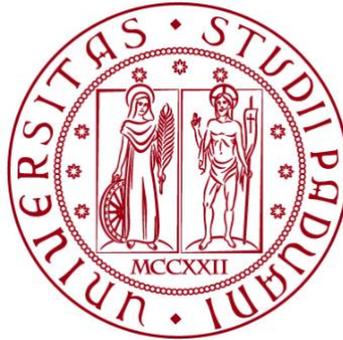


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI BIOLOGIA

Corso di Laurea magistrale in Scienze della Natura



TESI DI LAUREA

**Distribuzione delle categorie trofiche
degli uccelli acquatici in laguna di Venezia
nel periodo 2000-2019**

**Relatore: Prof. A. Pilastro
Dipartimento di Biologia, UniPd**

**Correlatore: Dott. N. Baccetti
area BIO EPD, ISPRA Bologna**

Laureando: Alvise Luchetta

ANNO ACCADEMICO 2022/2023

INDICE

1	INTRODUZIONE	1
1.1	NASCITA DEL LAVORO: COLLABORAZIONE TRA ENTI PER IL PROGETTO VENEZIA 2021	1
1.1	IMPORTANZA DELLE ZONE UMIDE, IL RUOLO DELLA LAGUNA DI VENEZIA.....	2
1.2	UCCELLI ACQUATICI	9
1.3	OBIETTIVI	11
2	MATERIALI E METODI.....	13
2.1	LAGUNA DI VENEZIA, BANCO DI PROVA PER UNO STUDIO DI COMUNITÀ	13
2.2	ATTIVITÀ DI MONITORAGGIO AVIFAUNA ACQUATICA, IWC	13
2.3	DETERMINAZIONE DELLE CATEGORIE TROFICHE DEGLI UCCELLI ACQUATICI	16
2.4	PROGRAMMA ECOPATH	20
2.4.1	<i>Dati ambientali e dati sull'avifauna</i>	<i>21</i>
2.4.2	<i>Parametri della rete trofica</i>	<i>26</i>
2.5	ECOSIM, L'ANDAMENTO NEL TEMPO	32
2.5.1	<i>Calibrazione dati temporali e fitting dei rapporti preda/predatore</i>	<i>32</i>
2.6	ECOSPACE	39
2.6.1	<i>Forcing dato dalla morfologia e dalle caratteristiche degli uccelli.....</i>	<i>40</i>
2.7	VALIDAZIONE: CONFRONTO TRA IL DATASET INIZIALE IWC E I DATI OTTENUTI DAL MODELLO	43
2.8	CREAZIONE DELLA MAPPA DI RILEVANZA TROFICA PER L'AVIFAUNA SVERNANTE	44
3	RISULTATI	46
3.1	ECOPATH.....	46
3.2	ECOSIM.....	48
3.3	ECOSPACE	50
3.3.1	<i>Ittiofagi</i>	<i>50</i>
3.3.2	<i>Limicoli.....</i>	<i>51</i>
3.3.3	<i>Onnivori</i>	<i>52</i>
3.3.4	<i>Filtratori.....</i>	<i>53</i>
3.3.5	<i>Sguazzatori</i>	<i>54</i>
3.3.6	<i>Nuotatori</i>	<i>55</i>
3.3.7	<i>Ittiofagi trampolieri</i>	<i>56</i>
3.3.8	<i>Malacofagi.....</i>	<i>57</i>
3.4	GRAFICI DI VALIDAZIONE	58
3.5	MAPPA DI RILEVANZA TROFICA DELLA LAGUNA DI VENEZIA.....	65
4	DISCUSSIONE.....	66
4.1	BILANCIAMENTO TROFICO.....	66
4.2	ANDAMENTO TEMPORALE DEL RAPPORTO PREDI-PREDATORE	67
4.3	SPAZIALIZZAZIONE DEI DATI	69
4.4	CONSIDERAZIONI SULLA VALIDAZIONE	70
4.5	CONSUMO DI PRODUZIONE PRIMARIA EQUIVALENTE.....	72
5	CONCLUSIONE.....	73
6	RINGRAZIAMENTI.....	76
7	BIBLIOGRAFIA.....	77

1 INTRODUZIONE

1.1 Nascita del lavoro: collaborazione tra enti per il progetto Venezia 2021

Questa attività nasce da una collaborazione tra ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) e l'Istituto di Oceanografia e geofisica sperimentale (OGS), coinvolto come partner del CORILA nel progetto Venezia 2021, programma di ricerca scientifica per una laguna "regolata" (CORILA, 2019). Studi recenti (Vlachopoulou et al., 2014; Voulvoulis et al., 2017; Rova et al., 2019) hanno sottolineato la necessità di una nuova prospettiva integrata per superare i limiti imposti dalla "interpretazione riduzionista" e sostenere piani di gestione economicamente vantaggiosi (Anelli Monti et al., 2021), ed è in quest'ottica che il progetto ha previsto l'utilizzo di un complesso integrato di strumenti osservativi e di elaborazione dei dati raccolti, allo stato dell'arte delle conoscenze, al fine di contribuire a tenere sotto controllo il corretto equilibrio dell'ecosistema lagunare. In questo modo sarà possibile proteggere il naturale funzionamento ecologico lagunare e allo stesso tempo salvaguardare i benefici per la società (servizi ecosistemici) forniti dalla laguna. Il progetto si è concluso nel dicembre 2021 (CORILA, 2019).

L'OGS ha richiesto all'area di ricerca BIO EPD la fruizione della banca dati IWC (International Waterbird Census, di cui ISPRA è l'ente gestore per l'Italia) per la zona umida "Laguna di Venezia", allo scopo di creare uno strumento che permettesse di svolgere un'analisi quantitativa degli effetti multipli causati da fattori naturali e antropici sulla capacità della laguna di produrre servizi e beni ecosistemici (CORILA, 2019). Ad oggi, i modelli ecosistemici espliciti possono contribuire all'implementazione di un approccio di gestione basato sull'ecosistema, consentendo di simulare cambiamenti nello stato ecologico e collegarli a diversi scenari di gestione (Anelli Monti et al., 2021). Inoltre, svolgono un ruolo determinante nella quantificazione delle relazioni ecologiche nell'ambiente e consentono l'analisi dei processi che coinvolgono componenti ecosistemici diversi in un unico quadro coerente (Libralato e Solidoro, 2009). L'attività prevedeva di sviluppare e calibrare un modello innovativo, dinamico e spazialmente esplicito della rete trofica lagunare da integrare con risultati di modellistica biogeochimica e morfo-dinamica. In tal modo, il modello avrebbe potuto rappresentare dinamicamente la variabilità naturale geomorfologica e di habitat e altre modifiche antropiche apportate al regime idrologico e trofico della laguna: un esempio di modello end-to-end (Libralato e Solidoro, 2009) che consente di valutare gli effetti top-down della pesca, quelli bottom-up dovuti al diverso carico dei nutrienti e i

cambiamenti morfologici e di habitat (CORILA, 2019). La finalità di questa tesi si pone come obiettivo indagare, sulla base del modello creato dai ricercatori di OGS, le relazioni della rete trofica lagunare privilegiando il punto di vista della comunità ornitica. La rete è rappresentata da gruppi funzionali che comprendono il plancton ed i produttori primari bentonici, il macro-zoo benthos, la componente nectonica e l'avifauna. Le principali attività antropiche collegate alla pesca verranno rappresentate e caratterizzate come l'azione di un predatore apicale della rete trofica (CORILA, 2020).

Nel presente lavoro sono stati utilizzati lo stesso approccio e gli stessi step della linea descritta in precedenza, utilizzando i dati ambientali e la catena trofica lagunare in funzione degli uccelli acquatici ma focalizzando l'analisi ed il dettaglio sull'avifauna svernante entro una finestra temporale di vent'anni.

1.1 Importanza delle zone umide, il ruolo della laguna di Venezia

Le zone umide costituiscono ambienti con elevata diversità ecologica e con una notevole produttività (seconda solo alla foresta pluviale); sono tuttavia caratterizzate da un'estrema fragilità ambientale e dalla presenza di specie ed habitat che risultano fra quelli maggiormente minacciati a livello globale (D'Antoni e Natalia, 2010). Oltre ad essere dei serbatoi di biodiversità, questi ambienti forniscono un'elevata quantità di servizi ecosistemici, quali la fitodepurazione, la regolazione dei cicli idrogeologici, la fissazione del carbonio presente nella biosfera con conseguente mitigazione degli effetti dei cambiamenti climatici (Finlayson e Moser, 1991). Le zone umide sono un elemento chiave all'interno del ciclo dell'acqua e svolgono un ruolo di collegamento ecologico di importanza centrale in quanto elementi regolatori di fenomeni idrogeologici, chimico-fisici, produttivi e anche con funzione educativa, culturale e scientifica ma soprattutto come aree di sosta, svernamento e riproduzione per molte specie di uccelli e quindi come serbatoi di biodiversità (Smart e Vinals 2004). La loro tutela e il loro ripristino sono considerate un'importante Nature Based Solution in quanto permettono di contrastare gli effetti dei cambiamenti climatici poiché riescono a catturare il carbonio presente in atmosfera fino a dieci volte di più delle foreste, a parità di superficie. Inoltre, le zone umide sono fra gli ecosistemi più impattati dai cambiamenti climatici insieme ad altre pressioni antropiche (come pesca, inquinamento ed eutrofizzazione) diminuendo la loro resilienza e la loro capacità di fornire servizi ecosistemici e benessere anche alla sfera antropica (Zunino et al., 2021). Il cambiamento climatico aggraverà ulteriormente l'effetto di altre minacce, ovvero quelle derivanti dall'agricoltura intensiva, dall'urbanizzazione, dall'industria e dal turismo, che determinano una trasformazione del territorio e l'aumento della domanda di acqua. La biodiversità legata agli ecosistemi acquatici è in gran parte in

uno stato di conservazione cattivo o inadeguato a causa delle minacce individuate anche a livello globale quali, tra le più significative, inquinamento delle acque, degradazione degli habitat, presenza di specie invasive, modificazione dei flussi (Dudgeon et al., 2006).

Appare quindi urgente realizzare azioni di tutela delle risorse idriche e degli ecosistemi acquatici ad esse associati, fra cui l'integrazione degli obiettivi di tutela e di gestione previsti alla scala di distretto idrografico con quelli previsti dai piani di gestione e le misure di conservazione di Siti Natura 2000, Aree protette e Zone Ramsar (ISPRA, 2021).

La Laguna di Venezia nonostante la sua importanza e nonostante la sua estensione (una delle più vaste lagune del Mediterraneo) è, ad oggi, figlia di tutte quelle dinamiche di origine antropica che la connotano principalmente con aspetti negativi e frutto di una serie di interventi antropici volti al suo mantenimento (Bosworth, 1999; Smart e Vinals, 2004).

Essa, come tutte le lagune del mondo, è un ambiente di transizione che poteva evolvere verso l'interramento o diventare mare. Lungo il corso della storia sono stati contrastati gli imponenti fenomeni naturali, in passato l'interramento a causa dell'apporto di sedimento dei fiumi sfocianti in laguna, oggi il fenomeno opposto di svuotamento e "marinizzazione" del bacino per l'aumento delle sezioni dei canali navigabili, l'erosione delle praterie di fanerogame, la diversione dei fiumi e il susseguente mancato apporto di sedimenti e acqua dolce, ne hanno e stanno minando l'esistenza (Provincia di Venezia, 2007).

In passato l'equilibrio raggiunto tra le esigenze dell'uomo e la natura dimostrava una sapiente consapevolezza del legame tra la laguna e le attività antropiche, oggi quell'equilibrio si è rotto, e la secolare cultura di manutenzione dell'ambiente sta perdendo la sua capacità di incidere nelle fondamentali scelte di governo dell'ecosistema lagunare (D'Alpaos, 2010).

All'origine della laguna

L'origine della laguna di Venezia è dovuta a fenomeni legati all'ultimo periodo Postglaciale, intorno a ventimila anni fa, che hanno determinato il definitivo assestamento della linea di costa dell'intero golfo alto-adriatico. Mutamenti climatici, il livello del mare che raggiunge valori minimi in concomitanza del culmine dell'espansione glaciale, la susseguente fusione glaciale, la formazione di giganteschi conoidi di deiezione avvengono, si susseguono e si amalgamano in un tempo relativamente breve. Tutto ciò ha permesso le condizioni perché intorno a seimila anni a.C. avvenisse il fenomeno idrogeologico di formazione delle lagune attuali (Carniello et al., 2009). L'apporto di sedimenti dai fiumi intervallato dal moto ondoso ha permesso la creazione di bacini costieri a basso fondale. Una genesi per

nulla lineare e caratterizzata da irregolarità degli eventi, che determinavano trasformazioni e sconvolgimenti nell'assetto geografico e geomorfologico che si è protratto fino ai giorni nostri quando si è assistito ad una sempre maggiore interferenza da parte dell'Uomo che, con le sue attività dirette o indirette quali la diversione dei fiumi per contrastare l'eccessivo apporto di sedimenti, la costruzione dei moli foranei presso le bocche di porto, la costruzioni di canali SUBLAGUNARI rettilinei e profondi, ha portato ad un costante irrigidimento delle dinamiche descritte con conseguenze sul fragile equilibrio dell'ecosistema lagunare. Se in passato la Serenissima per lungimiranza nei propri interessi economici e di autonomia politica deviò i fiumi affinché venisse meno quell'apporto di sedimenti che avrebbe determinato l'interramento della laguna nel tempo, oggi, per miopia e a causa di decisioni umane dettate da interessi economici a breve termine, come la creazione del canale dei petroli, l'aumento della sezione delle bocche di porto, l'irrigidimento dei lidi, la situazione si è invertita portando ad uno squilibrio tendente alla marinizzazione del bacino lagunare (D'Alpaos, 2010).

All'interno di questo precario e fragile contesto si possono tuttora individuare ambienti diversi che da sempre hanno connotato l'area oggetto di studio.

Geografia e ambienti del bacino lagunare veneziano

La laguna di Venezia è la più grande laguna mediterranea (Raicevich et al., 2003) ed è un ecosistema costiero poco profondo che copre una superficie di circa 550 Km², di cui quasi 400 km² caratterizzati da acque aperte, e la parte restante da estese aziende faunistico-venatorie (localmente chiamate "valli da pesca") dove è controllata la circolazione dell'acqua, praticato l'allevamento delle specie ittiche e incentivata a scopo venatorio la sosta dell'avifauna migratrice. La profondità media è di circa 1 m, ma i principali canali di navigazione e le insenature marine hanno più di 20 m di profondità. La laguna si collega al Mare Adriatico da tre insenature, da nord a sud, Lido, Malamocco e Chioggia. Recentemente è stato completato un sistema di porte mobili (MoSE), progettato e costruito per proteggere la città storica dagli effetti delle alte maree ed attualmente in fase pre-operativa. Questo sistema permette di scollegare la laguna dal mare aperto in caso di alta marea prevista, mantenendo un livello inferiore di acqua all'interno della laguna (Anelli Monti et al., 2021).

Sulla linea interna di sponda della gronda lagunare sono presenti le foci dei residui corsi d'acqua immissari, dopo che i maggiori sono stati da tempo deviati. Il bacino lagunare si può dividere in due fasce interne: la prima, in prossimità della gronda lagunare, è caratterizzata dalla presenza delle barene, tipiche formazioni insulari-tabulari ricoperte da vegetazione alofila (Pranovi et al., 2008); la seconda,

invece, è caratterizzata da laguna aperta e da isole di origine spesso artificiale. Come anticipato, la laguna è solcata da grandi alvei sommersi, i “canali lagunari”. Essi rappresentano l’infrastruttura portante del traffico nautico. Ad andamento sinuoso, consentono il travaso idraulico dovuto alle oscillazioni di marea. All’estremità interna i canali lagunari si ramificano in numerosi piccoli alvei tortuosi fino ad insinuarsi all’interno delle barene prendendo il nome di “ghebi” (Solidoro et al. 2010).

Le numerose isole, più di un centinaio, costituiscono un elemento ulteriore della laguna. Esse presentano dimensioni e origini diverse e rappresentano, insieme ai lidi, l’ambiente in cui si è sviluppato l’insediamento abitativo e produttivo della laguna. Una costante attività antropica nel tempo ha profondamente rimaneggiato la geografia e geomorfologia del bacino lacustre tanto da poter affermare che, al giorno d’oggi, la laguna è il risultato del compromesso tra dinamiche naturali e la loro gestione da parte dell’uomo negli ultimi 2000 anni (Provincia di Venezia, 2007).

All’interno di quello che comunemente viene definito come il comprensorio di macro-zona umida “laguna di Venezia” si possono distinguere delle tipologie ambientali con caratteristiche proprie e peculiari. Esse sono:

Litorali: La fascia costiera interna al comprensorio è compresa tra le foci del fiume Brenta a sud e la foce del fiume Piave a nord e include i cordoni litoranei di Lido e Pellestrina che chiudono la laguna al mare. La tipica seriazione della vegetazione psammofila, compresa tra la battigia e l’area retrodunale, è pressoché scomparsa a causa della forte antropizzazione cui l’area è sottoposta. Sopravvivono piccoli biotopi relitti presso Ca’ Roman, Alberoni, Punta Sabbioni e Cavallino (Giordani, 1992).

Laguna soggetta a marea: Questa tipologia ambientale è quella che maggiormente caratterizza la laguna di Venezia in quanto arriva a ricoprire quasi l’ottanta per cento dell’intera superficie. Essa comprende anche due aree un tempo gestite a fini di vallicoltura ma ora aperte alla libera escursione di marea, Valle Millecampi e Valli di Brenta (Bon e Scarton, 2012). Il paesaggio lagunare è caratterizzato principalmente dalle barene, formazioni tabulari sommerse solo in condizioni di alta marea eccezionale ed in genere percorse dai “ghebi”, che con la loro sinuosità possono arrivare a formare altrettanto piccoli specchi interni chiamati “chiari” di barena. Alle barene sono associate le velme, fondali fangosi della laguna che emergono solo in concomitanza con le basse maree eccezionali (Solidoro et al., 2010). Esse costituiscono importanti siti di alimentazione per la fauna oggetto di studio di questo elaborato. Oltre alle velme, a voler seguire un gradiente morfologico di profondità, la laguna soggetta a marea è caratterizzata

dagli specchi più profondi, aree dove si assiste alla maggior influenza delle acque marine portate dalle bocche di porto attraverso i canali principali fino alle zone più interne (Libralato et al., 2004). L'estrema variabilità che caratterizza la laguna soggetta a marea determina una notevole variazione di condizioni ambientali quali temperatura, ossigenazione e soprattutto salinità che, a sua volta, determina un'alta differenziazione di popolamenti vegetali e animali. Il tutto spiega l'importanza delle lagune per l'avifauna acquatica, tanto per lo svernamento che per la nidificazione (Ferrarin et al., 2014). All'interno di questo grande bacino lacustre la pesca ha svolto un ruolo determinante nella sua conformazione attuale, oltre che nei risvolti sociali ed economici degli abitanti, andando a modificare l'ecosistema stesso come è avvenuto con l'introduzione della vongola *Ruditapes philippinarum*, che in breve tempo ha modificato la pesca stessa e la rete trofica lagunare (Libralato et al., 2004).

