle risorse e i servizi ecosistemici. Il lavoro si è sviluppato in diverse attività che nel complesso mirano allo sviluppo del modello di rete trofica calibrato e validato, all'integrazione nel modello di rete trofica delle variabili fisiche e biogeochimiche per ottenere il modello End-to-End calibrato, all'utilizzo del modello per produrre scenari degli effetti della regolazione e gestione della laguna e al calcolo di indicatori di servizi ecosistemici.

Una prima attività ha riguardato la costruzione del modello ovvero lo sviluppo del modello spazializzato della laguna di Venezia forzato con modifiche di habitat, dinamiche della pesca e delle popolazioni ittiche e validato sui dati disponibili sui livelli trofici superiori. Nonostante siano stati utilizzati come base iniziale di lavoro i diversi modelli di rete trofica dell'ecosistema lagunare già sviluppati, lo sviluppo della componente dinamica spazio-temporale per il periodo 2000-2018 ha richiesto l'uso di un numero rilevante di informazioni sulle risorse, sugli habitat, sulle attività antropiche necessarie per sviluppare, calibrare, validare e forzare il modello ecosistemico spazialmente esplicito della laguna di Venezia. Le attività del WP1 comprendono quindi 1) la raccolta di dati di base, 2) la stima del contributo delle barene ai flussi di nutrienti e 3) lo sviluppo del modello di habitat capacity.

Il deliverable 4.1.1.1 – *Raccolta base dati dell'ecosistema lagunare per il periodo 2000-2018*, ha previsto una importantissima fase di raccolta di dati spazialmente distribuiti relativi a dati disaggregati nello spazio e per ogni anno (ove possibile stagionali e/o per mese) di:

- i) informazioni quantitative di abbondanza e biomassa delle componenti biologiche (macrobenthos, fauna ittica, avifauna, plancton);
- ii) distribuzione habitat principali della laguna (distribuzione barene e fanerogame);
- iii) dati ambientali, quali granulometria del sedimento e contenuto di sostanza organica;
- iv) dati relativi alle attività di pesca, ovvero capacità di pesca (proxy dello sforzo di pesca), pescato, distribuzione delle concessioni per la pesca delle vongole, *Ruditapes philippinarum*.

L'attività ha richiesto l'esplorazione di un grosso quantitativo di riferimenti bibliografici e di letteratura "grigia" per comprendere dove reperire i dati. Alcuni dati provengono da ricerche su siti web dedicati come SOLVE (accessibile al link: www.corila.solve.it), l'Atlante della Laguna (www.atlantedellalaguna.it) e il sito dell'ARPAV (<http://www.arpa.veneto.it/dati-ambientali/open-data/idrosfera/acque-di-transizione/acque-di-transizione-laguna-di-venezia-monitoraggio-ecologico>). Inoltre, ulteriori ricerche mirate dei dati sono state svolte attraverso interazioni dirette con gruppi di lavoro della altre linee di Venezia2021 o con gruppi anche esterni al Programma di ricerca che stanno contribuendo all'acquisizione di dati utili per completare la serie storica (2000-2018) necessaria alla calibrazione del modello. In particolare le interazioni con:

- attività 3.3.1 (Prof. Adriano Sfriso) hanno permesso di avere accesso ad informazioni sulle componenti abiotiche, i sedimenti, la copertura algale e di fanerogame;
- attività 1.3.4 (Dott.ssa Donata Melaku Canu, Dott.ssa Celia Laurent, Dott.ssa Leslie Aveytua) ha consentito di ottenere stime da modello di nutrienti e di plancton;
- attività 3.3.5 (Dott. Davide Tagliapietra e Dott. Marco Sigovini) abbondanze della componente macrobentonica;
- attività 3.3.2 (Prof. Piero Franzoi) catture standardizzate delle specie ittiche da cogolli per da utilizzare come indicatori di biomassa e/o sforzo di pesca;
- attività 3.3.3 (Prof.ssa Carlotta Mazzoldi) per ulteriori dettagliate informazioni sulle catture delle specie lagunari e la capacità di pesca;

- esperti dell'ISPRA che hanno redatto l'annuario (Dott. Nicola Baccetti, Dott. Marco Zanatello) per informazioni relative alla consistenza spaziale dell'avifauna svernante.

Sono stati reperiti, quindi, diverse tipologie di dati riguardanti i comparti (biologico, ambientale e di pesca) utili per lo sviluppo e la calibrazione del modello di ecosistema. La raccolta dati ha mostrato la presenza di alcune lacune conoscitive (come ad esempio sulla meiofauna), la presenza di campionamenti ben dettagliati ma con sviluppo spaziale contenuto (es. campionamento del benthos alle bocche di porto; dati di sbarcato di Chioggia ma non di Venezia e Burano), e campionamenti estesi ma relativi a pochi anni (es. distribuzione del *Ruditapes philippinarum* ben dettagliata solo per 1999). Alcuni tra i dataset più completi (es. dati sulla consistenza, distribuzione e dinamica dell'avifauna per specie) sono stati acquisiti grazie all'attivazione di ricerche mirate. Nel complesso, quindi la laguna di Venezia è un ambiente molto studiato e ricco di informazioni scientifiche, ma la ricerca e la raccolta di dati di base sui diversi comparti dell'ecosistema dovrebbe continuare per aumentare le conoscenze, consolidare i risultati e ampliare la loro possibilità di utilizzo.

Nella Linea 4.1, inoltre, è stata condotta la stima dei nutrienti scambiati tra le zone barenali e l'acqua (D4.1.1.3 *Quantificazione del ruolo delle barene nei cicli biogeochimici in laguna di Venezia*) per i quali non esistono dati di letteratura. Le campagne sono state condotte raccogliendo campioni d'acqua lungo i ghebi, all'ingresso e al centro della barena, con risoluzione temporale approssimativamente oraria, modulata a seconda della durata dei cicli tidali riscontrati in due siti della laguna (Palude dei Laghi e Palude Fondello): il campionamento è stato svolto parallelamente alla misura del livello idrico, rilevato rispetto al fondale del ghebo al centro della barena tramite l'uso di un palo centimetrato, e alla misurazione di temperatura, conducibilità elettrica e concentrazione di ossigeno disciolto nei punti scelti per la raccolta dei campioni d'acqua sui quali sono state misurate molte variabili fisico-chimiche. La misurazione di temperatura, conducibilità elettrica e concentrazione di ossigeno disciolto è stata svolta tramite campionatori automatici multiparametrici WTW: laddove possibile, la misurazione è stato svolto in maniera automatica con una frequenza di un campionamento ogni cinque minuti; laddove impedito dalla disponibilità di strumentazione, la misurazione è stata svolta contestualmente alla raccolta dei campioni d'acqua. Nel campione d'acqua sono stati misurati la concentrazione di ione ammonio (NH₄⁺), ioni nitrato e nitrito (NO_x), Azoto Disciolto Totale (TDN), ione Ortofosfato (PO₄³⁻), e per i solidi sospesi sono stati analizzati la concentrazione di Solidi Sospesi Totali (TSS), dell'Azoto Particolato (PN) e del Fosforo Particolato (PP). Queste informazioni sono state integrate con dati di composizione del suolo di barena al fine di calcolare i flussi con un modello biogeochimico 0-D della barena per la simulazione delle dinamiche delle forme disciolte di azoto e fosforo all'interno della barena di Palude dei Laghi.