Casse di colmata: situate nel bacino centrale, sono ambienti di origine antropica nati per ospitare la terza zona industriale di Marghera. Destinazione che non ha mai visto la luce, per intervento della "Legge speciale per Venezia" (171/1973). Sono terreni completamente isolati dalla terraferma, situati ad una quota più alta rispetto alle barene. Il loro abbandono ha permesso un rapido processo di naturalizzazione con vegetazione dipendente dall'elevazione del terreno, dalla tipologia di sedimenti e dalla prossimità dell'acqua. La presenza di chiari barenali interni ad acqua dolce, e di vegetazione che passa da alofila a formazioni arboreo-arbustive, rende assimilabile questa zona ad ambienti estuarini con elevata diversificazione (Giordani, 1992).

Valli da pesca: sono porzioni lagunari arginate principalmente destinate alla pratica dell'itticoltura. Interessano una consistente superficie dell'intero comprensorio lagunare sito nella zona di transizione tra terraferma e bacino lacustre e sono caratterizzate, ad oggi, dal fatto che il tenore salino e i livelli delle acque sono regolati in funzione dell'allevamento ittico estensivo e dell'attività venatoria praticata al loro interno (Bullo, 1940). Rispetto alla parte di laguna soggetta a marea, le valli sono caratterizzate da acqua dolce o debolmente salmastra, di conseguenza la vegetazione si discosta da quella barenale. Dove presente acqua dolce si riscontra la presenza di canneto, tifeto, giuncheto e cariceto, associazioni ormai assai rare nel resto della laguna, come già descritto in Bullo (1940). Gli specchi d'acqua interni, comunemente chiamati laghi, sono invece caratterizzati dalla presenza di *Ruppia sp.*, importante fanerogama utilizzata a scopi trofici da numerose specie di uccelli acquatici. Sostanzialmente si può affermare che le valli, soprattutto negli ultimi decenni, hanno sostituito gli ambienti palustri

un tempo ampiamente presenti sulla gronda lagunare ma oggi scomparsi a seguito delle bonifiche. Inoltre, quasi tutte le valli arginate sono configurate come Aziende Faunistico Venatorie con una gestione mirata a favorire la presenza di specie ornitiche oggetto di caccia (Bullo, 1940).

Corsi d'acqua: la zona umida IWC VE0900, oggetto dello studio, comprende anche il tratto terminale dei fiumi Sile e Brenta, sebbene artificialmente distaccati dalla laguna attuale. Fiumi di origine diversa, il primo di risorgiva e il secondo di origine alpina, ma caratterizzati dal forte segno di canalizzazione perpetuato durante il periodo delle bonifiche. Ne consegue che le aree di pregio sono molto limitate. Tali tratti sono caratterizzati da vegetazione riparia arboreo-arbustiva, da canneto a *Typha* e *Phragmites* e da vegetazione igrofila lungo le sponde (Giordani, 1992). Nei pochissimi tratti meandriformi (maggiormente presenti lungo il Sile), dove le acque scorrono più lente, si incontrano associazioni di idrofite radicate emerse. Queste aste fluviali sono in forte connessione ecologica con il bacino lagunare interno ma, allo stesso tempo, rappresentano degli ambienti unici dove poter trovare una ricca ed eterogenea comunità ornitica sia durante lo svernamento sia durante la nidificazione (Giordani, 1992).

Bonifiche: una volta appartenenti alle zone paludose e di transizione tra la laguna e la terraferma, sono caratterizzate da una quota inferiore sul livello del mare. Oltre al prosciugamento, esse hanno richiesto anche l'arginatura dei corsi d'acqua limitrofi e il disboscamento, in funzione delle esigenze agricole (Provincia di Venezia, 2007). Nonostante la semplificazione ambientale messa in atto con la bonifica e continuata con la coltivazione intensiva soprattutto cerealicola, esistono ancora piccoli contesti interni caratteristici di questo territorio. Ne è un esempio una parte di Ca' de Riva all'interno della grande bonifica del Veronese, sita tra valle Perini e Valle Ca' Zane, in prossimità del centro abitato di Portegradi in laguna nord di Venezia. In questi anfratti di pregio naturalistico sono presenti associazioni vegetali alofile che, unite ad un tipo di allevamento estensivo, attirano importanti contingenti di popolazioni svernanti di uccelli acquatici quali pavoncella (*Vanellus vanellus*) e piviere dorato (*Pluvialis apricaria*) tra i caradriformi, e le oche selvatiche (*Anser anser*) e lombardelle (*A. albifrons*) (Bon e Scarton, 2012).

Zone umide d'acqua dolce interne: piccole aree contermini la laguna e appartenenti alla macro-zona IWC VE0900 (ai sensi della classificazione ISPRA). Precisamente esse sono lo stagno Montedipe, lago industriale sito nella seconda zona industriale e la cassa di colmata A, contigua alla terraferma in zona Fusina. Sono piccole zone caratterizzate dal fatto che subiscono molto poco disturbo

antropico e pertanto riescono a fungere a pieno come serbatoi per il riposo in periodi fondamentali per gli uccelli quali lo svernamento e la nidificazione. Di origine antropica, se il primo è famoso per il roost (dormitorio) di cormorani durante il periodo invernale, il secondo, caratterizzato da un esteso canneto per scopi di fitodepurazione delle attività industriali situate poco più a nord, è importante per il riposo di ingenti quantità di anatidi che tra la vegetazione elofitica trovano riparo. (Bon e Scarton, 2012).

Vincoli normativi: la laguna di Venezia è uno degli ecosistemi lagunari più estesi e più importanti d'Europa e dell'intero bacino del Mediterraneo ed uno dei pochissimi soggetti a marea. Un'area umida naturale con un immenso patrimonio biologico, faunistico e floristico, ma anche economico e culturale (Smart e Vinals, 2005). Se da un lato la conservazione della natura nel contesto lagunare deve passare anche attraverso il mantenimento delle attività umane, dall'altro l'obiettivo di sopravvivenza delle attività antropiche non può prescindere dall'impegno nell'arrestare i processi di degrado cercando di recuperare l'equilibrio dinamico che è caratteristico di questi ambienti (Provincia di Venezia, 2007)

La laguna ad oggi è quasi interamente tutelata dai due SIC (Siti di importanza comunitaria) e loro aggiornamenti : IT3250030 Laguna medio-inferiore di Venezia e IT3250031 Laguna superiore di Venezia, oggi ZSC (Zona speciale di conservazione) IT3250046 "Laguna di Venezia" (con piano di gestione redatto dalla Regione Veneto) ai sensi della direttiva "Habitat" 92/43/CEE e totalmente tutelata come Zona di Protezione Speciale con riferimento alla direttiva "Uccelli" 2009/147/CE (ex 79/409/CEE). Entrambe concorrono alla definizione della Rete Natura 2000 per la Commissione europea. Tutta l'area lagunare è inoltre già designata come Patrimonio mondiale dell'umanità dall'UNESCO ed è messa sotto tutela dalla Legge speciale dello Stato 1717/1973 (Provincia di Venezia, 2007).

Dal 1993, una serie di studi promossi dall'Istituto Nazionale per la Fauna Selvatica (ex I.N.F.S. ora ISPRA) e dalla Provincia di Venezia ha richiamato l'attenzione sul ruolo cruciale della Laguna di Venezia per la vita degli uccelli acquatici in Europa (Smart e Vinals, 2004), culminati con la proposta di designare tutta la laguna come "zona umida di importanza internazionale" ai sensi della convenzione di Ramsar; ma ad oggi senza alcun risultato se non un piccolo lembo rappresentato dalla riserva nazionale WWF di Valle Averte, oasi che tuttavia non copre nemmeno l'intera valle omonima (Provincia di Venezia, 2007).



Figura 1: immagine satellitare della laguna di Venezia

1.2 Uccelli acquatici

Gli uccelli acquatici comunemente vengono intesi come quel gruppo polifiletico di specie strettamente legate alle zone umide, come sancito dalla convenzione internazionale siglata a Ramsar, Iran, nel 1971. Tale convenzione è un trattato intergovernativo che riguarda la conservazione e la gestione delle zone umide. Nasce in un periodo storico in cui lo scambio di informazioni e di conoscenza non era incentivata come oggi, e farne parte significava entrare ufficialmente in un dibattito di respiro internazionale per le politiche ambientali, almeno per quanto riguarda le zone umide. La convenzione nasce per rispondere in modo collettivo all'esigenza di invertire il processo di trasformazione e distruzione delle zone umide (processo ancora in corso) quali ambienti primari per la vita degli uccelli acquatici. Oltre a dare una definizione precisa di zona umida, all'interno della convenzione ci sono dei criteri fondamentali che suggellano il rapporto tra presenza di uccelli acquatici e le zone da loro abitate. Tali criteri, specificatamente quantitativi, identificano un sito di importanza internazionale:

- criterio 5: una zona umida deve essere considerata di importanza internazionale se sostiene regolarmente 20000 o più uccelli acquatici;
- criterio 6: una zona umida deve essere considerata di importanza internazionale se sostiene regolarmente l'1% degli individui di una specie, sottospecie o popolazione di uccelli acquatici.

Per il calcolo dell'1% si utilizzano le stime di popolazione di Wetlands International che ogni anno vengono aggiornate grazie ai dati del progetto IWC. (Zenatello et al., 2014).

La convenzione ha anche definito la categoria “uccelli acquatici”.

In questa realizzazione non tutte le famiglie che compongono questo gruppo sono state trattate in quanto non presentano uno stretto legame trofico con l'area di studio quali accipitriformi (rapaci diurni), strigiformi (rapaci notturni) e quelle specie che hanno abitudini alimentari non ricadenti nell'area di studio come le oche; altresì non vengono trattate specie alloctone o di origine domestica afferenti a specie ricadenti nella definizione di uccelli acquatici (Zenatello et al., 2014). Lavorando a livello ecologico, le specie considerate sono state raggruppate in categorie trofiche con modifiche dettate dal caso specifico della laguna di Venezia. Di questi e altri ragionamenti se ne illustra le dinamiche nel capitolo “Materiali e metodi”.

Per categoria trofica si intende un qualsiasi gruppo di specie che sfrutta le stesse risorse o risorse diverse in modi correlati. Non è necessario che le specie all'interno di unacategoria occupino le stesse, o anche simili, nicchie ecologiche.

In figura 2 si illustrano tutte le famiglie che compongono tale gruppo.

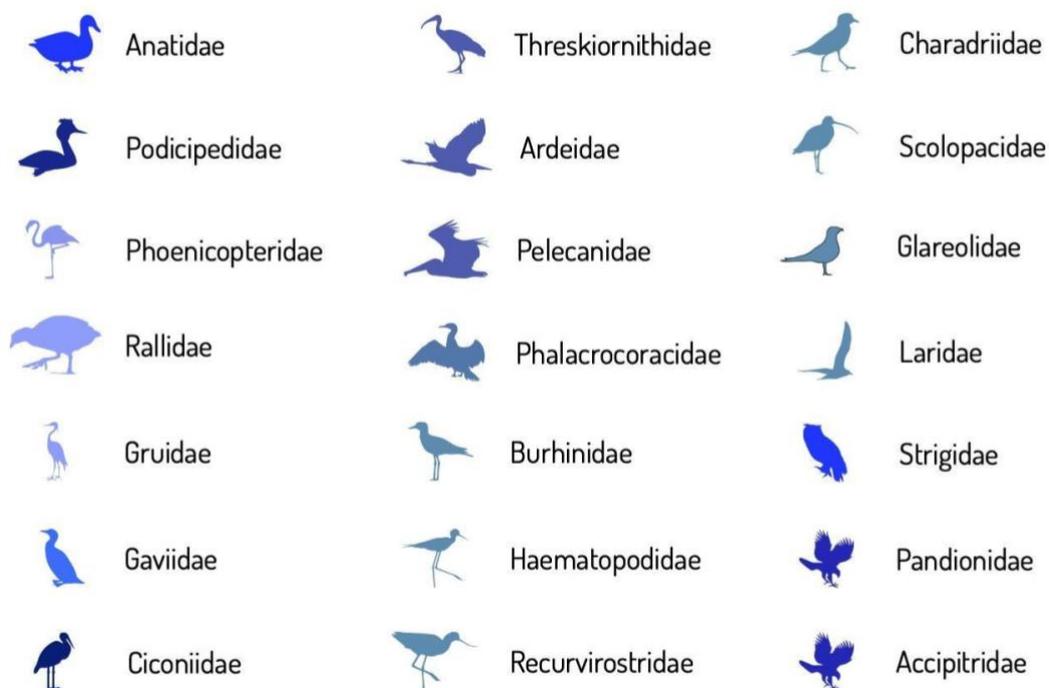


Figura 2: rappresentazione illustrativa degli uccelli acquatici intesi come gruppo polifiletico di famiglie (Rose & Scott, 1994). L'ordine tassonomico è coerente con l'ultima check-list dell'avifauna italiana di Baccetti e Fracasso (2021).

1.3 Obiettivi

Lo scopo di questa realizzazione è indagare la distribuzione effettiva e potenziale della comunità degli uccelli acquatici svernanti all'interno della laguna di Venezia, nella parte soggetta a marea. Per arrivare ad un tale risultato, è stato necessario applicare un approccio ecologico considerando l'intera rete trofica lagunare e considerando che gli uccelli sono situati ai vertici della stessa.

L'approccio ecologico è stato applicato alla comunità avifaunistica. Il lavoro si è sviluppato in parallelo al progetto 'Venezia 2021' coordinato dal Corila. Inoltre, è stato fondamentale lo scambio di informazioni e di conoscenze con l'Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale – OGS, di Trieste; entrambi i progetti si sono sviluppati in parallelo per buona parte del periodo di tirocinio in ISPRA.

Gli obiettivi principali di questo elaborato sono stati tre:

- Valutazione ed elaborazione dei dati sull'avifauna provenienti dalla banca dati IWC e predisposizione ad essere utilizzati nel modello EwE e nel bilanciamento della rete trofica;
- Analisi dell'andamento temporale delle popolazioni nei vent'anni in relazione alle disponibilità trofiche;
- Spazializzazione delle biomasse delle categorie trofiche degli uccelli, ottenute sulla base delle forzanti legate alla distribuzione delle prede, alle caratteristiche morfologiche lagunari e alle esigenze ecologiche degli uccelli stessi.

Infine, un ulteriore sviluppo di lavoro ha riguardato la validazione dei risultati ottenuti tramite un confronto tra i dati iniziali, inseriti per l'analisi temporale, ed espressi in termini di biomassa per unità di superficie (t/km^2) e la conversione della distribuzione spaziale ottenuta per le singole categorie in una mappa di rilevanza trofica, espressa in produzione primaria di carbonio. Questo ultimo step illustra in modo quantitativo la capacità della laguna di sostenere la comunità degli uccelli acquatici svernanti nel periodo indagato, andando a fornire una prima chiave di lettura gestionale della laguna stessa.

Il programma principale che si è usato per l'elaborazione è Ecopath with Ecosim, EwE di seguito (Christensen et al., 2008; www.ecopath.org), un software 'open-source' di ecologia marina che, con qualche adattamento dettato dal particolare caso, si è rivelato molto utile per analizzare i dati inerenti alla rete trofica. L'EwE è basato su un modello food-web bilanciato di biomassa e comprende la componente spaziale Ecospace (Walters, 1999) che mira a riprodurre modelli generali, ma realistici, di distribuzione spaziale di specie o gruppi di specie considerando le interazioni trofiche a livello comunitario (Anelli Monti et al., 2021).

EwE consente anche l'elaborazione di diverse interazioni e differenti impatti tra le variabili come, per esempio, la presenza di specie allocotone e le possibili ricadute sulla rete trofica, l'aumento vertiginoso di una specie rispetto ad altre sempre in un contesto multispecie. Inoltre, è adatto anche per valutare i compromessi tra la conservazione dell'ecosistema e i fattori socioeconomici, come per esempio le varie attività di pesca sia di sussistenza tradizionale che di stampo intensivo, e di attività commerciale turistico (Moutopoulos et al., 2013), aspetti che però non vengono trattati in questo lavoro.

2 MATERIALI E METODI

2.1 Laguna di Venezia, banco di prova per uno studio di comunità

La laguna di Venezia è strutturata in zone, data la sua complessità ed eterogeneità di ambienti che la compongono, dal progetto IWC (International Waterbird Census) ai sensi della “convenzione Ramsar”. Questa classificazione risulta essere di fondamentale aiuto oltre che durante il censimento annuale degli uccelli acquatici, anche nel determinare in modo chiaro l’area oggetto di studio.

2.2 Attività di monitoraggio avifauna acquatica, IWC.

Il censimento invernale degli uccelli acquatici costituisce una delle forme di monitoraggio ornitologico più lungamente condotte su scala europea (Zenatello et al., 2014). Questa attività, iniziata in Italia a partire dalla metà degli anni Settanta, viene svolta con cadenza annuale nel mese di gennaio ed offre dati sull’entità delle popolazioni annualmente presenti per la maggior parte delle specie rilevate.

Gli scopi dei censimenti IWC sono di stimare quantitativamente le popolazioni delle specie di uccelli acquatici e soprattutto di valutare la loro tendenza numerica nel corso degli anni. Nondimeno questi conteggi permettono di valutare la salute e il valore delle zone umide censite, e di indirizzare le scelte politiche verso la tutela delle aree più importanti per lo svernamento degli uccelli.

I capisaldi della metodologia con cui viene condotto il monitoraggio sono:

- i censimenti sono effettuati a metà inverno nelle zone umide codificate e cercando di coprire in maniera contemporanea le aree appartenenti ad un medesimo comprensorio;
- vengono contate tutte le specie di uccelli acquatici, comprese quelle presenti a seguito di immissioni artificiali;
- i censimenti vengono svolti da una rete di rilevatori specificamente abilitati da ISPRA;

Dal 1980 l’Istituto Nazionale per la Fauna Selvatica, oggi ISPRA, coordina le attività a livello nazionale, ospitando e gestendo il database italiano, e mantiene i contatti con il coordinamento internazionale in seno a Wetlands International, a cui fornisce periodicamente i dati nazionali aggiornati (Zenatello et al., 2014).

A partire dal 2002 sono state indette specifiche prove di abilitazione all’attività di censitore IWC che hanno portato negli anni a disporre di un rilevante numero di rilevatori. Dal 2005 vengono inclusi nel database solo dati provenienti dalla rete di rilevatori che si è venuta a creare. Se prima degli anni 2000 l’obiettivo primario è stato quello di avere una buona copertura territoriale, dagli anni 2000 in poi si è dato più rilievo all’acquisizione di dati riconducibili a livelli noti di affidabilità da parte dei censitori (Zenatello et al., 2020).