Il modello di ecosistema della laguna di Venezia è descritto in maniera dettagliata nel deliverable "D4.1.1.2 *Struttura e impostazioni dell'habitat capacity model della laguna di Venezia*". Le informazioni raccolte e il confronto con i modelli precedentemente sviluppati sono state messe a sistema per la costruzione del modello di rete trofica della laguna di Venezia con il software Ecopath with Ecosim (www.ecopath.org), utilizzando i moduli ECOPATH, ECOSIM ed ECOSPACE. Il modello rappresenta tutta la superficie lagunare al netto delle valli da pesca e delle isole (circa 350 km²) con celle quadrate di 250 m di lato, quindi ad alta risoluzione per questo tipologia di modelli e per i dati generalmente disponibili. Il modello sviluppato descrive la rete trofica utilizzando 35 gruppi funzionali: 4 gruppi funzionali sono dedicati alla descrizione dei produttori primari non planctonici (fanerogame, alghe superiori, epifitobentos e microfitobenthos), 6 gruppi al plancton (fitoplancton, micro, meso e macro zooplancton, bacteriaoplancton e *Mnemiopsis leydi*), 1 gruppo dedicato al microbentos e 8 gruppi funzionali descrittivi dei macroinvertebrati bentonici, 12 gruppi dedicati alla rappresentazione delle specie ittiche principali, 2 gruppi rappresentano l'avifauna e 2 gruppi per la materia organica non vivente (sedimento al fondo e in colonna d'acqua). Alcune specie chiave della laguna (quali la vongola, il branzino, l'orata, i cefali, e i gobidi) per le quali erano disponibili più informazioni, sono state descritte in due classi (giovani ed adulti). Le diverse attività di pesca che insistono nella laguna di Venezia sono state descritte in 3 attività principali di sfruttamento: la pesca ricreativa, la pesca artigianale e la raccolta meccanica delle vongole (*Ruditapes philippinarum*). Le condizioni iniziali del modello a stato stazionario (ECOPATH) si riferiscono agli anni 2000-2003 per il quale erano disponibili maggiori dati.

La dinamica delle variabili di stato dal 2000 al 2020 con la routine ECOSIM é stata prodotta forzando il modello con una anomalia di produzione primaria, una stima dello sforzo di pesca, e con la dinamica delle biomasse annuali di uccelli appartenenti ai gruppi funzionali dei piscivori nuotatori (Pib) e dei waders (Wab) in quanto il ciclo vitale e i movimenti di questi uccelli comprendono probabilmente ambienti molto più ampi del solo ecosistema lagunare (si veda deliverable “D4.1.4 Modello Ecospace della laguna di Venezia calibrato”). La distribuzione 2D delle variabili di stato in ECOSPACE è stata regolata utilizzando impostazioni di risposta funzionale dei componenti della rete a profondità, temperatura, granulometria dei sedimenti e i tempi di residenza medi stimati da modelli idrodinamici della Linea 1.3. Inoltre, per una accurata rappresentazione delle attività e degli effetti del prelievo sono state rappresentate nel dominio del modello le concessioni di pesca della vongola. Nel processo di calibrazione sono stati utilizzati i dati disponibili per le biomasse di fanerogame e alghe marine, e dei comparti ittici principali per minimizzare le differenze dato-modello. La validazione è consistita nel confronto di tipo correlativo tra i risultati simulati ed ulteriori dati di campo non utilizzati per forzare e calibrare il modello. In particolare la validazione è stata condotta sia confrontando i risultati del modello calibrato con 20 anni di catture totali della pesca artigianale e della pesca delle vongole sia confrontando dati di abbondanze relative al latterino (*Atherina boyeri*), piccoli gobidi, necton demersale, signatidi e go di laguna (*Zosterisessor ophiocephalus*) censiti in 5 aree della laguna con i cogolli in 4 anni differenti provenienti da specifiche campagne scientifiche condotte negli anni 2009, 2010, 2013 e 2015.

Il modello sviluppato e calibrato è stato successivamente usato per l’integrazione dinamiche biogeochimiche finalizzate allo sviluppo di modello End-to-End della laguna, ovvero di un modello “dalla fisica ai pesci e alla pesca” dell’ecosistema lagunare. A tal fine è stata condotta l’integrazione delle dinamiche ottenute dal modello fisico-biogeochimico della laguna di Venezia nel modello di rete trofica spazializzato. I campi di nutrienti, produzione primaria e concentrazione di plancton ottenuti dalla modellistica idrodinamica-biogeochimica ottenute dalla Linea 1.3 sono stati integrati nella modellistica 2D dell’ecosistema sia come forzanti che come variabili di confronto.

In particolare, le variabili fisiche e biologiche ottenute dall’output di un modello biogeochimico (SHYFEM) ad altissima risoluzione spaziale e temporale sono state utilizzare per l’accoppiamento off-line con il modello ECOSPACE. I risultati delle simulazioni SHYFEM sviluppate nella Linea 3.1 in termini di diverse variabili sono state opportunamente trattate per ottenere campi medi mensili per tre anni (2005, 2008 e 2019) e sono stati testati per verificare la capacità del modello di rappresentare al meglio le dinamiche indotte dalla cascata trofica anche sui gruppi funzionali delle specie ittiche. Al fine di questo processo le variabili utilizzate sono state la profondità, temperatura, salinità, fitoplancton e zooplancton che sono stati utilizzati nella routine “spatial temporal framework and habitat capacity” per il continuo uploading di campi forzanti in ECOSPACE che ha permesso di migliorare il realismo dei processi ecologici e facilitare la rappresentazione dinamica spazio-temporale (maggiori dettagli nel deliverable “D4.1.2.1 Introduzione preliminare dei campi biogeochimici mensili nel modello di ecosistema”).