Periodo di censimento

I censimenti si svolgono sempre a cavallo della metà del mese di gennaio, come da indicazioni di Wetlands International per il Paleoarctico occidentale. A livello nazionale, ISPRA individua gli intervalli idonei per adeguare i periodi di rilevamento agli andamenti locali dei cicli di marea (fondamentali per il corretto monitoraggio dell'alto Adriatico) (Zenatello et al., 2020).

Individuazione dei siti

Dal recepimento della convenzione internazionale delle zone umide, l'ISPRA ha suddiviso le zone umide italiane in due categorie: le 'zone elementari' formate da siti di piccola estensione, definite attraverso criteri idrografici o geografici e le 'macro-zone', costituite da un insieme di siti elementari (Zenatello et al., 2014). Le zone composte riflettono il criterio di 'unità ecologica o funzionale' come indicato dalla convenzione di Ramsar, cioè raggruppano aree ed habitat anche eterogenei che costituiscono l'effettiva unità geografica di svernamento di un popolamento di uccelli acquatici. La laguna di Venezia, come si evince dalla descrizione sopra effettuata, rappresenta una delle più importanti macro-zone del bacino del Mediterraneo. I rilievi vengono condotti contemporaneamente entro i comprensori di zone umide maggiormente estesi e anche nelle aree a queste adiacenti affinché il rischio di conteggi doppi o incompleti venga minimizzato con particolare riferimento alle specie più mobili.

La laguna di Venezia, codificata come "VE0900" per il progetto IWC, è composta da numerose singole aree, esse pure codificate in maniera univoca e gerarchicamente inferiore, descritte nei loro confini laddove necessario (tabella 1).

Tabella 1: estratto della parte iniziale dell'elenco delle zone umide che compongono l'area 'VE0900' in funzione del progetto IWC.

Codice	Localita	Descrizione
VE0900	Laguna di Venezia	
VE0901	Litorale Cortellazzo - Sile	Litorale dal Porto di Cortellazzo (incl. Tratto F. Piave da confl. Canale Cavetta al mare) alla foce del F. Sile (escl.)
VE0902	Litorale Sile - Lido	Litorale dalla foce del F. Sile (incl.) al Porto di Lido (incl.)
VE0903	F. Sile, Portegrandi - Caposile	F. Sile da ponte di Portegrandi, SS 14 a Caposile (escl.) (Taglio del Sile)
VE0904	F. Sile, Caposile - foce	F. Sile da Caposile (incl.) alla foce (escl.)
VE0905	Valle Zanella	Valle Saccagnana
VE0906	Valle Sacchetta	
VE0907	Valle Sacchettina	
VE0908	Valle Paleazza	
VE0909	Valle Olivari	
VE0910	Valle Liona	
VE0911	Laguna Falconera - Pordelio	Laguna Falconera e bacino del Canale Pordelio (incl. Valli Basegia, Mesole, Vallesina Falconera)
VE0912	Valle Cavallino	
VE0913	Valle Dragojesolo	Incl. Valle San Micei, Valle degli Orcoli
VE0914	Valle Fosse	

È stata presa come area di studio, nel presente lavoro, soltanto la porzione della laguna soggetta a marea, ovvero le sette zone umide elencate in tabella 2. Queste coprono una superficie complessiva di 416,15 km² e rappresentano una frazione sostanziale della macro-zona di appartenenza (79,39%).

Tabella 2: composizione dell'area oggetto di studio, corrispondente a tutta la laguna soggetta a marea

Codice IWC	Nome	Area (km ²)
VE0911	Laguna Falconera - Pordelio	7,81
VE0919	Laguna Superiore di Venezia	141,73
VE0923	Laguna Media di Venezia	81,22
VE0927	Laguna di Giare	34,75
VE0939	Laguna Inferiore di Venezia	122,02
VE0940	Valle Millecampi	18,67
VE0941	Valli di Brenta	9,95
	TOT.	418,15

Nella figura 3, si illustra la mappa delle sette zone che compongono l'area di studio VE0900. Delle sue sette componenti, si sono analizzati i dati dei censimenti IWC considerando una finestra temporale di vent'anni, dal 2000 al 2019.

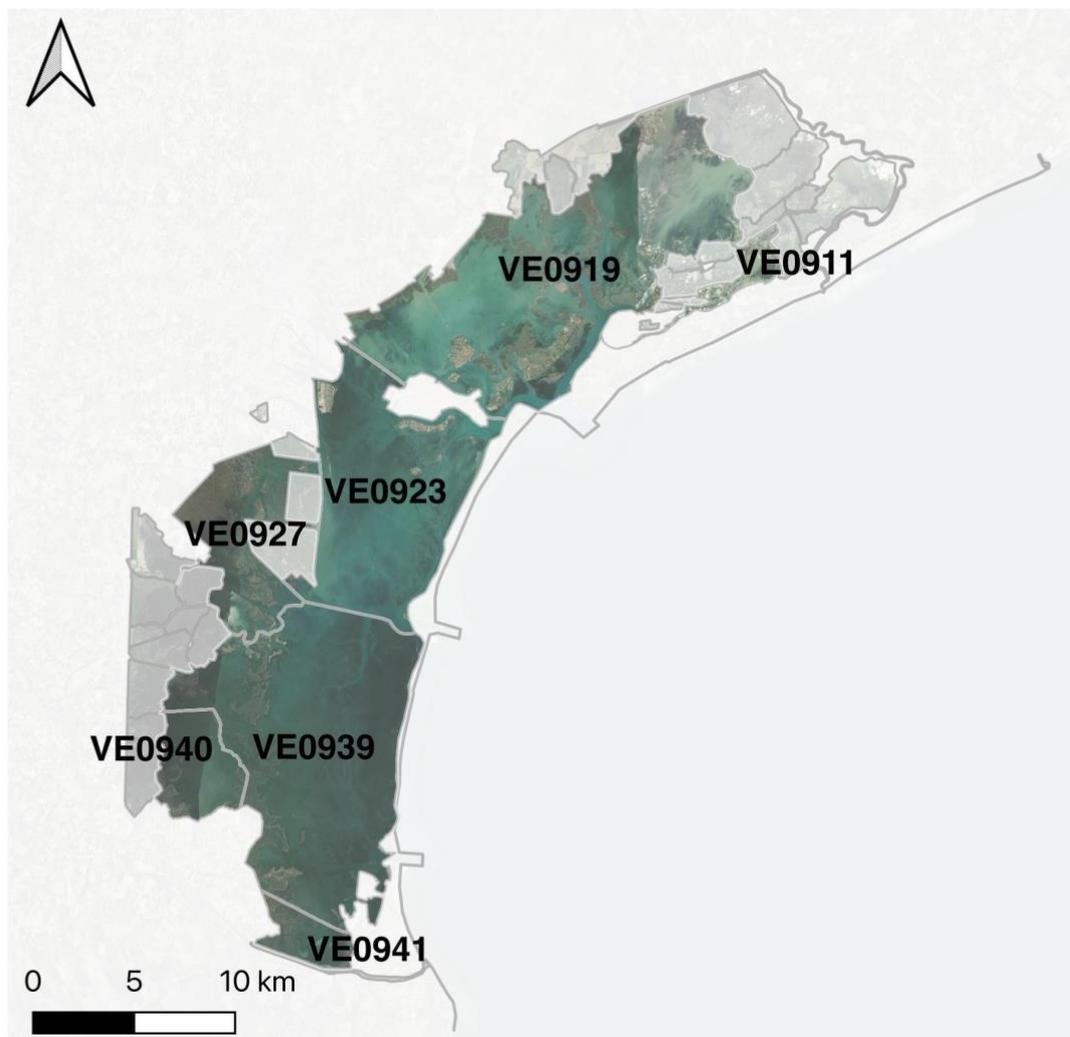


Figura 3: : mappa dell'area di studio con le singole zone IWC interessate dal presente lavoro. In trasparenza e delineato di grigio le altre aree facenti parte di VE0900

2.3 Determinazione delle categorie trofiche degli uccelli acquatici

La diversità delle comunità biologiche svolge un ruolo chiave nel determinare il funzionamento degli ecosistemi e ciò si realizza attraverso le interazioni trofiche e i loro effetti indiretti su altri processi ecosistemici. I cambiamenti della biodiversità ad un livello trofico sono noti per influenzare la biodiversità nei livelli adiacenti e oltre, determinando effetti che si riflettono sull'intero ecosistema (Raicevich et al., 2003). In questa dinamica così complessa e mutevole gli uccelli acquatici, per effetto della loro diversità e biomassa, risultano avere un ruolo di primo piano negli ambienti lagunari.

Le specie afferenti al gruppo degli uccelli acquatici considerate sono state raggruppate in categorie trofico-funzionali per discriminare i gruppi con diete simili, ma distinti per tipologia di attività. Le categorie trofiche sono gruppi di specie che hanno necessità simili in termini di prede e di habitat e giocano un simile ruolo

ecologico all'interno della comunità a cui appartengono a seconda delle caratteristiche di uso dell'ambiente in termini spaziali e temporali.

La determinazione delle categorie considerate è avvenuta a partire da un precedente lavoro sulla comunità degli uccelli acquatici in zone umide costiere dell'alto Adriatico (Boldreghini e Dall'Alpi, 2004). Partendo dalle 15 categorie individuate da questi autori, tenendo conto del contesto veneziano, del periodo di svernamento e delle specie censite nei vent'anni di progetto, si sono accorpati alcuni gruppi e altri invece sono stati esclusi fino ad arrivare a considerare otto categorie trofiche. L'unione di alcune categorie è stata dettata dalla necessità di avere a disposizione una quantità di biomassa che potesse rappresentare un campione solido da elaborare. I criteri di unione dei gruppi sono stati diversi: un criterio si è basato sulla somiglianza delle prede, nonostante le differenze nelle modalità di predazione, come quelle che si osservano tra gli ittiofagi nuotatori (es. un cormorano) e ittiofagi volatori (es. una sterna); in altri casi, si è privilegiata la strategia di uso dell'habitat anche a fronte di diete leggermente diverse, come nel caso degli sguazzatori fitofagi e di quelli polifagi (Abarca-Arenas e Ulanowicz, 2002). Altre categorie non sono state considerate o perché poco rappresentate in termini di numero di individui e biomassa o perché la loro alimentazione non si svolge all'interno dell'area di studio. Il primo caso è rappresentato dai rapaci, mentre il secondo dai brucatori quali le oche.

Un solo caso di spostamento di specie è stato effettuato in linea con la contestualizzazione delle categorie con la ristretta finestra temporale indagata. Si tratta del gabbiano corallino (*Larus melanocephalus*), specie in allegato 1 della 'direttiva Uccelli', che era stato considerato 'ittiofago' nella produzione di Boldreghini, ma che è stato spostato nella categoria onnivori in considerazione del fatto che durante l'inverno non si ciba soltanto di pesci.

Dalle quindici categorie considerate da Boldreghini si è passati a otto categorie idonee per gli scopi di questo lavoro:

- sguazzatori
- nuotatori
- ittiofagi
- ittiofagi trampolieri
- malacofagi
- filtratori
- onnivori
- limicoli

A seguire, si illustra in tabella 3 gli accorgimenti e le modifiche effettuate alle categorie descritte da Boldreghini per il caso specifico di questo elaborato.

Tabella 3: sintesi delle considerazioni ed elaborazioni delle categorie trofiche.

Categorie Boldreghini	Azione effettuata	Questo lavoro
Sguazzatori fitofagi	UNITE	Sguazzatori <i>13 specie</i>
<i>6 specie</i>		
Sguazzatori polifagi	UNITE	Nuotatori <i>4 specie</i>
<i>7 specie</i>		
Nuotatori fitofagi	UNITE	Nuotatori <i>4 specie</i>
<i>2 specie</i>		
Nuotatori polifagi	UNITE	Nuotatori <i>4 specie</i>
<i>2 specie</i>		
Brucatori	NON CONSIDERATA	
<i>6 specie</i>		
Malacofagi	MANTENUTA	Malacofagi
<i>7 specie</i>		<i>7 specie</i>
Onnivori	MANTENUTA (si aggiunge il gabbiano corallino)	Onnivori
<i>7 specie</i>		<u><i>8 specie</i></u>
Beccatori	UNITE	Limicoli <i>28 specie</i>
<i>18 specie</i>		
Sondatori	UNITE	Limicoli <i>28 specie</i>
<i>10 specie</i>		
Filtratori	MANTENUTA	Filtratori
<i>5 specie</i>		<i>5 specie</i>
Ittiofagi volatori	UNITE	Ittiofagi <i>20 specie</i>
<i>5 specie</i>		
Ittiofagi nuotatori	UNITE	Ittiofagi <i>20 specie</i>
<i>15 specie</i>		
Ittiofagi trampolieri	MANTENUTA	Ittiofagi trampolieri
<i>8 specie</i>		<i>8 specie</i>
Invertebratofagi trampolieri	NON CONSIDERATA	
<i>7 specie</i>		
Rapaci	NON CONSIDERATA	
<i>6 specie</i>		

A seguire, in tabella 4 e 5, le specie che compongono le otto categorie considerate in questo lavoro.

Tabella 4: elenco specie che compongono le categorie dei cosiddetti Sguazzatori, Nuotatori, Malacofagi e Onnivori

Sguazzatori	Nuotatori	Malacofagi	Onnivori
<i>Cygnus atratus</i>	<i>Netta rufina</i>	<i>Clangula hyemalis</i>	<i>Larus ridibundus</i>
<i>Cygnus olor</i>	<i>Aythya ferina</i>	<i>Somateria mollissima</i>	<i>Larus melanocephalus</i>

<i>Cygnus cygnus</i>	<i>Aythya nyroca</i>	<i>Melanitta fusca</i>	<i>Larus delawarensis</i>
<i>Cygnus columbianus</i>	<i>Fulica atra</i>	<i>Melanitta nigra</i>	<i>Larus canus</i>
<i>Alopochen aegyptiaca</i>		<i>Bucephala clangula</i>	<i>Larus fuscus</i>
<i>Spatula querquedula</i>		<i>Aythya fuligula</i>	<i>Larus argentatus</i>
<i>Spatula clypeata</i>		<i>Aythya marila</i>	<i>Larus michahellis</i>
<i>Mareca strepera</i>			<i>Larus cachinnans</i>
<i>Mareca penelope</i>			
<i>Anas platyrhynchos</i>			
<i>Anas acuta</i>			
<i>Anas crecca</i>			
<i>Gallinula chloropus</i>			

Tabella 5: elenco specie che compongono le categorie dei Limicoli, Filtratori, Ittiofagi trampolieri e Ittiofagi.

Limicoli	Filtratori	Ittiofagi trampolieri	Ittiofagi
<i>Haematopus ostralegus</i>	<i>Tadorna tadorna</i>	<i>Botaurus stellaris</i>	<i>Mergellus albellus</i>
<i>Himantopus himantopus</i>	<i>Tadorna ferruginea</i>	<i>Nycticorax nycticorax</i>	<i>Mergus merganser</i>
<i>Pluvialis squatarola</i>	<i>Phoenicopterus roseus</i>	<i>Ardeola ralloides</i>	<i>Mergus serrator</i>
<i>Pluvialis apricaria</i>	<i>Platalea leucorodia</i>	<i>Ardea cinerea</i>	<i>Tachybaptus ruficollis</i>
<i>Charadrius hiaticula</i>	<i>Recurvirostra avosetta</i>	<i>Ardea purpurea</i>	<i>Podiceps grisegena</i>
<i>Charadrius alexandrinus</i>		<i>Ardea alba</i>	<i>Podiceps cristatus</i>
<i>Vanellus vanellus</i>		<i>Egretta garzetta</i>	<i>Podiceps auritus</i>
<i>Numenius phaeopus</i>		<i>Egretta gularis</i>	<i>Podiceps nigricollis</i>
<i>Numenius arquata</i>			<i>Gavia stellata</i>
<i>Limosa lapponica</i>			<i>Gavia arctica</i>
<i>Limosa limosa</i>			<i>Gavia immer</i>
<i>Arenaria interpres</i>			<i>Pelecanus onocrotalus</i>
<i>Calidris canutus</i>			<i>Microcarbo pygmaeus</i>
<i>Calidris pugnax</i>			<i>Gulosus aristotelis</i>
<i>Calidris falcinellus</i>			<i>Phalacrocorax carbo</i>
<i>Calidris alba</i>			<i>Hydrocoloeus minutus</i>
<i>Calidris alpina</i>			<i>Rissa tridactyla</i>
<i>Calidris maritima</i>			<i>Larus genei</i>
<i>Calidris minuta</i>			<i>Hydroprogne caspia</i>
<i>Scolopax rusticola</i>			<i>Thalasseus sandvicensis</i>
<i>Gallinago gallinago</i>			
<i>Lymnocyptes minimus</i>			
<i>Actitis hypoleucos</i>			
<i>Tringa ochropus</i>			
<i>Tringa erythropus</i>			
<i>Tringa nebularia</i>			
<i>Tringa totanus</i>			
<i>Tringa stagnatilis</i>			

2.4 Programma Ecopath

Ecopath è la routine principale di Ecopath with Ecosim (EwE), un pacchetto software a libero accesso di modellizzazione ecologica/ecosistemica, basato su un approccio proposto da Polovina (1984) e successivamente aggiornato con una varietà di approcci ecologici e teorici (Libralato et al., 2006).

Si compone di tre principali moduli:

- Ecopath, tale modulo consente la costruzione di un modello di bilanciamento di massa di una determinata rete trofica, rappresentando i gruppi funzionali dell'ecosistema come interattivi mediante rapporti di alimentazione (Libralato et al., 2006);
- Ecosim, modulo di simulazione dinamica temporale che descrive dinamicamente l'interazione predatore-preda, tale modulo utilizza relazioni Lotka-Volterra modificate per tenere conto della *'foraging arena theory'* (Walters et al., 1997, 2000), che permettono di evitare l'assunzione irrealistica di Lotka-Volterra di una distribuzione uniforme e casuale delle interazioni, tipicamente assunta con le funzioni di massa-azione (Libralato et al., 2006);
- Ecospace, è un modulo di dinamica spaziale e temporale progettato per indagare gli impatti principalmente di origine antropica sulle aree protette.

Il programma può essere usato per:

- valutare effetti della pesca sull'ecosistema;
- indagare le opzioni delle politiche di gestione;
- analizzare gli impatti su e il collocamento di aree marine protette;
- predire movimenti e accumuli di contaminanti;
- modellizzare gli effetti dei cambiamenti ambientali;
- facilitare la costruzione di modelli end-to-end (modelli che elaborano dati all'inizio e restituiscono risultati alla fine del processo e non in passaggi intermedi)

Nato per indagare reti trofiche acquatiche (Christensen et al., 2005), viene sempre più utilizzato per indagare le connessioni ecologiche ed ecosistemiche le reti trofiche acquatiche che interagiscono con processi ecologici che avvengono in ambiente subaereo, in particolare negli ambienti di transizione come quelli lagunari. In parallelo, si stanno sempre più creando anche pacchetti e librerie di Ecopath per il software RStudio, altro software open-access di calcolo statistico.