L’accoppiamento off-line dei campi del modello SHYFEM con la modellistica ECOSPACE costituisce il modello integrato End-to-End della laguna di Venezia. Questo accoppiamento rende tuttavia necessario ri-parametrizzare il modello ECOSPACE a seguito della nuova variabilità spazio-temporale inserita con i nuovi campi. L’attività ulteriore documentata nel deliverable 4.1.2.2 *Calibrazione del modello End-to-End*, ha quindi previsto l’esecuzione di una nuova valutazione delle performance e riadattamento dei parametri delle relazioni funzionali preda-predatore del modello ECOSPACE della laguna. Analogamente alla precedente attività di calibrazione e validazione, l’attività ha considerato diverse possibili opzioni di calibrazione basate sull’effetto che le diverse impostazioni (setting) di ricerca della sensitività dei rapporti preda-predatore, con conseguente cambio di parametrizzazione della vulnerabilità delle prede ai predatori. L’insieme di forzanti temporali (sforzo di pesca e cambio di produttività nel tempo in laguna), dei campi generali per applicazione dell’habitat capacity (profondità, temperatura, granulometria dei sedimenti e i tempi di residenza medi del periodo), e delle forzanti mensili spazio-temporali introdotte con la “spatial temporal framework” (profondità, temperatura, salinità, fitoplancton e zooplancton) hanno consentito di ottenere e migliorare la rappresentazione a scala fine di molte variabili del modello. In particolare la validazione è stata portata efficacemente a termine usando il confronto con i dati di cattura delle vongole,

le biomasse del macrobentos campionato e delle specie ittiche *Atherina boyeri*, *Sparus aurata*, i Signatidi e *Zosterisessor ophiocephalus*.

Il lavoro svolto è culminato con un'analisi per scenari ed il calcolo di indicatori di funzionalità che ha riguardato tre attività principali: una analisi relativa al ruolo delle barene nel bilancio dei nutrienti sfruttando i dati in campo raccolti sulle barene, una analisi per scenari di gestione della laguna e valutazione degli effetti ecosistemici usando il modello End-to-End sviluppato ed infine la definizione, calcolo e stima di indicatori ecologici, atti a rappresentare i servizi ecosistemici calcolati sulla base degli scenari End-to-End.

In particolare, è stato esplorato il ruolo delle barene nei cicli biogeochimici dell'ecosistema lagunare, ruolo che va annoverato fra i servizi di regolazione e mantenimento forniti da tali ambienti. Questo ruolo ecologico delle barene è scarsamente studiato nella laguna di Venezia nonostante esse siano 'aree umide', cioè ambienti dal forte potenziale di fitodepurazione, e la Laguna abbia in passato sofferto di importanti fenomeni di eutrofizzazione. L'attività, documentata nel Deliverable *D4.1.3.1 Gestione della laguna ed effetto su habitat e nutrienti*, è consistita nell'estrapolare i processi quantificati e descritti tramite misure sperimentali e modellistica delle singole barene a scala lagunare, con particolare riferimento alla capacità dei suoli delle barene naturali di immagazzinare (o stoccare) carbonio e nutrienti come azoto e fosforo e quantificare i flussi di carbonio e nutrienti (fosforo ed azoto) che vengono rimessi in circolo nell'ecosistema lagunare attraverso l'erosione barenale.

I volumi di sedimenti erosi per arretramento laterale del margine barenale dovuto all'azione del moto ondoso da vento sono stati calcolati tramite l'utilizzo del modello bidimensionale idro-morfodinamico WWTM-STABEM della Laguna sviluppato dal dipartimento ICEA dell'Università di Padova. I risultati numerici forniti dal modello relativi alle condizioni di moto ondoso per un anno tipo (2005) hanno permesso di valutare, a scala di intera Laguna, la potenza d'onda media annua dalla quale ottenere il volume barenale eroso per arretramento laterale della barena dovuto all'azione del moto ondoso da vento. I dati di concentrazione di nutrienti e carbonio misurati sperimentalmente nei suoli barenali e i volumi barenali erosi hanno permesso di calcolare le tonnellate annue, emesse in laguna dalle barene per erosione, di carbonio organico, azoto e fosforo.

Nell'analisi per scenari dell'ecosistema lagunare sono stati sviluppati diversi scenari di gestione della laguna utilizzando il modello End-to-End con dinamica spazio temporale ottenuto accoppiando off-line i risultati del modello fisico-biogeochimico SHYFEM con il modello della rete trofica ECOSPACE. La laguna è soggetta a molteplici fattori di impatto relativi a diverse attività antropiche ed effetti climatici, ma si è deciso di concentrare l'attenzione su alcuni fattori della laguna regolata per i quali erano a disposizione informazioni di contorno. Gli scenari sono stati sviluppati con il modello End-to-End in maniera continua fino all'anno 2050 a partire dal modello calibrato per gli anni 2000-2020. Lo scenario di riferimento è stato realizzato utilizzando la pesca con valori di sforzo costante al valore utilizzato per l'anno 2019, le condizioni forzanti biogeochimiche del 2019 ripetute ogni anno, la distribuzione delle concessioni ultima disponibile (anno 2015) è stata utilizzata fino al 2050. Gli altri scenari End-to-End sono stati:

- S1 – forzanti spazio-temporali ottenute da SHYFEM (profondità, temperatura, salinità, fitoplancton e zooplancton) relative allo scenario climatico IPCC RCP 8.5 (Clima & NO MOSE);
- S2 – scenario climatico precedente con introduzione degli effetti del MOSE (Clima & MOSE);
- S3 – scenario di riferimento con simulazione della revoca completa delle concessioni per la pesca delle vongole (NO CONCESSIONI);
- S4 – scenario di riferimento con simulazione della riduzione delle concessioni per la pesca delle vongole di 25% in superficie (CONCESSIONI -25%);
- S5 – scenario S2 con inclusa riduzione delle concessioni per la pesca delle vongole di 25% in superficie (Clima & MOSE & CONCESSIONI -25%);
- S6 – scenario S5 con riduzione dell'attività di pesca del 25% (Clima & MOSE & CONCESSIONI -25% & PESCA -25%);
- S7 – scenario S5 con aumento dell'attività di pesca del 25% (Clima & MOSE & CONCESSIONI -25% & PESCA +25%);

- S8 – scenario di riferimento con aumento dell'attività di pesca del 25% (NO Clima & +25% PESCA).

Gli outputs del modello hanno permesso il calcolo degli indicatori di funzionalità applicati agli scenari sviluppati che sono stati analizzati in termini di modifiche spazio temporali di biomassa di tutti i gruppi funzionali, catture di ogni specie bersaglio e accidentale, e sforzo delle diverse attività di pesca, dal 2020 al 2050, usando lo scenario di riferimento per determinare deviazione nell'evoluzione spazio-temporale.

Allo scopo di valutare i possibili effetti degli scenari applicati sui servizi ecosistemici, sono stati applicati numerosi indicatori che hanno lo scopo di rappresentare indirettamente alcune funzionalità ecologiche. Sono stati applicati infatti indicatori legati alla biomassa e catture (totale, commerciale, comparti pesci, comparti invertebrati, demersali e pelagici). Questi indicatori sono utilizzati come sintesi del capitale naturale. Sono stati applicati anche indicatori compositi basati applicati alle biomasse e catture (pesci/invertebrati, demersale/pelagico, predatori, Kempton index, Shannon diversity): questi indicatori riflettono la composizione della biomassa dell'ecosistema e sono considerati legati alla biodiversità. Infine sono stati applicati indicatori riconducibili al livello trofico (delle catture, della comunità, della comunità dei consumatori, dei predatori intermedi ed apicali).

Allo scopo di facilitare la valutazione dei risultati i dati annuali delle variabili di stato (biomasse dei gruppi funzionali), delle catture, e degli indicatori sono stati mediati in due periodi rappresentativi: 2016-2020 e 2046-2050. Gli scenari sono confrontati con lo scenario di riferimento anche in termini di anomalie spazio-temporali calcolate per il periodo 2046-2050 ed ottenute dalla differenze medie dei valori tra gli scenari e lo scenario di riferimento.

5. Risultati per attività

Le attività della Linea 4.1 hanno condotto ad una serie di risultati che contribuiscono agli obiettivi prioritari del Venezia2021.

L'attività sperimentale ha permesso di raccogliere informazioni rilevanti relativamente alla composizione delle barene ed al rilascio di nutrienti durante le escursioni mareali. Le informazioni derivanti da monitoraggi in campo e le attività modellistiche sintetizzate in questo deliverable rappresentano un'importante base dati di partenza per valutare l'influenza di questi habitat sulla qualità dell'acqua e quindi sul funzionamento dell'intero ecosistema lagunare, di cui le barene rappresentano la forma naturale emersa per eccellenza. In particolare, dai dati raccolti durante le campagne sperimentali di monitoraggio in campo emerge che le barene, attraverso una complessa combinazione di processi, trasformano i nutrienti presenti nelle acque lagunari. I risultati più chiari sono per l'azoto: nella barena studiata vi è una tendenza ad abbattere l'azoto inorganico disciolto, rilasciandone invece in forma organica. Inoltre, la barena sembra abbattere l'azoto, osservazione particolarmente interessante in quanto è il fosforo il nutriente ritenuto limitante per l'ecosistema lagunare

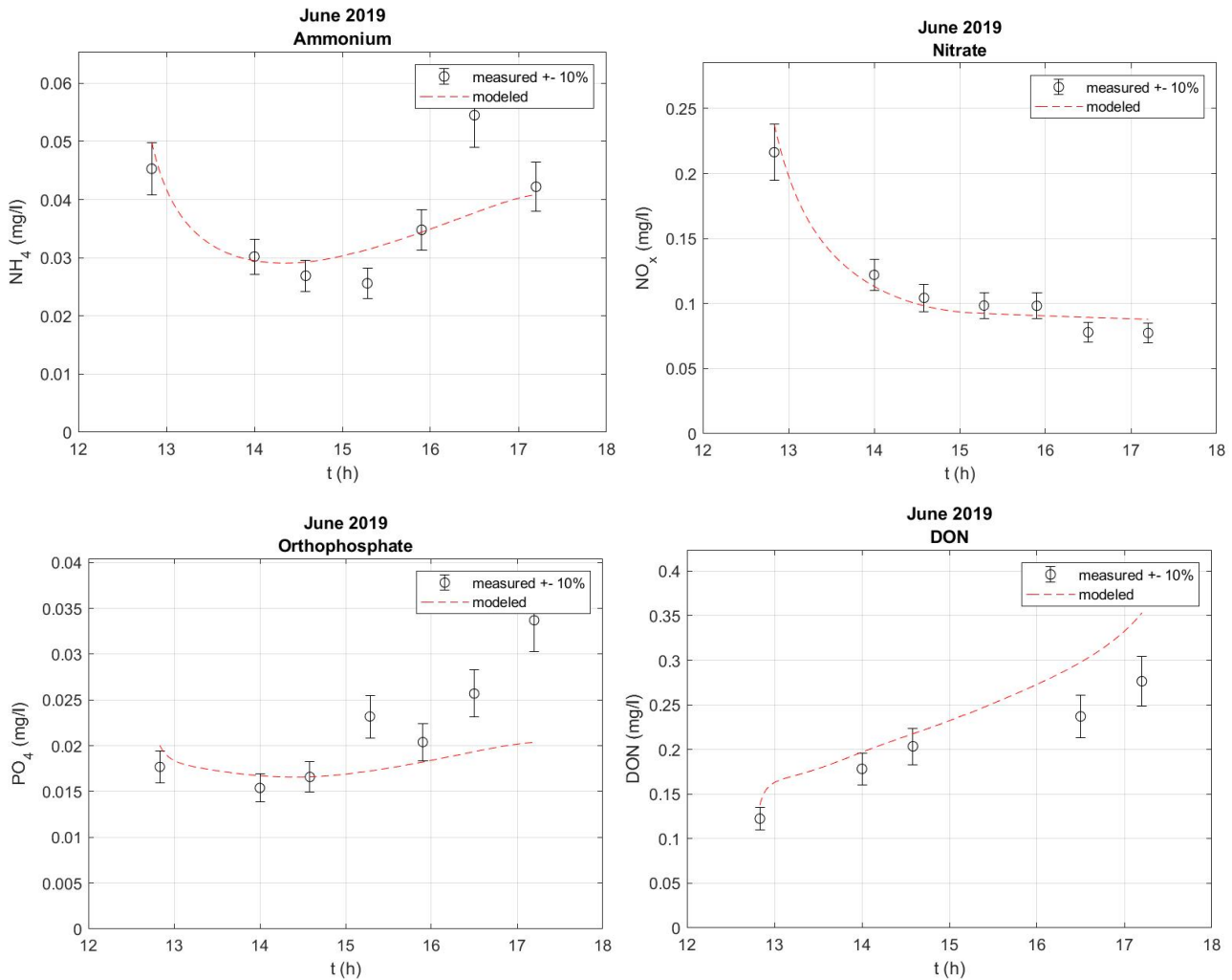


Figura 5. Risultati della calibrazione del modello semplificato di dinamica dei nutrienti nelle barene e loro dinamica durante in ciclo mareale confrontata con i dati raccolti.