Gli uccelli acquatici rappresentano una importante componente delle reti alimentari di ambienti costieri e spesso hanno effetti indiretti di vasta portata sulla struttura ecologica e sul funzionamento degli stessi. Pertanto, la struttura e la

complessità delle reti alimentari degli uccelli acquatici ha un ruolo focale nello studio della propagazione degli effetti indiretti di perturbazione negli ecosistemi (Raicevich et al., 2003). Ecopath è stato utilizzato per creare un modello che indaga come gli uccelli si distribuiscono nello spazio in base alla disponibilità delle prede all'interno della laguna di Venezia.

2.4.1 Dati ambientali e dati sull'avifauna

Come primo passo si è provveduto alla selezione, al controllo ed alla conversione dei dati a disposizione per poter essere analizzati con il primo modulo di Ecopath.

La definizione dei parametri del modello utilizzato è iniziata dall'inserimento delle coordinate dei vertici dell'area oggetto di studio, della superficie del dominio e delle unità di misura (figura 4).

Figura 4: schermata iniziale di inserimento dei parametri del modello

Col secondo passaggio si è provveduto ad inserire i dati e gli altri parametri necessari affinché il programma elabori un bilanciamento di massa della rete trofica. Per bilanciamento di massa si intende quel processo in cui tutti i componenti della rete trofica espressi in biomassa, risultano in equilibrio tra loro secondo i rapporti preda/predatori precedentemente inseriti. In particolare, i parametri di input per Ecopath sono (figura 5):

- biomassa (sigla B, espressa in t/km²);
- tasso di produzione (P/B, inteso come produzione di biomassa nell'unità di tempo, espresso in t/km²/anno);
- tasso di consumo (Q/B, inteso come assunzione di cibo da parte di un gruppo, viene espresso come rapporto di consumo rispetto alla biomassa nell'unità di tempo, espresso in t/km² /anno);

- preferenze dietetiche (matrice dieta espressa come frazione di preda 'i' (proporzione della biomassa mangiata) nella dieta del predatore 'j', nonché il rapporto alimentare non assimilato per ciascun gruppo (Christensen et al., 2004).

I seguenti parametri invece:

- frazione della produzione che viene utilizzata all'interno del sistema dai predatori (denominata Ecotrophic Efficiency EE);
- efficienza di crescita dei gruppi (espressa P/Q come rapporto tra tasso di produzione e quello di consumo in t/km²/anno);
- tasso di respirazione (R/B, espressione dell'attività dei singoli gruppi, è fortemente influenzato dalla frazione presunta del cibo che non è assimilato, e viene espressa sempre in t/km²/anno) per gruppo;

vengono stimati dal modello, consentendo di valutare se la rete trofica risulta bilanciata (Moutopoulos et al., 2013).

Risultano essere trentatré le categorie della rete trofica considerate di cui già si dispone dei parametri necessari per il bilanciamento della rete trofica. Si inizia con i produttori primari quali alghe e fanerogame ed epifite (categorie dalla 1 alla 3 in tabella 6), per passare alle varie categorie di benthos, plancton, molluschi quali *Ruditapes sp.* e crostacei quali *Crangon crangon* (cat. dalla 4 all 19 in tabella 6), e infine arrivare ai pesci di laguna (categoria dalla 20 alla 31 in tabella 6) suddivisi anche in singole stanze (per stanza si intende una sottocategoria autonoma in cui si divide per esempio in classi di età una medesima specie perché ha diverse esigenze trofiche) quali i mugilidi, l'orata *Sparus aurata* e il branzino *Dicentrarchus labrax*. In questo quadro si sono inserite le otto categorie di uccelli che, insieme ai gruppi antropici relativi a pescatori e vongolari, risultano essere i predatori apicali della rete trofica. Le ultime due categorie (non rappresentate in tabella 6) sono rispettivamente indicate con le sigle OMW e OMS e rappresentato rispettivamente: il primo, materiale organico detritico dissolto e particolato presente nella colonna d'acqua e il secondo, la materia organica detritica degradabile depositata sullo strato superiore di sedimento e che si è sciolto in acque interstiziali. Insieme queste due gruppi formano il detrito, categoria importante in termini energetici per la modellizzazione del bilanciamento trofico. Anche in questo caso i valori dei parametri afferenti questi due gruppi sono stati forniti dai ricercatori OGS.

Tabella 6: estratto della tabella di inserimento dei parametri descritti in precedenza. Group name: i gruppi che compongono la rete trofica; Habitat area: rappresenta il valore di quanto habitat interno al modello viene occupato dai vari gruppi; Biomassa (Bi); Mortalità totale: è la somma del tasso di mortalità naturale e il tasso di cattura/predazione; tasso di produzione (P/B); tasso di consumo (Q/B) per l'elaborazione del bilanciamento di massa della rete trofica.

	Group name	Hab area (proportion)	Biomass in habitat area (t/km ²)	Total mortality (/year)	Production / biomass (/year)	Consumption / biomass (/year)
1	Sg	1,00000	818,385		3,28903	
2	Sw	1,00000	76,3303		3,51691	
3	Ep	1,00000	584,568		87,6000	
4	MiphyB	1,00000	192,464		87,6000	
5	PhyPl	1,00000	1,05373		525,600	
6	Bactpl	1,00000	4,00000		140,000	244,000
7	MiZpl	1,00000	0,43506		550,500	1114,45
8	MesoZpl	1,00000	0,19912		36,0000	92,1423
9	MaZpl	1,00000	0,0080000		15,0000	50,5000
10	Mleidyi	1,00000	0,0000100000		103,800	306,290
11	MeioB	1,00000	32,5736		16,8104	68,5204
12	MaBd	1,00000	5,79870		3,82458	26,7691
13	MaBh	1,00000	6,41380		7,24942	34,7537
14	MaBff	1,00000	0,69720		4,76652	15,9060
∨	RP					
15	Rpj	1,00000	2,00313	4,90000		29,3264
16	Rpa	1,00000	11,1700	2,75000		10,1400
17	MaBmf	1,00000	0,83446		9,22450	54,4584
18	MaBc	1,00000	1,63470		4,96272	16,8390
19	Cc shrimp	1,00000	0,040700		2,32000	14,3389
∨	MU					
20	Muj	1,00000	0,57066	2,56324		15,7675
21	Mua	1,00000	8,81700	0,97338		4,64000
22	Abo	1,00000	0,55280		2,05236	12,3973
23	Syn	1,00000	0,11935		1,49000	7,15252
24	Gos	1,00000	0,13800		1,99999	8,62075
25	Zoj	1,00000	0,15169		1,68431	7,57971
26	Zoa	1,00000	0,51180		1,73360	7,42279
27	NkD	1,00000	0,56420		1,33696	6,26371
∨	SA					
28	Saj	1,00000	0,036646	1,98522		12,2019
29	Saa	1,00000	0,45300	1,10651		4,17800
∨	DL					
30	Dlj	1,00000	0,077383	1,46891		9,42493
31	Dla	1,00000	0,69000	0,75562		3,47000

Il lavoro, pertanto, di ricerca di tutti i parametri necessari a completare il quadro precedente, ha riguardato le categorie degli uccelli acquatici. Si è principalmente lavorato in due direzioni parallele:

- costituzione della biomassa per ogni categoria come risultato della somma delle singole biomasse di specie che compongono quel dato gruppo;
- definizione della dieta per ogni gruppo.

Per ottenere questi due dati si è attinto da Cramp and Simmons(1977). Un'unica opera, affidabile e omogenea nel rappresentare tutte le specie di uccelli del paleartico occidentale e le loro caratteristiche, prerogativa necessaria la creazione di un dataset interno all'uso del software.

Nel caso della creazione del dataset relativo alle prede si è proceduto in due direzioni. Il primo passo ha riguardato l'accorpamento o meno le specie di prede raccolte dalla bibliografia nei gruppi già individuati e presenti in Ecopath, e il secondo passaggio è stato quello di quantificare in termini percentuali le nuove categorie di prede precedentemente ottenute per ogni categoria di uccelli, andando a creare una matrice preda-predatore che successivamente è stata utilizzata nel bilanciamento trofico (tabella 8, pag. 26). Per una più chiara comprensione, in tabella 8, si illustrano le categorie di prede per ogni gruppo di uccelli. Le prede sono state raggruppate secondo la classificazione preesistente del progetto Venezia 2021, e implementate secondo la ricerca effettuata, il cui estratto è presente in tabella 7. Inoltre, sono state inserite in ordine decrescente di quantità (tabella 9). La categoria 'Import' è presente in tutte le diete e rappresenta tutti quei gruppi di specie non presenti nei dati a disposizione e pertanto non considerati nel progetto. Si rimanda al paragrafo sottostante per un approfondimento di questa categoria.

Tabella 7: estratto della tabella riassuntiva delle diete degli uccelli con in colonna (da sinistra a destra): nome italiano della specie; il peso in grammi; categoria trofica di appartenenza della specie di uccello; alimentazione prevalente; tecnica di prelievo dell cibo; specie predate; categoria di appartenenza delle prede all'interno del modello; suddivisione in percentuale della quantità di preda consumata rispetto al totale; provenienza delle informazioni sulle diete; periodo in cui sono stati raccolti i dati sulle diete.

specie	peso (g)	categoria trofica	cosa mangia	come mangia	prede	categoria preda	% sul totale	Paese	quando
Quattrocchi	853	malacophagous	primarily molluscs, crustaceans, and insect larvae	obtained by surface-diving rarely by dabbling and up ending. Up to 4 m Diet varies considerably with habitat and availability	Crangon	Cc shrimp	0,25	Denmark, salt water and brackish areas	
					Gammarus	MaBd	0,20		
					Idotea	MaBd	0,15		
					Carcinus maena	MaBmf	0,10		
					Littorina	MaBh	0,08		
					Hydrobia	FwP	0,08		
					Mytilus edulis	MaBff	0,06		
					Cardium	MaBff	0,06		
					fish Gobiidae	Gos	0,01		
					plants seeds	PRS	0,01		
Pesciolaia	593	ichthyophagous	in winter mainly fish at other times mainly insects.	obtained chiefly by surface diving	Gobidae (Gobius, Chaparruc	Gos	0,70	Denmark	winter
					sticklebacks (Gasterosteus aculeatus, Pungitius pungitius S. Spinachia)	Fi	0,25		
					crustaceans (Palaemon, Mys)	MaZpl	0,03		
					plant (Zostera, Ruppia, Pot)	Sg	0,02		
					eels	NkD	0,45		
					sticklebacks	Fi	0,25		
Smergo maggiore	1623	ichthyophagous	Primarily fish. Plant if presence taken accidentally.	obtained mainly by surface diving using legs only for propulsion. Forages with head submerged pursuing prey once sighted. In deeper water always dives.	Blenny	Fi	0,10	Denmark coastal water	winter
					Gobies	Gos	0,10		
					other fish	Fi	0,08		
					crustaceans	MaBc	0,02		
					Sticklebacks (Pungitius, Gasterosteus, Spinachia)	Fi	0,60		
					Gobius	Gos	0,15		
Smergo minore	1090	ichthyophagous	Primarily fish. Prey mostly small less than 8-10 cm.	obtained by foraging from surface with head and eyes immersed and subsequent diving. Prey brought to surface. Hunt in pairs small groups or large flocks.	blenny (Zoarces viviparus)	Fi	0,10	Denmark marine and brackish water.	unknown
					other fish	Fi	0,10		
					crustaceans	MaBc	0,03		
					molluscs, insects, and plant materials	NkD	0,02		
					Sticklebacks (Pungitius, Gasterosteus, Spinachia)	Fi	0,60		
					Gobius	Gos	0,15		

Tabella 8: estratto della tabella inerente la creazione della matrice preda-predatore creata per il primo modulo Ecopath. In colonna da sinistra verso destra: macrocategoria di appartenenza dei gruppi di prede, codice gruppo: sigla identificativa all'interno del programma, gruppo: specie o gruppo di specie di prede; a seguire le otto categorie trofiche di uccelli con le quantità di frazioni preda. La somma di tali quantità in colonna deve risultare 1 (100%). Si fa notare come ci siano celle in giallo caratterizzate dalla dicitura 'IMPORT' di cui si parlerà a seguire.

Macro categoria	Codice gruppo	Gruppo		Ittiofagi	Limicoli	Ittiofagi trampolieri	Filtratori	Onnivori	Nuotatori	Sguazzatori	Malacofagi
				A	B	C	D	E	F	G	H
Plant	1	Sg	Seagrasses	0,003483			0,006000		0,068460	0,293303	
Plant	2	Sw	Seaweeds		0,001845		0,024000		0,144254	0,066205	
Plant	3	Ep	Epiphytes								
Plant	4	MiphyB	Microphytobenthos								
Plant	5	FwP	freshwater plant					0,006250	0,369193	0,061586	0,011429
Plant	6	PRS	plant roots and seed	0,001493	0,015867		0,024000	0,046250	0,132029	0,139338	0,007143
Plant	7	PA	Alfiole								0,084681
Plant	8	Pte	terrestrial plants				0,200000		0,105134	0,083141	
Plant	9	GIP	grass-like plant						0,073350	0,066975	
PhytoPL	10	PhyPl	Phytoplankton								
Bacteria	11	Bactpl	Bacterioplankton								
ZooPL	12	MIZpl	Microzooplankton								
ZooPL	13	MesoZpl	Mesozooplankton				0,080000				
ZooPL	14	MaZpl	Macrozooplankton	0,001493				0,018750			
Jelly	15	Mleidyi	Mnemiopsis leidyi								
Benthos	16	MeioB	Meiobenthos		0,003690			0,018750	0,002445		
Benthos	17	MaBd	Macrobenthos detritivorous		0,314760		0,102000	0,068750	0,002445	0,037721	0,130000
Benthos	18	MaBh	Macrobenthos herbivorous	0,007464	0,100000				0,014670	0,110855	0,071429
Benthos	19	MaBhF	Macrobenthos herbivorous (IMPORT)	0,004976	0,025830				0,012225	0,016936	
Benthos	20	MaBff	Macrobenthos filter feeders	0,000498	0,075277		0,140000	0,081250	0,014670		0,641429
Benthos	stanza	RP									
Benthos	21	Rpj	juvenile								
Benthos	22	Rpa	adult								
Benthos	23	MaBmf	Macrobenthos mixed feeder	0,037818	0,116974		0,040000	0,050000	0,002445	0,003849	0,061429
Benthos	24	MaBc	Macrobenthos carnivorous	0,002488	0,031734		0,140000		0,002445		0,028571
Benthos	25	Cc shrimp	Crangon crangon	0,016919	0,025461					0,003849	0,035714
Fish	stanza	MU	Mugilidae	0,057225				0,037500			
Fish	26	Muj	juvenile	0,031847			0,043750	0,006250			
Fish	27	Mua	adult	0,024881			0,018750				

Tabella 9: riassunto delle tipologie di prede, espresse in categorie, per i rispettivi gruppi di uccelli. Le categorie di prede sono inserite in ordine decrescente di quantità.

Categorie trofiche	Macrocategorie di prede in ordine decrescente
Sguazzatori	Import, Piante, Benthos, Pesci
Nuotatori	Import, Piante, Benthos, Pesci
Ittiofagi	Pesci, Import, Benthos, Piante, Detrito
Malacofagi	Benthos, Import, Pesci
Onnivori	Import, Benthos, Pesci, Zooplancton
Filtratori	Benthos, Import, Zooplancton, Pesci, Piante, Detrito
Limicoli	Benthos, Import, Pesci, Piante
Ittiofagi trampolieri	Import, Pesci

Import

L'import è un'importante categoria dello strumento 'composizione della dieta' (strumento che verrà descritto in seguito) del programma Ecopath che definisce e quantifica la frazione di prede che viene consumato al di fuori del sistema ed è dovuto a:

- movimenti locali al di fuori del dominio del modello (consumo in aree adiacenti)
- movimenti a lungo raggio (es.: migrazioni, non considerate in questo lavoro)
- prede che non sono state considerate dal modello (es.: topolini o

mangime).

L'import' è quella quota parte di prede che non vengono considerate all'interno del programma. I motivi di esclusione si possono ricondurre al fatto che alcuni gruppi o specie hanno un areale esterno all'area considerata dal modello, e/o non si dispone di sufficienti dati dei parametri precedenti da inserire per il bilanciamento della rete trofica. a quota parte di dieta non considerata altro non è che biomassa di uccelli che viene tolta dall'elaborazione. Questo ammanco permette di giustificare le seguenti scelte operative:

- la scelta di non rappresentare gli spostamenti degli uccelli tra le zone di riposo e di foraggiamento tramite lo strumento vettoriale;
- il fatto di aver considerato tutta la biomassa degli uccelli afferente alla macrozona IWC VE0900, la laguna di Venezia, insistente sulla sola area soggetta a marea. La quota di biomassa sottratta tramite l'import permette di rappresentare al meglio il rapporto tra area considerata dal modello e comunità che insiste su di essa.

2.4.2 Parametri della rete trofica

Affinché il primo step del programma restituisca il bilanciamento trofico è necessario fornire una serie di parametri per le categorie che vanno a comporre la rete trofica. I dati riferiti alle categorie del mondo sommerso sono già presenti, pertanto, la ricerca si è concentrata su trovare i valori opportuni per ogni parametro per la comunità ornitica indagata. A seguire una breve descrizione della metodologia usata per raccogliere tali informazioni.

Biomassa

La biomassa degli uccelli ricavata dai dati dei censimenti e dai valori di peso delle diverse specie ottenuti da Cramp and Simmons (1977) ed espressa in grammi, è stata successivamente convertita in tonnellate su chilometro quadro come richiesto dal programma. Si sono usati i pesi di tutte le specie raggruppate nelle rispettive categorie. Ecopath, necessita di default che per il primo anno (2000) i valori siano 'rafforzati' e pertanto è prassi esprimere tali valori attraverso una media, in questo caso dei primi cinque anni di progetto (anni 2000-2004) per ogni zona che compone VE0900 (tabella 10). La biomassa iniziale si è ottenuta sommando le medie pesate in proporzione al peso specifico della singola macrozona sul totale di VE0900. Si è usata la funzione 'matrice somma-prodotto' che restituisce la somma dei prodotti di intervalli o matrici corrispondenti. Gli

argomenti delle matrici devono avere stessa grandezza. Si è così ottenuto il dato iniziale di biomassa pesata espressa in tonnellate per chilometro quadro.