L'approccio di modellistica numerica dell'erosione descritto sopra ha previsto, per le condizioni climatologiche esaminate, una perdita per erosione dalle barene in laguna di Venezia fra 84'600 e 103'240 m³/anno di suolo barenale, a seconda del modo di considerare o meno la direzione d'incidenza delle onde rispetto ai margini barenali. Tale erosione libera ogni anno nell'acqua lagunare circa 24-29 tonnellate di fosforo, 212-259 tonnellate di azoto, e 2434-2970 tonnellate di carbonio organico. Nel caso di azoto e fosforo, si tratta di cifre importanti in quanto pari a una frazione non trascurabile dei massimi carichi ammissibili di nutrienti scaricabili nella laguna di Venezia secondo la soglia fissata dal Piano Direttore 2000, pari a 3000 tonnellate annue di azoto totale e 300 tonnellate annue di fosforo totale.

L'intenso lavoro di interazione coi gruppi di lavoro interni ed esterni al Venezia2021 ha portato ad un quadro aggiornato sui dati disponibili, la loro consistenza e le loro caratteristiche. Nonostante siano apparsi come molto sparsi e talvolta con copertura bassa della variabilità lagunare, i dati sono stati usati al meglio per lo sviluppo del modello di rete trofica, descritta attraverso 35 gruppi funzionali dal fitoplancton all'avifauna, e rappresentativo delle attività di pesca che sono svolte in laguna di Venezia (Figura 6).

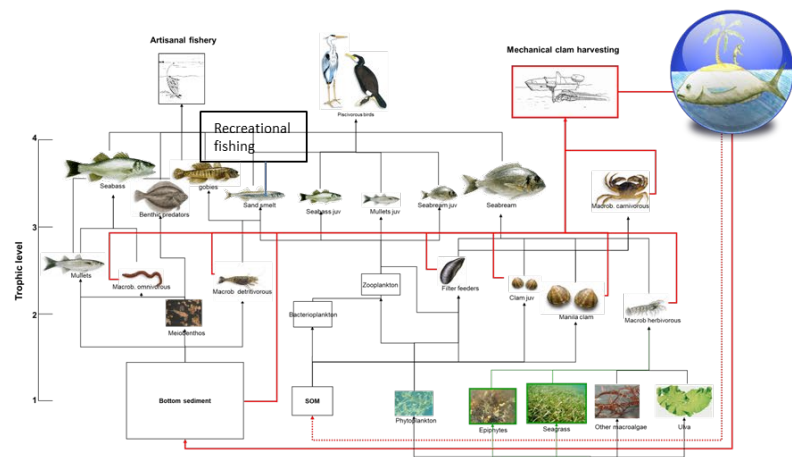


Figura 6. Dominio del modello e struttura della rete trofica sviluppata con il modello Ecopath with Ecosim.

Un importante risultato inoltre è stato il confronto dei risultati del modello con i dati spazio-temporali disponibili. Nonostante siano emerse delle difficoltà ad ottenere accuratissime dovute anche alla disponibilità di dati non continui nello spazio e nel tempo, il confronto ha permesso di evidenziare che il modello ha delle discrete capacità di rappresentare la variabilità multiannuale e spaziale della laguna. In particolare la validazione delle biomasse da modello con le catture per unità di sforzo (CPUE) di alcuni importanti gruppi ittici relativi agli anni 2009, 2010, 2013 e 2015 per 5 aree lagunari come rappresentato in figura 7. L'accoppiamento con le forzanti biogeochimiche ad alta risoluzione dal modello SHYFEM hanno contribuito a rappresentare l'alta variabilità ma non hanno apprezzabilmente migliorato l'accuratezza del modello.