Tabella 10: tabella riassuntiva del calcolo della biomassa media espressa in t/km2. Il calcolo è stato

ITTIOfAGI	BM media 00-04	Km2	% sul tot	t/Km2	RISULTATO	SGUAZZATORI	BM media 00-04	Km2	% sul tot	t/Km2	RISULTATO
Laguna aperta	3,98020575	416,151770	76,68%	0,00956431	0,013230	Laguna aperta	0,39350335	416,151770	76,68%	0,000946	0,105946
Bonifiche	0,022251	11,442410	2,11%	0,00194459		Bonifiche	0,046939	11,442410	2,11%	0,004102	
Coste	0,269601	2,173300	0,40%	0,1240516		Coste	0,054285	2,173300	0,40%	0,024978	
Fiumi	0,032097	4,116340	0,76%	0,00779746		Fiumi	0,125925	4,116340	0,76%	0,030591	
Valli N	1,662783	56,225240	10,36%	0,0295736		Valli N	25,244179	56,225240	10,36%	0,448983	
Valli S	1,122448	38,535600	7,10%	0,02912755		Valli S	31,526761	38,535600	7,10%	0,818120	
Casse	0,091141	14,084740	2,60%	0,00647087		Casse	0,108270	14,084740	2,60%	0,007687	
LIMICOLI	BM media 00-04	Km2	% sul tot	t/Km2	RISULTATO	DIVINGS	BM media 00-04	Km2	% sul tot	t/Km2	RISULTATO
Laguna aperta	1,4959337	416,151770	76,68%	0,003595	0,005601	Laguna aperta	0,000843	416,151770	76,68%	0,000002	0,047531
Bonifiche	0,2403457	11,442410	2,11%	0,021005		Bonifiche	0	11,442410	2,11%	0,000000	
Coste	0,0011070	2,173300	0,40%	0,000509		Coste	0,00164	2,173300	0,40%	0,000755	
Fiumi	0,0092160	4,116340	0,76%	0,002239		Fiumi	0,103812	4,116340	0,76%	0,025219	
Valli N	0,1397295	56,225240	10,36%	0,002485		Valli N	11,80468975	56,225240	10,36%	0,209954	
Valli S	1,0670850	38,535600	7,10%	0,027691		Valli S	13,87980713	38,535600	7,10%	0,360181	
Casse	0,0865768	14,084740	2,60%	0,006147		Casse	0,00574	14,084740	2,60%	0,000408	
FILTRATORI	BM media 00-04	Km2	% sul tot	t/Km2	RISULTATO	ONNIVORI	BM media 00-04	Km2	% sul tot	t/Km2	RISULTATO
Laguna aperta	0,160550	416,151770	76,68%	0,000386	0,003227	Laguna aperta	9,904080	416,151770	76,68%	0,023799	0,039023
Bonifiche	0,045676	11,442410	2,11%	0,003992		Bonifiche	1,892788	11,442410	2,11%	0,165419	
Coste	0,000000	2,173300	0,40%	0,000000		Coste	1,617768	2,173300	0,40%	0,744383	
Fiumi	0,000000	4,116340	0,76%	0,000000		Fiumi	0,284195	4,116340	0,76%	0,069041	
Valli N	0,339983	56,225240	10,36%	0,006047		Valli N	4,545860	56,225240	10,36%	0,080851	
Valli S	1,205443	38,535600	7,10%	0,031281		Valli S	2,891695	38,535600	7,10%	0,075040	
Casse	0,000000	14,084740	2,60%	0,000000		Casse	0,0427785	14,084740	2,60%	0,003037	
ITTIOfAGI	BM media 00-04	Km2	% sul tot	t/Km2	RISULTATO	MALACOFAGI	BM media 00-04	Km2	% sul tot	t/Km2	RISULTATO
TRAMPOLIERI											
Laguna aperta	0,400680	416,151770	76,68%	0,000963	0,004919	Laguna aperta	0,016433	416,151770	76,68%	0,000039	0,000326
Bonifiche	0,050689	11,442410	2,11%	0,004430		Bonifiche	0,000000	11,442410	2,11%	0,000000	
Coste	0,005438	2,173300	0,40%	0,002502		Coste	0,041499	2,173300	0,40%	0,019095	
Fiumi	0,007647	4,116340	0,76%	0,001858		Fiumi	0,000766	4,116340	0,76%	0,000186	
Valli N	1,097760	56,225240	10,36%	0,019524		Valli N	0,104227	56,225240	10,36%	0,001854	
Valli S	1,023102	38,535600	7,10%	0,026550		Valli S	0,014071	38,535600	7,10%	0,000365	
Casse	0,084626	14,084740	2,60%	0,006008		Casse	0,000000	14,084740	2,60%	0,000000	

svolto con la funzione di excel 'Somma-Prodotta' sui dati della biomassa media dei primi cinque anni rapportati alla rispettiva zona di riferimento, successivamente pesata rispetto al totale della superficie. Il valore finale è stato espresso in t/km2.

Produttività

Il tasso di produttività è un parametro fondamentale in EwE ma che viene poco considerato negli studi su uccelli, a differenza di altri gruppi, quali pesci e molluschi, dove tale informazione è molto studiata. La produttività in ecologia si riferisce al tasso di rigenerazione di biomassa in un ecosistema, solitamente espresso in unità di massa per unità di tempo (come richiesto dal programma).

Tale parametro varia a seconda del gruppo animale (Gagliardi et al., 2007). Per gli uccelli un metodo di calcolo è quello utilizzato da Sibly (2012), in cui si calcola la produttività di una specie come:

$$(massa\ dell'uovo * numero\ di\ uova\ deposte * frequenza\ di\ deposizione)$$

$$biomassa\ uccello\ da\ adulto$$

Dato che non tutti i dati necessari per il calcolo di questo indice sono reperibili per ogni specie, in Sibly (2012) è presente una tabella con i valori per tutte le specie.

Come per la biomassa, la produttività dei gruppi risulta essere la somma delle singole produttività di specie pesata in base alla biomassa media nei vent'anni all'interno della categoria di appartenenza. Non tutte le specie sono state coinvolte in questo calcolo. Sono state tenute in considerazione soltanto le specie le cui biomasse medie risultassero essere rappresentative includendo sequenzialmente le specie, partendo da quelle con percentuale maggiore, tutte le specie fino a raggiungere il 95% di tutta la biomassa media della categoria (tabella 11). Per il calcolo di questo parametro si è usata la funzione 'matrice somma prodotto' su foglio di calcolo elettronico.

$$\text{Funzione} = \text{MATR.PRODOTTO}(\text{valori 'PB specie', '% specie BM'}).$$

Tabella 11: tabella di calcolo della produttività delle categorie. In colonna da sinistra a destra: categoria trofica di cui si vuole calcolare la produttività; specie: quelle più rappresentative la categoria di appartenenza in base a quanta biomassa rappresentano sul totale della categoria; BM specie/BM categoria: il valore della biomassa di quella data specie sul totale della categoria, espresso in percentuale; PB specie: valore della produttività della singola specie; PB categoria: valore ottenuto con la funzione matrice somma prodotto, pesando il PB specie a seconda del valore Bm specie/BM categoria.

Categoria trofica	Specie	BM specie/ BM cat.	PB specie	PB categoria
Ittiofagi	<i>Phalacrocorax carbo</i>	75.68%	0.072611	0.153898
	<i>Microcarbo pygmaeus</i>	5.22%	0.592925	
	<i>Podiceps cristatus</i>	9.94%	0.333426	
	<i>Tachybaptus ruficollis</i>	5.64%	0.618016	
		96.48%		
Limicoli	<i>Numenius arquata</i>	35.36%	0.382825	0.585654
	<i>Calidris alpina</i>	47.23%	0.809096	
	<i>Pluvialis squatarola</i>	5.55%	0.547016	
	<i>Vanellus vanellus</i>	4.59%	0.476431	
	<i>Tringa totanus</i>	1.61%	0.706318	
	<i>Haematopus ostralegus</i>	1.62%	0.279254	
		95.97%		
Filtratori	<i>Phoenicopterus roseus</i>	51.60%	0.070307	0.314487
	<i>Tadorna tadorna</i>	45.75%	0.608135	
		97.35%		
Sguazzatori	<i>Anas crecca</i>	27.34%	0.760326	0.565068
	<i>Cygnus olor</i>	9.36%	0.190985	
	<i>Anas acuta</i>	6.96%	0.357273	
	<i>Mareca penelope</i>	6.57%	0.462381	
	<i>Anas platyrhynchos</i>	48.13%	0.590201	
		98.36%		
Tuffatori	<i>Fulica atra</i>	91.91%	0.591562	0.601890
	<i>Aythya ferina</i>	8.05%	0.722770	
		99.96%		
Onnivori	<i>Larus ridibundus</i>	28.91%	0.228560	0.373460
	<i>Larus michahellis</i>	64.87%	0.445656	

	<i>Larus melanocephalus</i>	4.50%	0.406443	
		98.28%		
Ittiofagi trampolieri	<i>Ardea alba</i>	30.32%	0.510505	0.279706
	<i>Ardea cinerea</i>	53.71%	0.161065	
	<i>Egretta garzetta</i>	12.35%	0.311172	
		96.38%		
Malacofagi	<i>Aythya fuligula</i>	42.81%	0.709578	0.568301
	<i>Melanitta nigra</i>	7.95%	0.442588	
	<i>Melanitta fusca</i>	22.31%	0.405509	
	<i>Bucephala clangula</i>	21.74%	0.576766	
	<i>Aythya marila</i>	2.38%	0.566239	
		97.19%		

Consumo

Il consumo è l'assunzione di cibo da parte di un gruppo trofico nel periodo di tempo considerato. Nel programma viene inserito come rapporto di consumo rispetto alla biomassa (Q/B). Il consumo successivamente calcolato da Ecopath è un flusso espresso in t/km²/anno. Il parametro ricercato necessita soltanto del valore di biomassa consumata in quanto i valori di biomassa degli uccelli sono già stati reperiti dal lavoro in Dell'Alpi (2008) ricorrendo a una singola fonte bibliografica (Boldreghini e Dall'Alpi, 2008).

In questo caso, il valore finale del parametro consumo è stato ottenuto mediando tutti i rapporti calcolati per ogni singola specie afferente alla data categoria (tabella 12).

Tabella 12: specchio illustrativo il parametro consumo richiesto dal programma Ecopath, per ogni categoria.

Categoria trofica	Consumo
Sguazzatori	12.767121
Tuffatori	13.342490
Ittiofagi	13.539173
Malacofagi	12.684947
Onnivori	13.325176
Filtratori	12.496422
Limicoli	25.179878
Ittiofagi trampolieri	13.602964

Matrice dieta preda-predatore

Un altro passo necessario per arrivare ad ottenere il bilanciamento trofico è rappresentato dalla composizione della matrice dieta preda-predatore. Delle diete degli uccelli e di come si è giunti alla loro composizione e quantificazione si è già parlato nel paragrafo precedente. In questo paragrafo, si vuole soltanto evidenziare come i dati raccolti siano stati distribuiti all'interno delle categorie trofiche degli uccelli e poi inseriti in una matrice (tabella 13). Questa matrice esprime il rapporto preda-predatore e risulta essere l'elemento fondamentale del modello di rete trofica sia allo stato stazionario che nella dinamica temporale che si affronterà nel passo successivo con il modulo Ecosim.

Una volta inseriti tutti i parametri sopra elencati, Ecopath restituisce una serie di valori che vanno a completare l'equazione energetica su cui si basa il modulo stesso. Il programma inoltre segnala eventuali risultati errati che non porterebbero ad un bilanciamento corretto. In questi casi, oltre a verificare eventuali errori grossolani nell'inserimento dati inseriti, occorre intervenire sui parametri caratterizzati da un maggior grado di incertezza, soprattutto sulla matrice dieta, rivedendo e correggendo i valori fintanto che il modulo non restituirà correttamente tutti i risultati in modo corretto. Il modulo restituisce un modello di bilanciamento di massa della rete trofica, rappresentando i gruppi funzionali dell'ecosistema come interattivi tra loro e mediante rapporti di alimentazione (Libralato et al., 2006) (figura 9 pag. 49).

2.5 Ecosim, l'andamento nel tempo

Ecosim utilizza un sistema di equazioni differenziali che esprimono i tassi di flusso della biomassa tra i bacini (in questo caso è presente un solo ed unico bacino rappresentato dall'area del modello) in funzione del variare nel tempo della biomassa.

Lo scopo dello sviluppo Ecosim è stato duplice: in primo luogo, esplorare quali fattori hanno contribuito ai cambiamenti osservati durante il periodo indicato (2000-2019) e in secondo luogo, applicare il modello calibrato per le proiezioni future in diversi scenari ambientali e di pesca (Tsagarakis et al., 2022).

In sintesi:

- utilizza i risultati del bilancio di massa per la stima dei parametri;
- sviluppa una modellizzazione della dinamica dei gruppi funzionali che compongono l'ecosistema la rete trofica utilizzando la pesca e le modifiche di produzione primaria quali forzanti;
- indaga il controllo top-down vs bottom-up tra le categorie trofiche in modo esplicito;

Le interazioni tra predatore e preda sono moderate dal comportamento della preda per limitare l'esposizione alla predazione, in modo tale che i modelli di flusso di biomassa possano mostrare un controllo dal basso verso l'alto o dall'alto verso il basso (cascata trofica). Effettuando simulazioni ripetute, Ecosim consente l'adattamento delle biomasse previste ai dati delle serie temporali (Christensen et al., 2005). Ecosim in effetti beneficia dell'inserimento di serie temporali dei dati a disposizione: in questo frangente le serie temporali delle biomasse riferite ai totali di uccelli censiti annualmente per il progetto IWC. Per molti dei gruppi da incorporare nel modello, i dati delle serie temporali sono disponibili dagli andamenti delle singole specie. Il programma si basa quindi su questi dati, estrapolati dalle diverse aree specialistiche (plancton, bentos, ittiofauna, avifauna, etc.), per integrarli a livello di ecosistema (Christensen e Walters, 2004).

2.5.1 Calibrazione dati temporali e fitting dei rapporti preda/predatore

La modellizzazione dinamica del bilanciamento parte dal settaggio della finestra 'time series' delle varie categorie trofiche. La finestra temporale assunta a priori inizia dal 1980 e si protrae fino al 2050, e sia l'intervallo di elaborazione che i dati afferenti ai gruppi relativi alle prede non sono stati modificati. Sono state approfondite le dinamiche dei gruppi relativi all'avifauna in due direzioni principali: le biomasse e il grado di interazione tra gli uccelli e le rispettive categorie di prede.

Le biomasse sono state tutte aggregate pesandole a seconda dell'area in cui sono state censite le varie specie, come spiegato nel capitolo precedente, espresse

in tonnellata su chilometro quadro dall'anno 2000 fino al 2019. Al primo anno, il 2000, è stato inserito per ogni categoria, il dato della biomassa media dei primi cinque anni. Questo accorgimento risulta necessario affinché Ecosim, con un dato iniziale che risenta meno delle fluttuazioni annuali possa poi elaborare l'andamento temporale dei rapporti tra categorie. In gergo modellistico si chiama "spin-up" ed è utilizzato per ridurre gli effetti delle condizioni iniziali sulle dinamiche da analizzare.

Il passaggio più importante risulta essere la calibrazione della riga 'type' (tabella 15 pagina 35) relativa alle biomasse. Ci sono a disposizione tre possibilità (tabella 14) da poter associare alle varie categorie e questo dipende da quanto possono essere considerati affidabili i dati di quella data serie temporale.

Tabella 14: Definizione delle tre possibilità da associare ad ogni serie temporale inserita in Ecosim.

Biomassa	Valore 'Type'	Definizione
Assoluta	1	Il modello riproduce i valori uguali anno per anno (si utilizza quando si ritiene che i dati inseriti siano molto affidabili)
Relativa	0	Il modello restituisce valori liberi ma che dipendono soltanto da relazioni interne ai gruppi a cui è collegata quella data categoria. (si utilizza quando si ritiene che le biomasse inserite abbiano un certo grado di variabilità)
Forzata	-1	Il modello riproduce dinamiche che dipendono anche da relazioni esterne (i dati inseriti influiscono meno stimando che le biomasse siano molto variabili)

Tabella 15: schermata di inserimento delle time series con i dati di BM per le varie categorie in colonna, e la riga 'type' evidenziata con freccia rosso dove inserire il grado di possibilità inerente la serie temporale. Inoltre, il primo dato del 2000, si ricorda, essere la media dei primi cinque anni di biomasse.

Time series...						
Index	31	32	33	34	35	36
Image						
Name	Dia	IttioB	WadB	OmnB	DabB	DivB
Weight	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
Target	31: Dia	32: IttioB	33: WadB	34: OmnB	35: DabB	36: DivB
2nd target						
Type	Absolute biomass (reference) (1)	Relative biomass (reference) (0)				
Interval	Annual	Annual	Annual	Annual	Annual	Annual
1980						
1981						
1982						
1983						
1984						
1985						
1986						
1987						
1988						
1989						
1990						
1991						
1992						
1993						
1994						
1995						
1996						
1997						
1998						
1999						
2000	0.69000	0.013230	0.0056013	0.039023	0.10595	0.047531
2001		0.016494	0.0062811	0.030801	0.089335	0.063871
2002		0.010503	0.0040099	0.041466	0.13767	0.035191
2003		0.011821	0.0057544	0.036852	0.10294	0.039270
2004		0.011953	0.0040664	0.039183	0.13329	0.043155

La scelta di quale 'type' assegnare alle singole categorie, a seconda che siano più o meno affidabili le serie temporali a disposizione, dipende dal fatto che il modello che si sta costruendo è di tipo deterministico e non probabilistico e tali vincoli (tabella 14) servono per indirizzare in modo corretto e verificare le relazioni che si creano nella scala temporale tra le varie categorie.

Sono state effettuate varie calibrazioni con diversi vincoli applicati alle varie categorie di uccelli. Questo processo è stato svolto proprio per verificare quanto ciò che produce il modello si discosta o meno dall'andamento delle serie temporali di biomasse inserite. Sei differenti scenari sono stati fatti girare in Ecosim, di seguito il prospetto con le varie tipologie di vincoli applicati nelle calibrazioni alle otto categorie di uccelli (tabella 16).

Tabella 16: prospetto illustrante le sei calibrazioni svolte all'interno del modulo Ecosim. 'BM' significa biomassa.

Calibrazione	Type
Calibrazione 1	Tutte le categorie con BM forzata (-1)
Calibrazione 2	Tutte le categorie con BM relativa (0)
Calibrazione 3	Tutte le categorie con BM assoluta (1)
Calibrazione 4	Ittiofagi e limicoli con BM forzata, il resto con BM relativa (-1; 0)
Calibrazione 5	Ittiofagi con BM forzata e il resto con BM relativa (-1; 0)
Calibrazione 6	Limicoli con BM forzata e il resto con BM relativa (-1; 0)

Dopo aver deciso queste sei diverse calibrazioni sono stati creati sei file distinti di EwE su cui lavorare in modo parallelo per lo step successivo che riguarda il 'fitting' delle serie temporali.

Per comprendere a pieno come avviene tale elaborazione è importante dapprima definire cos'è il parametro vulnerabilità presente come strumento di calibrazione delle serie temporali inserite. La vulnerabilità è quel parametro che definisce quanta biomassa di preda viene consumata all'interno del rapporto preda-predatore sancito in precedenza nel modulo Ecopath, altro non è che la quota di preda che sfugge alla predazione. La vulnerabilità in sostanza è riconducibile alla frazione della preda che è predabile è tipica di ogni rapporto preda-predatore e varia in funzione della variazione delle biomasse del predatore lungo l'asse temporale considerato nel programma.

Il 'fitting' è un processo messo a punto dal programma e consiste nel generare una misura statistica della bontà di adattamento ai dati delle serie temporali sopra delineati. Basandosi sulla 'foraging arena theory' (Ahrens et al., 2012), il modello consente quattro tipi di analisi con la misura 'Sum of square' (analisi che vengono svolte in continuo ad ogni elaborazione richiesta):

- determinare la sensibilità di 'Sum of Square' (SS) ai parametri critici di vulnerabilità di Ecosim modificandoli leggermente (1%) quindi rieseguendo il modello per vedere quanto SS è cambiato (cioè, quanto sono sensibili le previsioni delle serie temporali supportate dai dati di vulnerabilità);
- ricerca di stime di vulnerabilità che forniscano migliori "fitting" di Ecosim ai dati delle serie temporali (SS inferiori);
- ricerca di valori di serie temporali della produttività primaria relativa annua che possano rappresentare i "cambiamenti di regime" storici della produttività che incidono sulle biomasse in tutto l'ecosistema;
- stimare una distribuzione di probabilità per l'ipotesi nulla che tutte le deviazioni tra il modello e le abbondanze previste siano dovute al caso, ovvero nell'ipotesi che non vi siano reali anomalie di produttività.

Foraging arena theory

Questa teoria nasce dalla necessità di valutare i continui scambi tra gli impatti di attività antropiche e la protezione degli ambienti acquatici all'interno di un contesto ecosistemico, e lo fa, avendo la capacità di riprodurre la stabilità dinamica propria dei sistemi acquatici, e indagando le interazioni predatore-preda limitate nello spazio e nel tempo. La teoria suddivide le prede, a seconda del rapporto preda-predatore sancito nel bilanciamento della rete trofica e dalla matrice dieta preda-predatore, in una condizione di vulnerabilità o invulnerabilità rispetto al predatore stesso. Il variare della preda tra queste due condizioni va a limitare il flusso trofico complessivo lungo l'asse temporale. Questa continua variazione della condizione della preda permette di prevedere le dinamiche del rapporto nel tempo e nello spazio, di conseguenza le sue ripercussioni sulla rete trofica generale e, in senso più ampio, di monitorare la diversità ecologica complessiva.

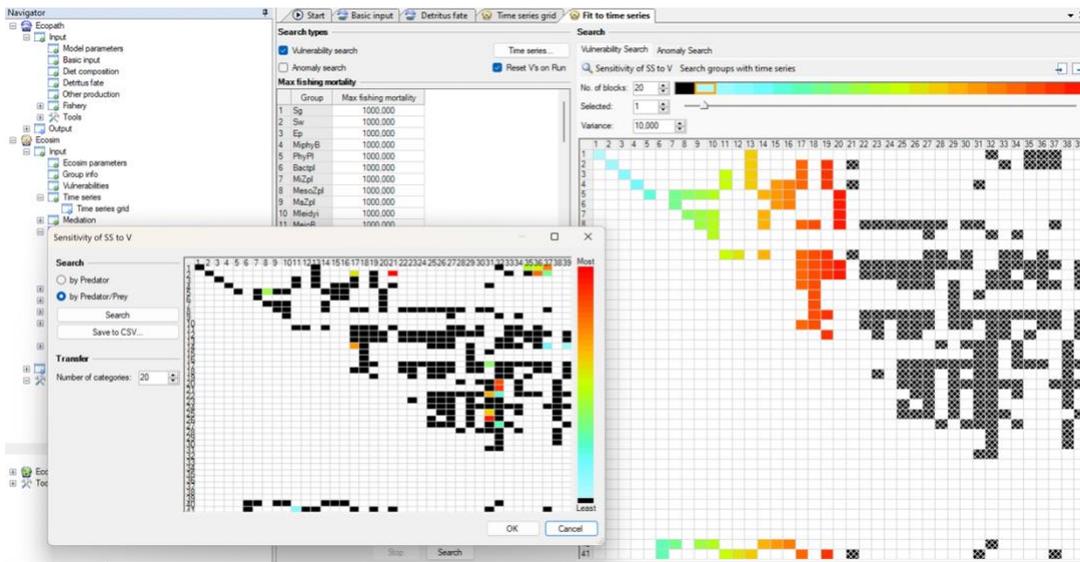


Figura 5: schermata di elaborazione della vulnerabilità della preda a seconda del rapporto preda-predatore con l'elaborazione continua di questo rapporto lungo l'asse temporale. La matrice illustrata non è altro che la matrice dieta preda-predatore del modulo Ecopath. La diversità del colore dei singoli quadrati evidenzia i rapporti preda-predatore più sensibili e pertanto dove la vulnerabilità della sola preda risulta essere rispettivamente maggiore o minore.

Pertanto, il rapporto preda-predatore, rappresentato nel modello dal parametro vulnerabilità (figura 5), viene continuamente adattato anche in riferimento alla sensibilità ('sensitivity' all'interno del programma, figura 5). Tale strumento determina quali rapporti preda-predatori risultano essere più sensibili all'interno dello stesso scenario per cui si sta eseguendo l'elaborazione. Pertanto, al variare dei parametri di 'type', delle serie temporali, della vulnerabilità, variano anche i rapporti preda-predatore più sensibili o meno allo scenario stesso.

Ad ogni elaborazione di sensibilità e della vulnerabilità del rapporto preda-predatore, il programma restituisce importanti informazioni su cui basare la scelta di quale calibrazione sia più pertinente allo scopo. Le informazioni per valutare la bontà delle diverse calibrazioni sono il 'SS' finale e l' 'Akaike information Criteria'.

'SS' viene utilizzato per identificare la differenza tra dati e il modello: ovvero quanto i dati possono adattarsi al modello nell'analisi. Il SS è calcolato come somma delle differenze quadrate nelle interazioni prese a campione. La regola generale è che più è basso il valore, minore è la variabilità del modello con i dati: con meno interazioni e aggiustamenti nelle serie temporali e nei rapporti preda - predatore, migliore sarà il modello elaborato in termini di accuratezza.

L' 'Akaike Information Criteria' rappresenta una stima dell'errore di predizione e quindi rappresenta la qualità relativa delle interazioni statistiche per un insieme di dati considerando anche il numero di gradi di libertà. Su una raccolta di parametri ed interazioni di dati, 'AIC' stima la qualità di ciascun modello, rispetto a ciascuno degli altri modelli. Pertanto, l'AIC fornisce un mezzo per la selezione del modello: minore è il valore ottenuto, migliore risulta essere la calibrazione delle interazioni preda-predatore all'interno del modello.

Il numero di quadrati rappresentanti lo specifico rapporto preda (in riga) e predatore (in colonna), così come visibile nella finestra del programma, è stato un parametro settato a priori e costante nelle calibrazioni svolte. Il valore deciso risulta corrispondere al 50% (ovvero numero di serie storiche utilizzate per il fitting), ed il numero totale di dati (data points) sono valori considerati dei vincoli per stabilire il numero di parametri da definire durante le calibrazioni svolte. A seconda del numero di serie storiche e del loro uso (una delle tre opzioni indicate in precedenza) il numero di gradi di libertà cambia (tabella 17).

Tabella 17: prospetto di sintesi dei parametri inseriti e dei valori ottenuti per poter scegliere quale calibrazione sia più attinente all'andamento reale avvenuto nei vent'anni di progetto. In giallo le calibrazioni più pertinenti per l'obiettivo del lavoro. La colonna 'n. di quadrati' indica in quanti rapporti preda-predatore si è attuato lo strumento sensibilità; in 'tipo di sensibilità' si evidenzia come si sia data priorità al rapporto totale preda-predatore; 'AIC' invece rappresenta il numero totale delle interazioni su cui viene effettuata l'analisi della vulnerabilità; SS: risultato del Sumo of Square; Akaike criteria: risultato della qualità del modello in base alle interazioni.

Calibrazione	type	n. quadrati	tipo di sensibilità	AIC	SS	Akaike criteria
1	tutti -1	16	by P/p	48	57.2707	58.0246
2	tutti 0	20	by P/p	208	122.485	-65.6541
3	tutti 1	20	by P/p	208	131.3720	-51.0852
4	Ittio/Lim -1, 0 il resto	19	by P/p	168	121.141	-11.8018
5	Ittio -1, 0 il resto	19	by P/p	188	99.4580	-77.1770
6	Lim -1, 0 il resto	19	by P/p	188	100.9450	-74.3868

Gli indicatori 'SS' e 'AIC' sono utili per guidare la scelta della migliore calibrazione, ma occorre tenere presente che si tratta di valori indicativi. Non basta quindi il minor valore di AIC e il minor SS per determinare che una calibrazione è più valida dell'altra, in quanto le impostazioni di calibrazione possono influire enormemente anche a parità di numero di data points e di serie storiche usate. Un altro fattore che occorre considerare è rappresentato dalla visualizzazione degli andamenti delle singole categorie negli anni di sviluppo delle dinamiche. Un altro strumento del programma rivela gli andamenti di ogni categoria a seconda della calibrazione e mostra anche i valori delle biomasse inseriti (figura 10 pag. 49).

Da un'analisi degli andamenti e tenendo conto dei valori della tabella 17, si è deciso di utilizzare due calibrazioni (figura 5, pag. 37) perché meglio corrispondenti a quanto osservato negli anni durante i censimenti IWC. 'Calibrazione 2' illustra tutte le categorie di uccelli sullo stesso piano e interagendo tra loro alla stessa maniera. 'Calibrazione 4', invece, illustra le due categorie più rappresentative della comunità indagata come forzate (vincolo '-1'), gli ittiofagi e i limicoli, con gli altri gruppi che subiscono questa imposizione nei loro rapporti preda/predatore (fig. 10 pag. 49)

2.6 Ecospace

La realtà è più complicata dei flussi di bilancio della biomassa in Ecopath, per quanto grande sia il numero di gruppi funzionali che includiamo nei nostri modelli. Gli ecosistemi reali hanno anche dinamiche molto più complesse di quelle rappresentate in Ecosim. La questione da considerare, quando si valuta il realismo del software di simulazione, è quale struttura consente una rappresentazione delle caratteristiche di base di un ecosistema, data una quantità necessariamente sempre limitata di osservazioni disponibili. In base a tale criterio, era ovvio che la principale carenza dell'approccio Ecopath/Ecosim fosse la sua assunzione di un comportamento spaziale omogeneo. Questo problema è stato risolto attraverso lo sviluppo di Ecospace (Walters, 1999), una versione dinamica e spaziale di Ecopath, che incorpora tutti gli elementi chiave di Ecosim (Christensen et al. ,2005).

Ecospace colloca dinamicamente la biomassa attraverso una griglia regolare (disegnata con un mouse dall'utente e tipicamente definita da celle di dimensione 250 x 250 m, figura 6), tenendo conto di:



Figura 6: mappa della laguna su cui Ecospace distribuirà le biomasse delle categorie di uccelli in base alla distribuzione e abbondanza delle prede e dal forcing (paragrafo 2.6.1).

- movimenti simmetrici da una cella alle sue quattro celle adiacenti, di velocità m , modificati dal fatto che una cella è definita come "habitat preferito" o meno;
- rischio di predazione e una riduzione del tasso di alimentazione nell'habitat non preferito;
- un livello di sforzo di pesca proporzionale, in ciascuna cella, alla redditività complessiva della pesca in quella cella, e la cui

distribuzione può anche essere resa sensibile ai costi (ad esempio, la navigazione verso determinate zone).

Di seguito si illustra come si sia adoperato Ecospace per arrivare alla spazializzazione trofica dei gruppi avifaunistici.

2.6.1 Forcing dato dalla morfologia e dalle caratteristiche degli uccelli

Tenendo sempre a mente di come un modello cerchi di replicare il più possibile la complessità della realtà, anche in questo frangente si è cercato di riprodurre il più fedelmente possibile il comportamento predatorio delle categorie di uccelli. Ogni specie di uccello ha una nicchia trofica, che può variare a seconda delle disponibilità di prede e dalla competizione intra- ed interspecifica. Questa parte della modellizzazione ha esplorato come varia la distribuzione spaziale in ragione delle caratteristiche trofiche delle categorie di uccelli, della disponibilità di prede e di competizione. Trattandosi di un bacino e di specie tipicamente costiere, ogni categoria tende ad occupare uno specifico intervallo batimetrico. Sono state definite le risposte funzionali di ogni gruppo al parametro profondità tramite uno strumento specifico (figura 14), in cui in ascissa si definisce la profondità e in ordinata la risposta in termini di preferenza (frequenza) specifica per ogni specie o gruppo.

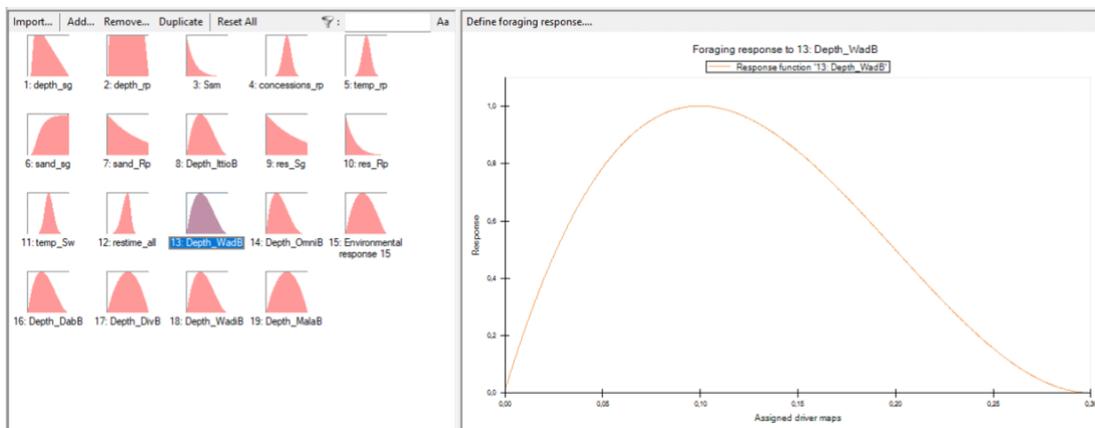


Figura 7: prospetto dello strumento delle forzanti per il 'habitat foraging'. A sinistra tutte le categorie a cui è stato assegnato una opportuna tipologia di risposta all'alimentazione, a destra l'esempio di come è stata definita la risposta dei limicoli all'attività di foraggiamento in cui in ascissa c'è la profondità a cui si possono spingere con profondità massima di -30 cm, e in ordinata i valori di risposta massima al foraggiamento in funzione della profondità, in questo frangente la massima risposta al foraggiamento per i limicoli è a -10 cm di profondità.

È stata determinata una risposta al foraggiamento per ogni categoria avifaunistica, un vincolo in cui si determina la massima profondità a cui può avvenire la predazione e la frequenza con cui essa avviene all'interno del range considerato. Parametro che, insieme alla disponibilità di prede, determina la spazializzazione delle biomasse all'interno dell'area del dominio del modulo Ecospace (tabella 18).

Tabella 18: prospetto illustrativo i parametri dimensionali delle forzanti per ogni categoria di uccelli. Per ogni categoria si illustra la profondità massima a cui può avvenire l'attività di foraggiamento e la profondità in cui si ha la frequenza massima di attività di foraggiamento.

Categoria	Profondità max.	Frequenza max. al foraggiamento
Ittiofagi	-6.00	-2.00 m
Limicoli	-0.30 m	-0.10 m
Filtratori	-0.50 m	-0.20 m
Onnivori	-0.40 m	-0.10 m
Sguazzatori	-1.00	-0.33 m
Nuotatori	-2.00 m	-1.00 m
Ittiofagi trampolieri	-0.50 m	-0.16 m
Malacofagi	-22.00 m	-12.00 m

Dati questi parametri, Ecospace restituisce delle mappe in formato .csv che vengono presentate graficamente utilizzando il software RStudio (figura 8).

Complessivamente, EwE restituisce dati di biomassa espressi in tonnellata su chilometro quadro cella per cella per anno. Ogni cella rappresenta un quadrato di duecentocinquanta metri di lato. Si sono ottenute quattro mappe per ogni categoria (8) per ogni rispettiva calibrazione utilizzata nel modulo Ecosim.

Figura 8: estratto di alcuni passaggi dello script per l'automatizzazione del calcolo della media dei valori per ogni singola cella, utilizzato per il processo di stampa delle mappe finali.

```
2_2_mappe_guids.R x 2_2_mappe_guids.R x
Source on Save Run Source
57 ymin=min(lat_range_mappe), ymax=max(lat_range_mappe), ncol=1
58 temp_raster_map<- test_mappe #duplico il raster vuoto serve dopo
59 anni_mappe<- list(c(2000:2004),
60                  c(2005:2009),
61                  c(2010:2014),
62                  c(2015:2019))
63 raster_list<-list()
64 for(anni in anni_mappe){
65   for (y in anni) {
66     temp_mappe<- prova_mappe %>%
67       dplyr::filter(year == y)
68     temp_a<- numeric()
69     for(i in 1:nrow(temp_mappe)){
70       temp_a<- c(temp_a,as.numeric(temp_mappe[i,3:ncol(temp_mappe)]))
71     }
72     temp_map<- test_mappe
73     values(temp_map) <- temp_a #assegno i valori al raster
74     temp_raster_map<- c(temp_raster_map,temp_map)
75     names(temp_raster_map)[length(names(temp_raster_map))<- y
76   }
77   raster_mean <- app(temp_raster_map,mean)
78   #metto tutto dentro una lista
79   raster_list<- c(raster_list, raster_mean)
80 }
81 #ora devo dire che estragga i valori limiti da ogni elemento della lista
82
83 values_list<-lapply(raster_list,values)
84
85 aa<-unlist(values_list)
86
33:2 (Top Level) R Script
```

2.7 Validazione: confronto tra il dataset iniziale IWC e i dati ottenuti dal modello

La validazione delle mappe ottenute è un passaggio fondamentale per avvalorare i risultati ottenuti, attraverso il confronto con i dati di partenza. Il raffronto permette di stabilire il grado di accuratezza del modello e di evidenziare quali dati o parametri sono eventualmente da modificare. Si noti che modelli a grande accuratezza sono richiesti nel momento in cui di debbano dare indicazioni operative di gestione, mentre un modello ad accuratezza minore, può comunque avere una importante utilità in termini di analisi ecologica.