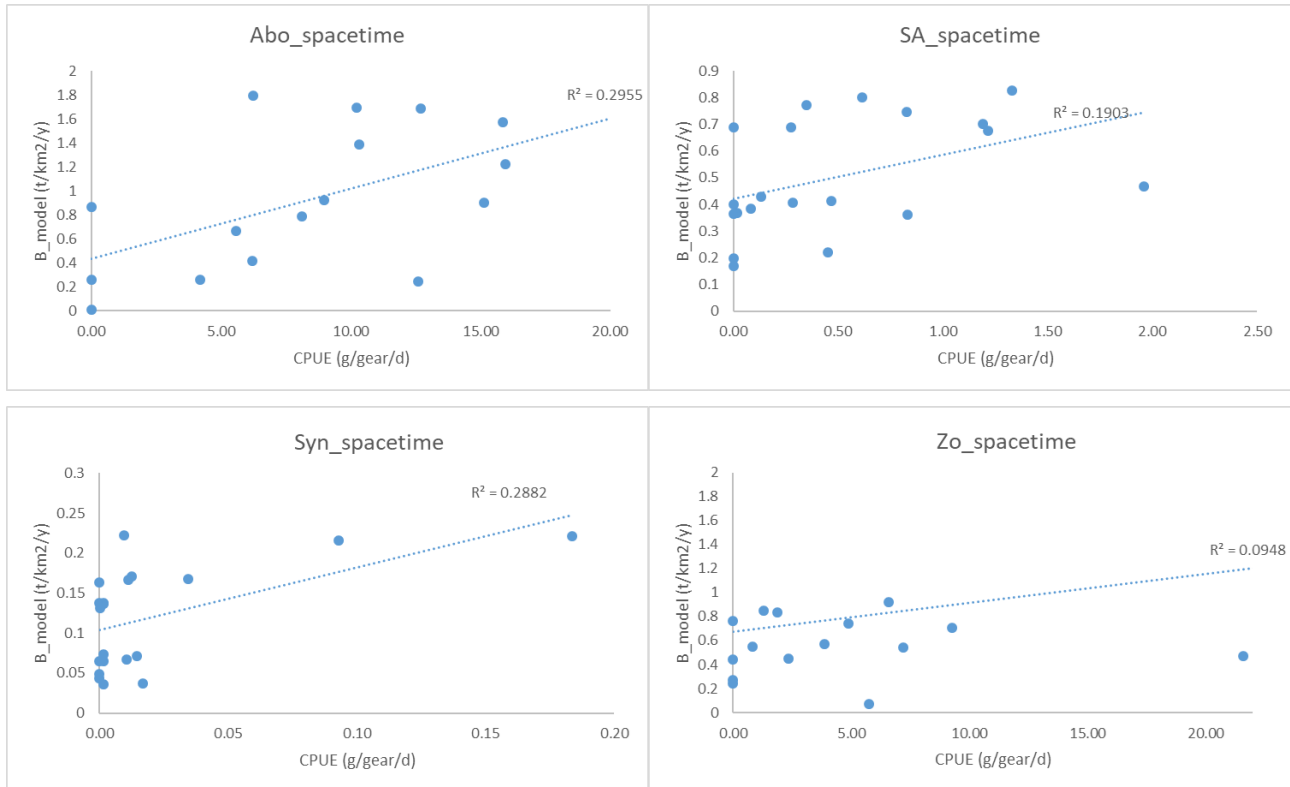


Figura 7. Validazione delle biomasse da modello (asse y) con le CPUE dei dati di *Atherina boyeri*, *Sparus auratus*, Signatidi e *Zosterisessor ophiocephalus* campionate con i cogolli. I 16 punti sono biomasse e CPUE annuali (2009, 2010, 2013 e 2015) per ogni area di pesca (CZ, PL, LD, CH).

L'analisi per scenari ha messo in evidenza come lo scenario climatico RCP 8.5 (S1) ottenuto dalla modellistica fisica e biogeochimica (Linea 1.3) abbia permesso di introdurre forzanti relative ai comparti planctonici e alla profondità dovute all'aumento del livello medio marino tali da introdurre notevoli modifiche di consistenza e distribuzione delle risorse in laguna (Figura 8, pannello S1). Tali cambiamenti risultano più importanti delle modifiche indotte dagli altri scenari, MOSE incluso e vengono quindi sinteticamente riportati i risultati per gli scenari S5 (scenario di cambiamento climatico, con attivazione MOSE e riduzioni concessioni del 25% in superficie) ed S7 (come in S5 ma aumento di sforzo di pesca del 25%). In particolare, nello scenario S1 le anomalie rappresentate consentono di osservare un aumento nella laguna sud e centro settentrionale, ed una diminuzione in laguna nord e gronda lagunare di gobidi (Zoe) e latterini (Ate) e in minor misura anche per i Signatidi (Syn). Il gamberetto (CC) nello scenario climatico diminuisce nelle zone della bocca di Porto di Malamocco ed aumenta considerevolmente in Laguna nord, laguna sud e gronda lagunare. Lo scenario S1 mostra anche un aumento minore ma generalizzato di branzini (Dla). Le vongole nello scenario climatico S1, mostrano una diminuzione in una vasta area della laguna centrale. Negli scenari S5 e S7 le anomalie della biomassa delle diverse specie mostrano distribuzioni molto simili a quelle dello scenario S1 ad eccezione della distribuzione di vongole che risultano con anomalie positive parcellizzate in laguna centro, centrosud e nord in S5 e un generale decremento in S7. Tali risultati dimostrano un effetto predominante del cambiamento climatico rispetto a tutte le altre forme di regolazione della laguna simulate (MOSE, concessioni e pesca).

Il set di indicatori utilizzato conferma il risultato dell'effetto predominante derivante dal cambiamento climatico (Figura 9), in quanto altri scenari (S5 e S7) soprattutto per le anomalie poco differenti in termini di Kmpton index, Biomassa totale e biomassa dei predatori. Tuttavia altri indicatori evidenziano rilevanti modifiche spazio-temporali: la biomassa delle specie commerciali mostra un allargarsi delle anomalie negative in scenario S5, mentre lo scenario S7 mostra una generalizzata diminuzione delle biomasse commerciali e dell'eveness, ma un aumento del livello trofico medio.

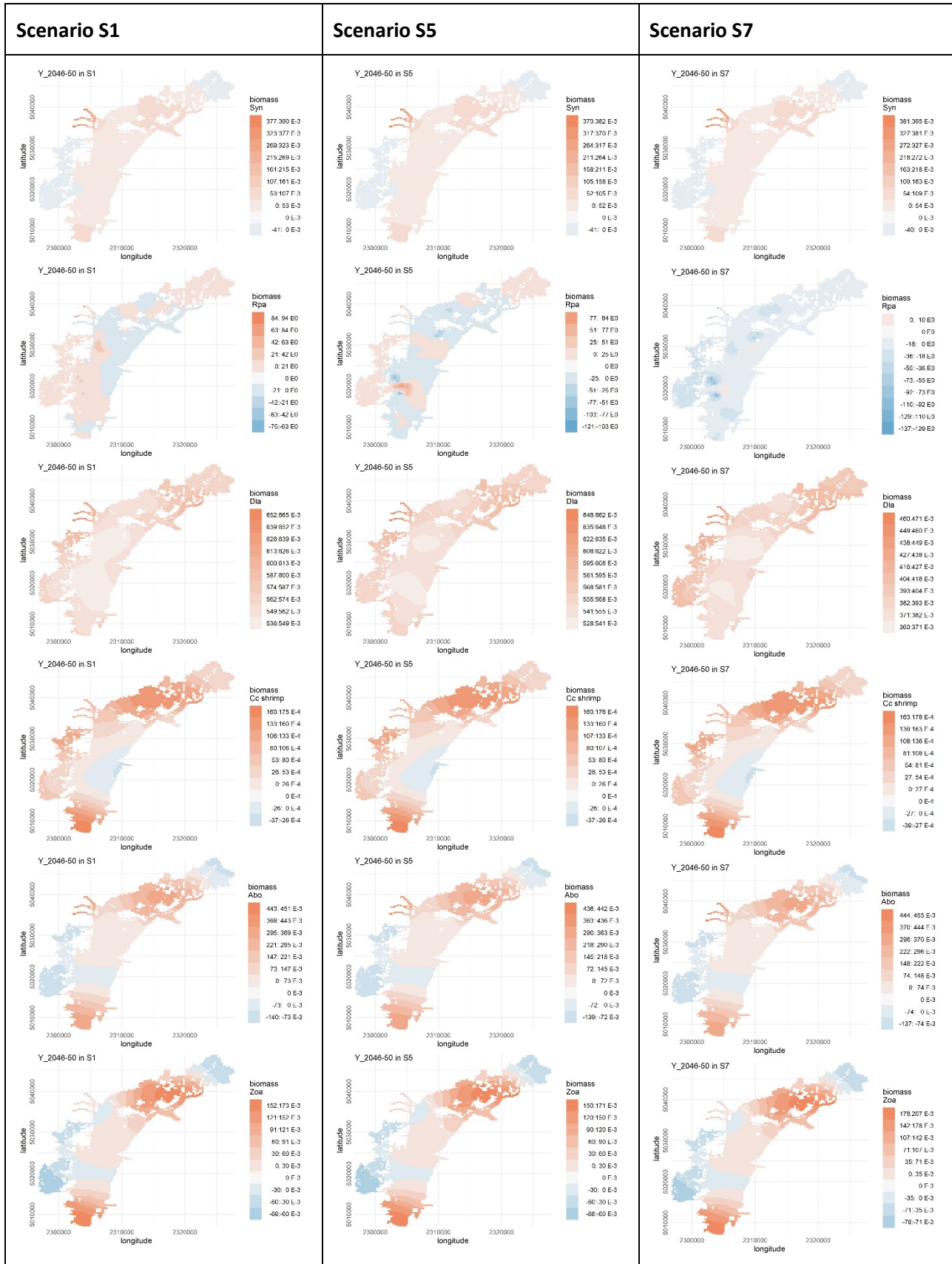


Figura 8. Anomalie medie del periodo 2046-2050 tra biomasse simulate in 3 scenari (S1, S5 e S7) e lo scenario di riferimento. Le anomalie si riferiscono ai signatidi (Syn), vongolo (Rpa), branzino (Dia), gamberetto (CC), latterino (Abo) e go (Zoe).

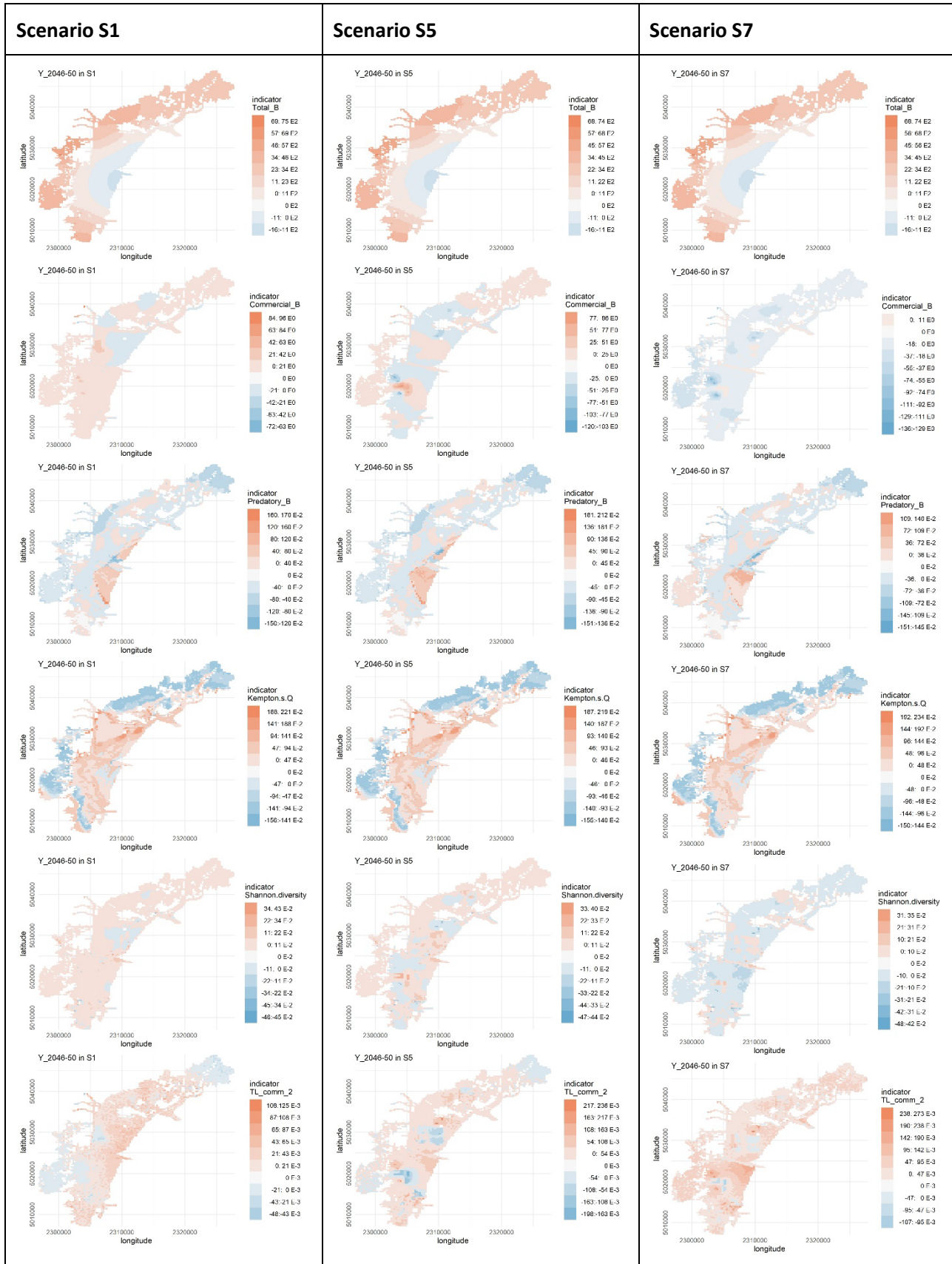


Figura 9. Anomalie medie del periodo 2046-2050 tra indicatori simulati in 3 scenari (S1, S5 e S7) e lo scenario di riferimento. Le anomalie si riferiscono agli indicatori biomassa totale del sistema (Toral_B), biomassa delle specie commerciali (Commercial_B), biomassa dei predatory (Predatory_B), Kempton diversity indes (Kempton'sQ), Eveness (Shannon diversity), trophic level of the commiunity (TL_comm_2).