Il confronto ha interessato sia tutti i gruppi di uccelli sia le singole zone umide di partenza in cui è suddivisa la laguna soggetta a marea secondo il progetto IWC. La validazione è stata effettuata con due diverse modalità perseguendo altrettante diverse finalità.

Il primo metodo si è basato sulla correlazione semplice (tra due variabili) tra i dati iniziali IWC (BM in asse delle ascisse) e i dati risultanti da Ecospace (BM in asse delle ordinate) per la sola area di studio.

Il secondo ha valutato, anche in questo caso, la correlazione semplice tra biomasse iniziali e finali per le quattro categorie di uccelli che maggiormente si osservano (anche quotidianamente) nella laguna soggetta a marea. Questo è stato fatto per evidenziare gli spostamenti tra le zone di riposo e di foraggiamento.

Entrambi i metodi sono stati applicati ai risultati ottenuti dalle due calibrazioni decise nel paragrafo 2.5.1, validazione che ha pertanto aiutato nella scelta successiva di portare avanti il lavoro di spazializzazione per le serie temporali fittate in calibrazione 2.

Inoltre, si è ritenuto necessario effettuare un test di significatività sui dati utilizzati con entrambi i metodi sopra descritti e nelle rispettive calibrazioni considerate. Il primo step ha riguardato la verifica della distribuzione normale dei dataset utilizzati tramite il test di Shapiro-Wilk all'interno della piattaforma RStudio. Le serie di dati utilizzate sono risultate non avere una distribuzione normale e pertanto si è pertanto utilizzato un test non parametrico. I dati a disposizione sono pochi e la scelta è ricaduta nel test a coppie per ranghi di Mann Whitney Wilcoxon. L'obiettivo è confutare l'ipotesi nulla attraverso il confronto dei valori ottenuti con il test con il valore soglia $\alpha \geq 0,05$. I risultati sono illustrati in tabella 21 a pag. 66.

2.8 Creazione della mappa di rilevanza trofica per l'avifauna svernante

Una volta terminata la restituzione delle mappe di distribuzione media ogni cinque anni di ogni categoria attraverso il software RStudio, si è continuato il lavoro a carattere ecologico andando ad elaborare una mappa di rilevanza trofica della laguna di Venezia soggetta a marea per la comunità svernante degli uccelli acquatici considerata. Uno degli obiettivi di questo passaggio è stato quello di cercare di stimare l'impatto trofico (Libralato et al., 2006) sui gruppi funzionali di un ecosistema dinamico e caratterizzato dai continui cambiamenti della biomassa della comunità ornitica.

Per arrivare a questo risultato si è preso spunto da alcuni lavori inerenti alla produzione primaria richiesta dalla rete trofica. Si ricorda che la produzione primaria è la quantità totale di materia organica (carbonio organico) prodotta attraverso la fotosintesi, per unità di area e per unità di tempo. Tale conversione è resa possibile dalla presenza di organismi foto sintetizzanti che occupano il livello trofico base. La produzione primaria indica una variazione di biomassa per unità di spazio (in questo caso km²) per unità di tempo (anno).

Per produzione primaria equivalente si intende quel processo per cui si arriva a calcolare produzione primaria non direttamente dai valori di biomassa della materia organica prodotta dalla fotosintesi ma dai valori di biomassa di altre categorie trofiche (in questo specifico caso di uccelli). Tale produzione equivalente è calcolata con una formula relativamente semplice (Pauly & Christensen, 1995; Libralato et al., 2008) che fa riferimento ai dati utilizzati nel modello ed è espressa in tonnellate di carbonio organico su chilometro quadro per anno. È stato utilizzato il valore medio standard dell'efficienza trofica (rapporto tra la produzione ad un livello e il livello inferiore) che è pari al 10%, e per convenzione alla produzione primaria è stato assegnato il livello trofico 1 (TL=1; Pauly & Christensen, 1995). In questa tesi, i risultati ottenuti sono espressi in equivalente produzione primaria necessaria a sostenere i predatori apicali che sono ottenuti considerando "a ritroso" il percorso dell'energia nella cascata trofica a partire dal livello trofico delle prede degli uccelli svernanti. Quindi nella formula riportata a pagina 45 di questo elaborato, si deve utilizzare l'inverso dell'efficienza trofica con all'esponente il livello trofico del predatore diminuito di due unità (TL-2) in quanto la cascata trofica parte dal livello delle prede (TL predatore-1) e deve arrivare al livello base (TL=1). Il tutto è espresso nel fattore 10^{TL-2} (vedasi formula a pagina 45).

Questa analisi permette di valutare quanto è "appetibile" in termini produzione primaria l'area di studio per la comunità di uccelli acquatici.

Mantenendosi coerenti con le dovute approssimazioni effettuate in EwE, anche in questo frangente si è deciso di lavorare a livello di categoria trofica e non

di lavorare a livello di singola specie, tenendo conto del valore di livello trofico rilasciato con i risultati ottenuti nel primo modulo di Ecopath (tabella 19).

Tabella 19: valori di livello trofico per ogni categoria dati dal bilanciamento effettuato in Ecopath. Valori più alti significano posizione più alta nella rete trofica

Categoria	Livello trofico
Sguazzatori	2.349573
Nuotatori	2.329525
Ittiofagi	4.217977
Malacofaci	3.37449
Onnivori	3.612165
Filtratori	3.524439
Limicoli	3.383763
Ittiofagi trampolieri	4.411192

Per restituire una mappa di rilevanza trofica che illustri le aree più appetibili per gli uccelli si è effettuata una conversione dei valori di biomassa ottenuti con la seguente formula:

$$\text{Produzione primaria equivalente} = \text{BM} * \text{QB (guilds)} * 10^{\text{TL (guilds)}-2}$$

BM= valore di ogni singola cella di ogni categoria

QB= valore del consumo di categoria (costante riferita alla gilda)

TL= livello trofico della categoria all'esponente (costante riferita alla gilda)

10= rappresenta l'inverso dell'efficienza trofica nel salto da un livello trofico all'altro (valore consueto 10%) (Pauly, 1995).

Tale formula si è andata ad applicare ad ogni singolo valore di BM risultanti da Ecospace. A parità di cella, il valore ottenuto (che si ricorda, sono sempre valori medi di ogni lustro considerato) per ogni gruppo di uccelli viene sommato tramite nuova automatizzazione in RStudio. Il risultato finale risulta composto da quattro mappe generali di distribuzione della produzione primaria equivalente, produzione necessaria al foraggiamento della comunità ornitica svernante nella laguna soggetta a marea nei vent'anni di analisi (vedasi capitolo 3.5 per i risultati).

3 RISULTATI

3.1 Ecopath

Una volta inseriti i dati richiesti dal primo modulo Ecopath, il programma restituisce una serie di altri parametri quali l'efficienza trofica e il rapporto tra produttività e consumo. Il programma segnala che il bilanciamento trofico è plausibile marcando in blu i valori ottenuti di efficienza ecotrofica e di rapporto produzione/consumo per anno in come mostrato in tabella 20. In figura 9 pag. 47 è riportato il diagramma di flusso della rete trofica con i gruppi posizionati in funzione del livello trofico e i collegamenti che rappresentano il rapporto preda-predatore. Il grafico rappresenta il bilanciamento di massa tra tutti i componenti considerati all'interno del modello. Il programma inserisce le varie categoria nei differenti livelli trofici a seconda della matrice dieta e sempre a seconda della frazione di dieta che viene consumata dal predatore crea il collegamento più o meno forte. La quantità di biomassa invece è rappresentata dalla grandezza del cerchio grigio.

Tabella 20: prospetto finale complessivo con i parametri inseriti (in nero) durante lo svolgimento dell'elaborato e i valori in blu restituiti dal programma che confermano l'equilibrio della rete trofica. In colonna da sinistra a destra: 'group name': le 41 sigle delle categorie trofiche considerate; 'trophic level': il livello trofico di appartenenza di ogni categoria creato in automatica dal programma; 'Hab area': valore di default; 'Bm in habitat area' e 'Bm': i valori di biomassa su superficie unitaria delle categorie; 'Total mortality': valore creato di default dal programma; 'Pb': produzione di biomassa, vedere paragrafo 2.4.1; 'Qb': consumo di biomassa, vedere paragrafo 2.4.1; 'Ecotrophic efficiency': è la frazione della produzione che viene utilizzata dalla rete trofica per l'accumulo, la migrazione o l'esportazione di biomassa; 'PQ': esprime il rapporto tra produzione (P) e consumo (Q).

	Group name	Trophic level	Hab area (proportion)	Biomass in habitat area (tkm ²)	Biomass (tkm ²)	Total mortality (/year)	Production / biomass (/year)	Consumption / biomass (/year)	Ecotrophic Efficiency	Production / consumption (/year)	Biomass accumulation (tkm ²)	BA rate (/year)
1	Sg	1,00000	1,00000	818,385	818,385		3,28903		0,33252			
2	Sw	1,00000	1,00000	76,3303	76,3303		3,51691		0,36128			
3	Ep	1,00000	1,00000	584,568	584,568		87,6000		0,33618			
4	MiphyB	1,00000	1,00000	192,464	192,464		87,6000		0,29090			
5	PhyP	1,00000	1,00000	1,05373	1,05373		525,600		0,30565			
6	Bactpl	2,00000	1,00000	4,00000	4,00000		140,000	244,000	0,81628	0,57377		
7	MiZpl	2,94000	1,00000	0,43506	0,43506		550,500	1114,45	0,03725	0,49397		
8	MesoZpl	2,19400	1,00000	0,19912	0,19912		36,0000	92,1423	0,81596	0,39070		
9	MaZpl	3,00286	1,00000	0,0080000	0,0080000		15,0000	50,5000	0,09846	0,29703		
10	Mleidy	3,20507	1,00000	0,0000100000	0,0000100000		103,800	306,290	0,00000	0,33889		
11	MeioB	2,14417	1,00000	32,5736	32,5736		16,8104	68,5204	0,70039	0,24533		
12	MaBd	2,36659	1,00000	5,79870	5,79870		3,82458	26,7691	0,74124	0,14287		
13	MaBh	2,00000	1,00000	6,41380	6,41380		7,24942	34,7537	0,17746	0,20859		
14	MaBf	2,33676	1,00000	0,69720	0,69720		4,76652	15,9060	0,97244	0,29967		
∨	RP											
15	Rpj	2,00200	1,00000	2,00313	2,00313	4,90000		29,3264	0,19956	0,16708		
16	Rpa	2,00949	1,00000	11,1700	11,1700	2,75000		10,1400	0,28652	0,27120		
17	MaBmf	2,42858	1,00000	0,83446	0,83446		9,22450	54,4584	0,95597	0,16939		
18	MaBc	3,29067	1,00000	1,63470	1,63470		4,96272	16,8390	0,63272	0,29472		
19	Cc shrimp	2,67376	1,00000	0,040700	0,040700		2,32000	14,3389	0,66622	0,16180		
∨	MU											
20	Muj	3,62056	1,00000	0,57066	0,57066	2,56324		15,7675	0,08459	0,16257		
21	Mua	2,39417	1,00000	8,81700	8,81700	0,97338		4,64000	0,17789	0,20978		
22	Abo	3,28521	1,00000	0,55280	0,55280		2,05236	12,3973	0,86833	0,16555		
23	Syn	3,40141	1,00000	0,11935	0,11935		1,49000	7,15252	0,97718	0,20832		
24	Gos	3,22220	1,00000	0,13800	0,13800		1,99999	8,62075	0,99585	0,23200		
25	Zoj	3,72829	1,00000	0,15169	0,15169		1,68431	7,57971	0,99790	0,22221		
26	Zoa	3,60695	1,00000	0,51180	0,51180		1,73360	7,42279	0,57540	0,23355		
27	NkD	3,59571	1,00000	0,56420	0,56420		1,33696	6,26371	0,83740	0,21345		
∨	SA											
28	Saj	3,43486	1,00000	0,036646	0,036646	1,98522		12,2019	0,98433	0,16270		
29	Saa	3,76941	1,00000	0,45300	0,45300	1,10651		4,17800	0,07089	0,26484		
∨	DL											
30	Dij	3,60576	1,00000	0,077383	0,077383	1,46891		9,42493	0,07735	0,15585		
31	Dla	3,45415	1,00000	0,69000	0,69000	0,75562		3,47000	0,90002	0,21776		
32	IttioB	4,21798	1,00000	0,013230	0,013230		0,15390	13,5392	0,00000	0,01137		
33	Wab	3,38376	1,00000	0,0056010	0,0056010		0,58573	25,1799	0,00000	0,02326		
34	OmnB	3,61216	1,00000	0,039023	0,039023		0,37346	13,3252	0,00000	0,02803		
35	DabB	2,34957	1,00000	0,10595	0,10595		0,56506	12,7671	0,00000	0,04426		
36	DivB	2,32952	1,00000	0,047531	0,047531		0,60189	13,3425	0,00000	0,04511		
37	ScyB	3,52444	1,00000	0,0032270	0,0032270		0,31443	12,4964	0,00000	0,02516		
38	WadiB	4,41119	1,00000	0,0049190	0,0049190		0,27915	13,6030	0,00000	0,02052		
39	MalacB	3,37449	1,00000	0,00032600	0,00032600		0,56829	12,6849	0,00000	0,04480		
40	OMiv	1,00000	1,00000	53,5111	53,5111				0,13999			
41	OMS	1,00000	1,00000	18133,3	18133,3				0,06947			

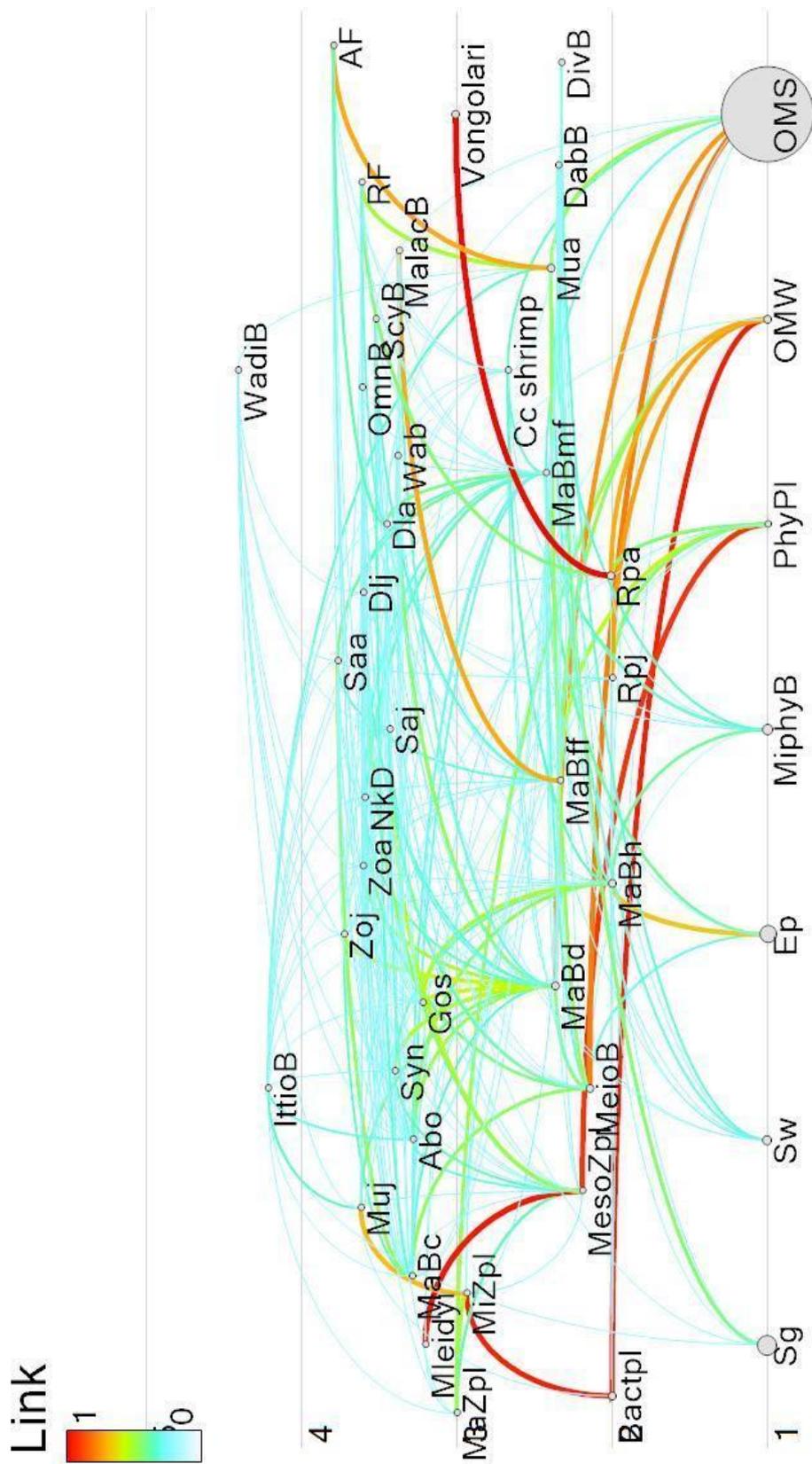


Figura 9: diagramma complessivo della rete trofica bilanciata creata con Ecopath. Tutti e quarantuno i gruppi sono posizionati nel rispettivo livello trofico e collegati tra loro. Il colore del collegamento varia a seconda del rapporto diretto o meno tra un gruppo e l'altro.

3.2 Ecosim

Con il secondo modulo Ecosim si arriva a sviluppare il bilanciamento trofico su scala temporale, basandosi sul continuo aggiustamento della sensibilità data dal rapporto preda-predatore. In figura 10 pag.49 sono rappresentate gli andamenti temporali delle biomasse delle otto categorie trofiche degli uccelli acquatici, rispettivamente sopra per la 'calibrazione 2' dove tutte le serie temporali sono state calibrate con la scelta della biomassa relativa, e sotto per la 'calibrazione 4' in cui soltanto le serie temporali riferite agli ittiofagi e ai limicoli hanno una calibrazione della biomassa assoluta.

Gli andamenti delle biomasse nelle due calibrazioni sono stati inseriti uno sopra l'altro per una miglior comparazione dell'andamento. In calibrazione 2 dove le biomasse sono considerate relative (BM= 0, vedasi paragrafo 2.5.1, tabelle 14 a pag. 34, 16 pag. 35, 17 pag. 38), tutte le categorie vengono considerate sullo stesso piano e pertanto l'andamento è il risultato dei reciproci rapporti preda-predatore. Invece, in calibrazione 4, dove l'andamento temporale degli ittiofagi e dei limicoli risulta forzato dalla biomassa assoluta (BM= -1, vedasi paragrafo 2.5.1, tabelle 14 a pag. 34, 16 pag. 35, 17 pag. 38). Il modello, per questa calibrazione, restituisce un andamento forzato delle due categorie, pertanto, uguale ai dati di biomassa inseriti con le serie temporali, e gli altri andamenti come risultato di questa forzatura in quanto subiscono la minor disponibilità di prede in proporzione alla quota parte di esse già sottratta prioristicamente dagli andamenti delle due categorie forzate.