6. Obiettivi prefissati e raggiunti

L'obiettivo generale della Linea era relativo alla costruzione di uno strumento innovativo e calibrato, spazialmente esplicito della rete trofica lagunare da utilizzare per analisi e previsione degli effetti causati da fattori sia naturali che antropici, sulle capacità della laguna di produrre servizi ecosistemici. In particolare, si prevedeva di costruire uno strumento in grado di valutare i fattori legati alla gestione dell'attività da pesca, dei cambiamenti climatici e quelli legati ai cambiamenti dello stato trofico, nonché scenari relativi alla laguna regolata, ovvero ai possibili effetti della messa in funzione del MOSE. Lo strumento spazialmente esplicito, a grande risoluzione, calibrato e validato sui dati storici doveva essere concepito come approccio ecosistemico a supporto delle decisioni gestionali, utilizzabile anche per le valutazioni di impatto ambientale in laguna (environmental impact assessment) e di impatti di fattori multipli, quali per esempio la pesca e gli effetti del cambiamento climatico.

Data l'importanza delle variabili fisiche e biogeochimiche nelle dinamiche dell'ecosistema lagunare, l'obiettivo era da un lato di aumentare le conoscenze del contributo delle barene al bilancio dei nutrienti, dall'altro quello di integrare il modello di rete trofica con risultati di modellistica biogeochimica (*off-line coupling*), al fine di rappresentare le dinamiche dei nutrienti ed i loro effetti sia sulla produzione primaria che sull'intera rete (attraverso effetti trofici o preda-predatore). Il modello integrato End-to-End, negli scopi iniziali, doveva permettere di valutare, oltre ai classici effetti top-down della pesca, anche effetti *bottom-up* dovuti al diverso carico dei nutrienti e alle capacità di riciclo dei nutrienti del sistema lagunare. Inoltre era previsto che i risultati del modello spazialmente esplicito dovessero essere confrontati con distribuzioni di biomassa disponibili per i diversi comparti, al fine di corroborarne le dinamiche spazio-temporali (validazione).

Questo obiettivo generale è stato raggiunto attraverso lo sviluppo di un modello ECOSPACE della laguna di Venezia che descrive l'ecosistema lagunare attraverso 35 gruppi funzionali (dal plancton all'avifauna) per gli anni dal 2000-2018 con una risoluzione di 250 metri. Il modello è stato calibrato, validato, accoppiato con un modello fisico-biogeochimico (SHYFEM, sviluppato nella Linea 1.3), attraverso l'uso del plug-in "spatial temporal framework". Infine il modello ha prodotto scenari di gestione che sono stati valutati con indicatori opportuni.

L'attività prevista dalla Linea 4.1 aveva tre principali obiettivi specifici .

Attraverso una raccolta importante di dati dalle fonti più diverse, che hanno permesso di rappresentare e calibrare la dinamica spazio-temporale dell'ecosistema per il periodo 2000-2020, è stato raggiunto l'obiettivo di sviluppare uno strumento integrato e pre-operazionale in grado di simulare le dinamiche biologiche e di sfruttamento della parte alta della rete trofica validato sulla base di dati di campo acquisiti in precedenza. Nonostante i dati raccolti siano sparsi nel tempo e nello spazio, la modellistica sviluppata li utilizza al meglio fornendo delle discrete capacità di rappresentare il dato. La validazione è stata condotta attraverso misure di correlazione dato-modello e anche se in futuro la calibrazione potrà essere migliorata utilizzando nuovi dati e nuove parametrizzazioni, il modello sviluppato rappresenta un primo esempio in Mar Mediterraneo di calibrazione di un modello dinamico spazio-temporale.

È stato sviluppato il modello End-to-End dell'ecosistema lagunare spazialmente esplicito (2D), accoppiando i risultati delle dinamiche fisiche e biogeochimiche (modello SHYFEM) con il modello di rete trofica spazializzato (ECOSPACE). L'accoppiamento è avvenuto con una integrazione off-line delle variabili profondità, temperatura, produzione primaria, fitoplancton e zooplancton. Le mappe mensili del modello SHYFEM sono state aggregate in valori medi annui che sono stati utilizzati nella spatial temporal framework per lo sviluppo anche di scenari.

Il modello End-to-End è stato utilizzato per svolgere scenari di interventi gestionali, per la valutazione degli effetti sull'ecosistema e possibili ricadute sui Servizi Ecosistemici, che hanno incluso gli effetti del cambiamento, modifiche della gestione della pesca sia per quanto riguarda la pesca artigianale che la pesca delle vongole, modifiche della superficie delle concessioni. Tuttavia i risultati relativi alle erosioni barenali e

le conseguenti modifiche di scambio di nutrienti, per difficoltà sperimentali legate alla pandemia, sono stati ottenuti troppo tardi per poter essere inclusi in modo adeguato nel modello.

Relativamente agli obiettivi prioritari del Venezia2021, la Linea 4.1 ha contribuito a tutti e 5 gli obiettivi prioritari. Più in dettaglio, soprattutto attraverso la raccolta dati e la loro messa a sistema (integrazione), la Linea 4.1 ha contribuito all'aumento del quadro conoscitivo anche in relazione agli effetti del MOSE (Obiettivo 1 di Venezia2021). La gran parte del lavoro della Linea è stato dedicato allo sviluppo, miglioramento e integrazione di un modello di ecosistema che è complesso, ma che rappresenta un tool avanzato a supporto della gestione, soprattutto con visione di medio e lungo periodo (Obiettivo 2 di Venezia2021). La complessità dei processi e delle dinamiche spazio-temporali dell'ecosistema, tuttavia, ha messo in evidenza difficoltà di questi modelli nel raggiungere livelli elevati di accuratezza e quindi, al momento, essi possono dare indicazioni ancora solo generali per la gestione (Obiettivo 3 di Venezia2021). L'approccio adottato nella Linea ha culminato con l'applicazione e l'analisi degli indicatori ecologici, applicabili anche agli scenari e potenzialmente anche desumibili dai campioni sperimentali, contribuendo in parte all'Obiettivo 4 del Venezia2021. Infine, nonostante le difficoltà relative all'ottenimento di uno strumento accurato, la Linea ha contribuito, con il modello End-to-End, a dotarsi di uno strumento di gestione strategica (Obiettivo 5 del Venezia2021).