La differenza degli andamenti è visibile per i due gruppi in cui si modifica il 'type', ittiofagi e limicoli. Tra le altre categorie, a parità di 'type', soltanto i filtratori (ScyB) mostrano una differenza nell'andamento tra le due calibrazioni. Per i restanti gruppi avifaunistici le differenze si possono ritenere trascurabili ai fini della spazializzazione della biomassa.

Per un'opportuna visione della figura 10, si riporta il significato delle sigle adoperate per l'identificazione delle categorie trofiche:

- IttioB: ittiofagi
- WadB: limicoli
- OmnB: onnivori
- DabB: sguazzatori
- DivB: nuotatori
- ScyB: filtratori
- WadiB: ittiofagi trampolieri
- MalacB: malacofagi

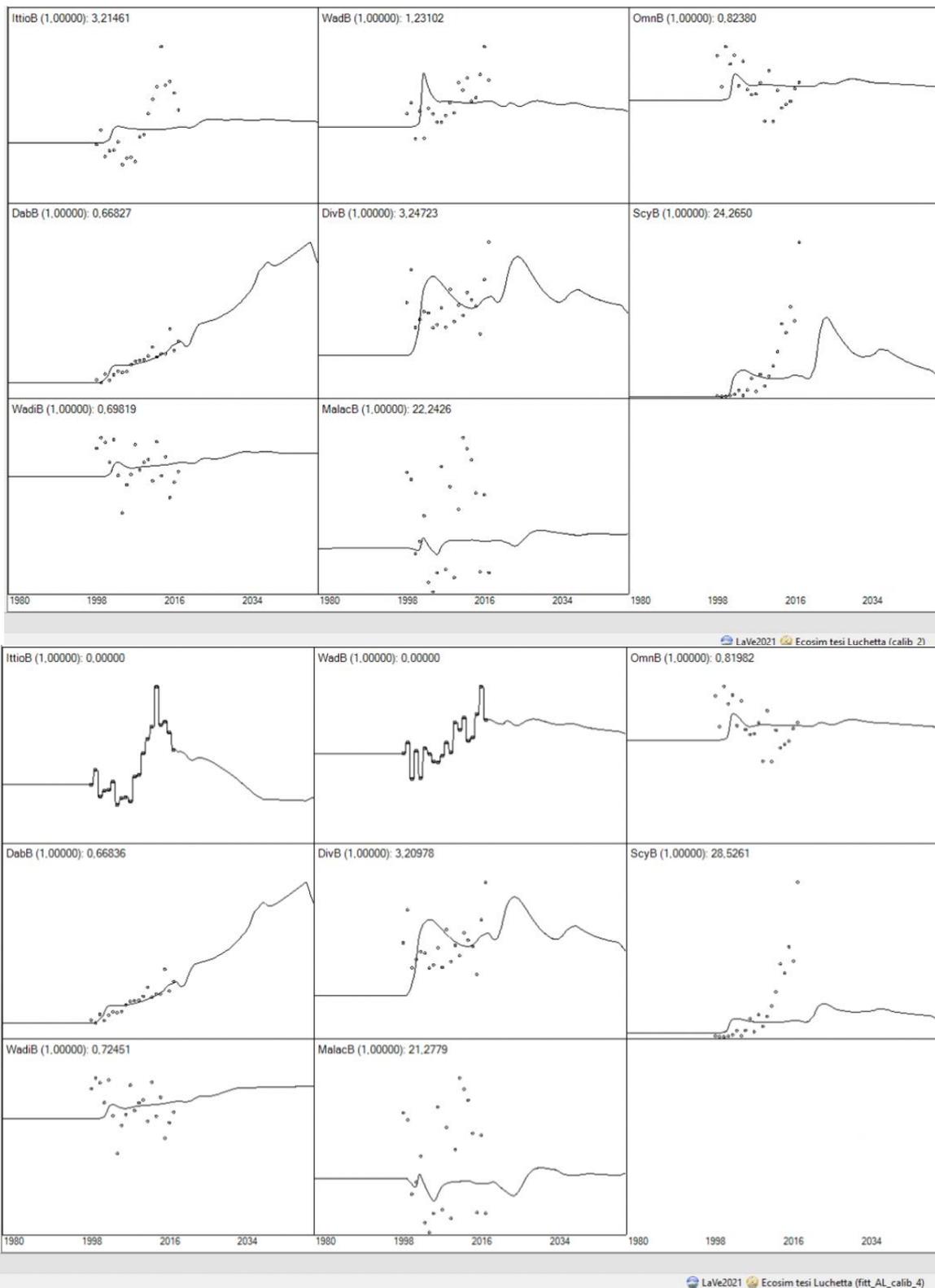


Figura 10: sintesi dell'andamento delle biomasse degli uccelli in due calibrazioni diverse dopo il fittaggio dei dati. Calibrazione 2 sopra, calibrazione 4 sotto. Si noti nella seconda immagine come nelle prime due categorie essendo state forzate ($type=-1$) l'andamento di Ecosim segue le BM inserite. Questa forzatura ha ripercussioni sui rapporti preda predatore delle altre categorie. Tra le due calibrazioni gli andamenti nei vari gruppi si discostano leggermente con differenze minime. Il gruppo il cui andamento si discosta maggiormente è quello dei filtratori (scythers).

3.3 Ecospace

L'ultimo modulo del programma EwE ha interessato la spazializzazione potenziale dei vari gruppi di uccelli nell'area di studio, visualizzata attraverso l'uso del software RStudio. Di seguito si illustrano le mappe di distribuzione per ogni categoria avifaunistica considerata.

3.3.1 Ittiofagi

Sono un gruppo che si distribuisce in modo omogeneo in tutta l'area con una densità non elevata e molto distribuita, con zone tendenzialmente a minori densità lungo la gronda lagunare e in laguna nord.

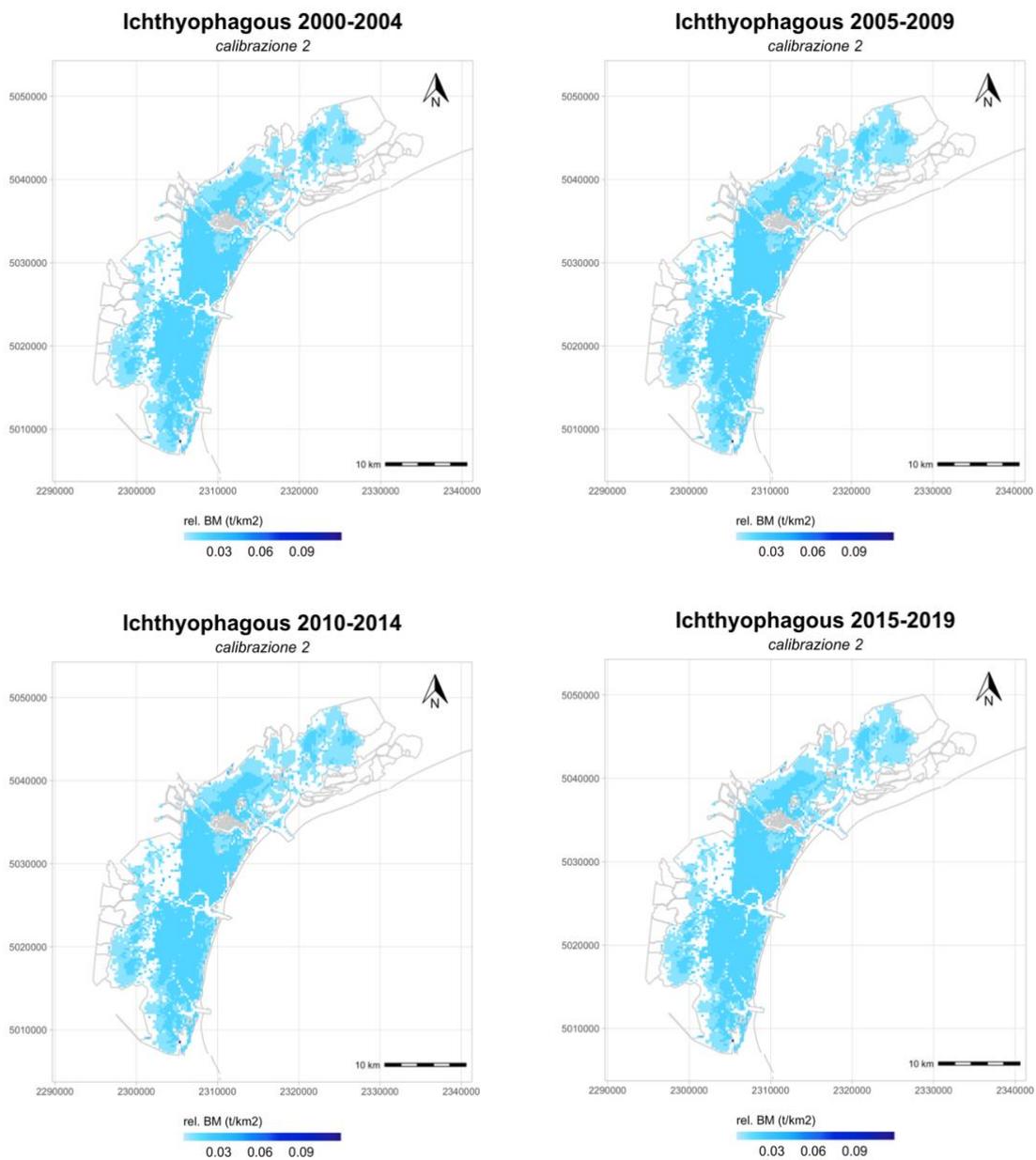


Figura 11: distribuzione spaziale potenziale degli ittiofagi.

3.3.2 Limicoli

I limicoli sono un gruppo caratterizzato da una biomassa media tra le più basse tra le categorie considerate in questo lavoro. Richiedono particolari condizioni per l'alimentazione dipendendo fortemente dall'andamento delle maree. Pertanto, si nota una distribuzione molto concentrata a carattere puntiforme con prevalenza in prossimità delle zone barenali con una leggera preferenza per la laguna nord dove si distribuiscono con le più alte densità.

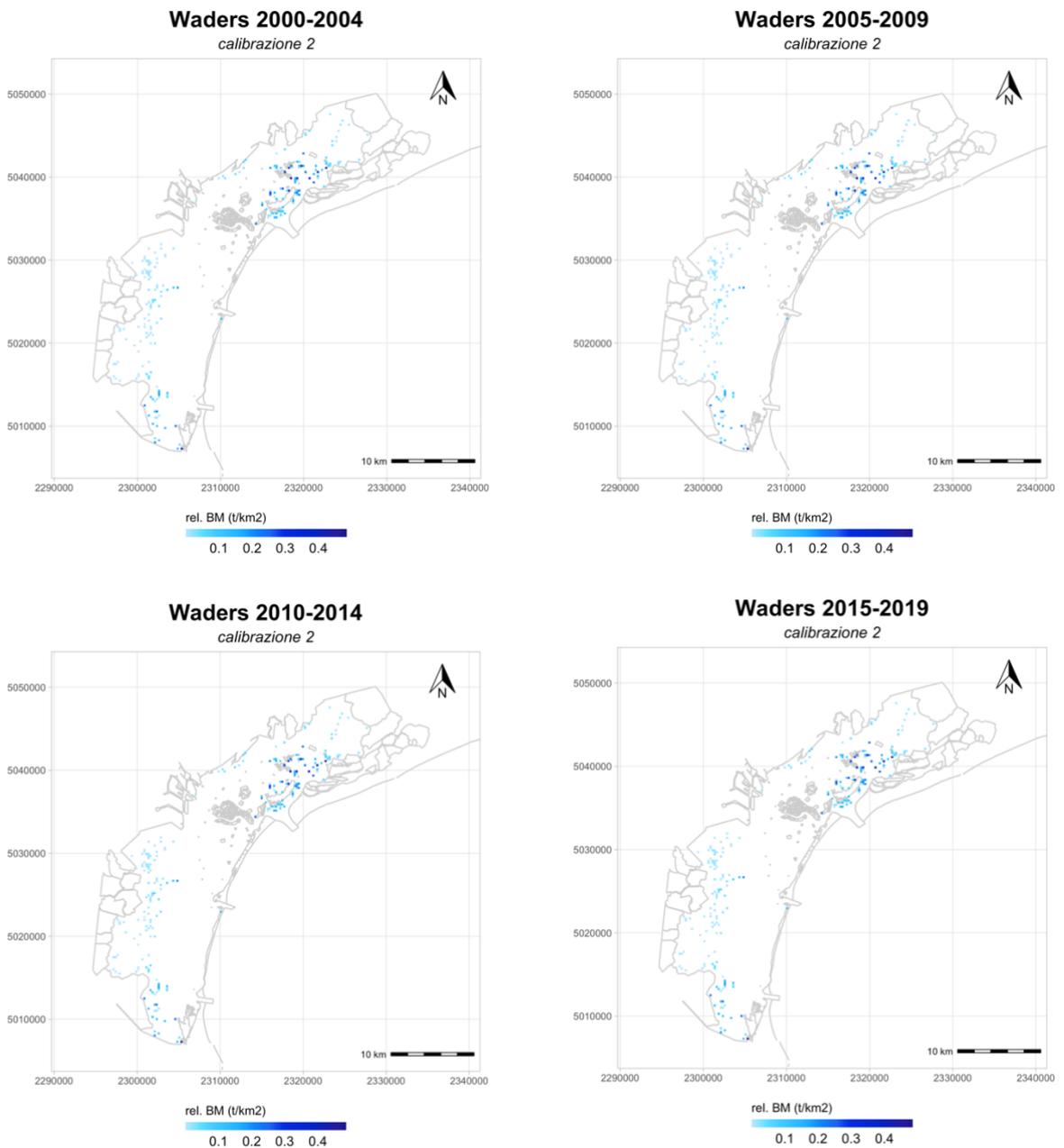


Figura 12: distribuzione spaziale potenziale dei limicoli.

3.3.3 Onnivori

Gli onnivori, rappresentati quasi esclusivamente dai gabbiani, hanno una distribuzione trofica continua nelle loro zone appetibili (ricavate tramite la forzante inserita in Ecospace) e mostrano picchi di elevata densità in pochi e sparsi quadranti della laguna. Rispetto ad altri gruppi, l'alta biomassa che solitamente si vede in laguna ha la tendenza a spostarsi per alimentazione anche in zone al di fuori dell'area di studio (in particolare in terraferma).

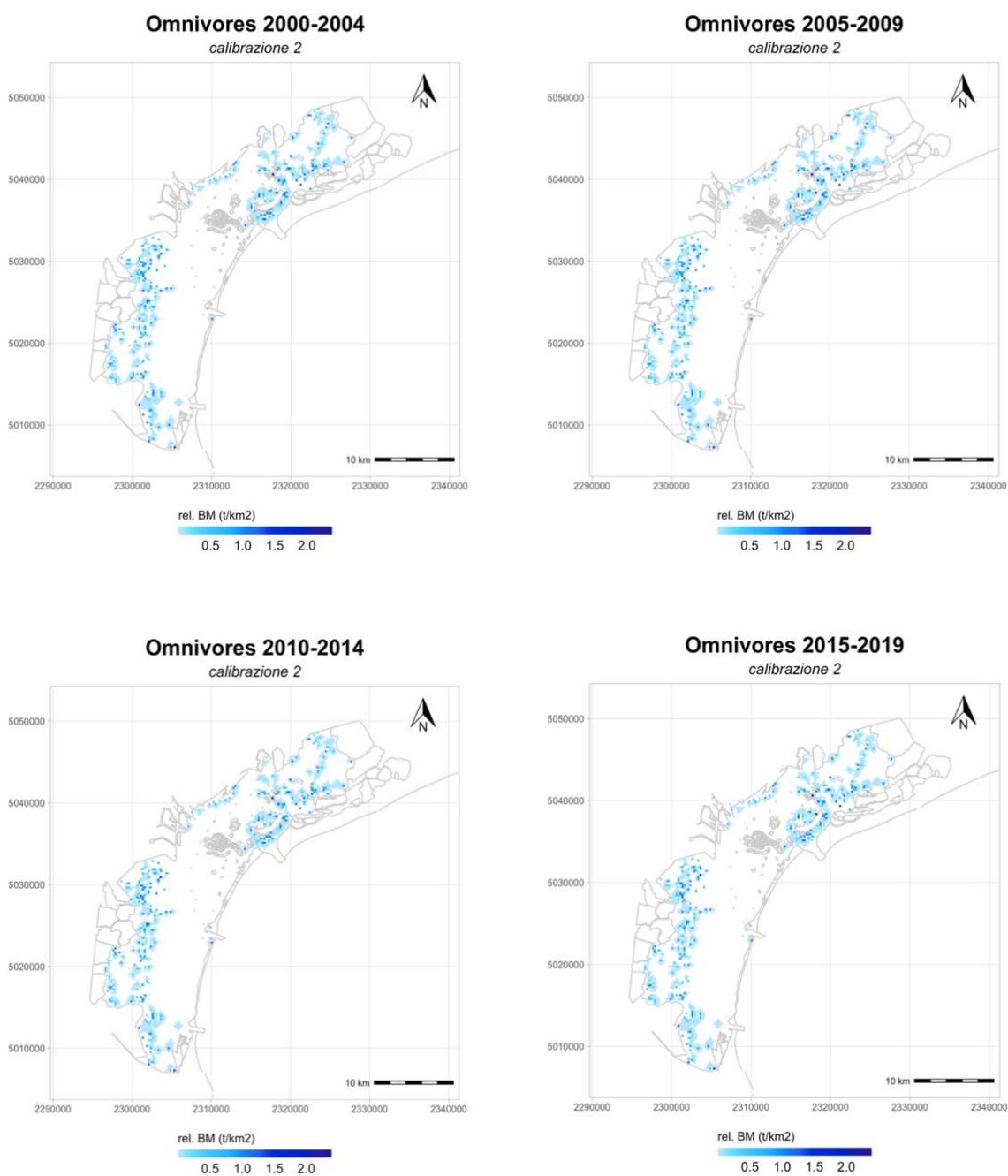


Figura 13: distribuzione spaziale potenziale degli onnivori.

3.3.4 Filtratori

L'aumento della biomassa visibile nell'andamento temporale di Ecosim (fig. 10, parte alta, riquadro ScyB), data dall'arrivo di una sempre più numerosa popolazione svernante di fenicotteri (*P. roseus*) e volpoche (*T. tadorna*) in queste mappe determina soltanto un alto valore di biomassa per unità di superficie. Come per i limicoli, anche i filtratori hanno una distribuzione sparsa con picchi di densità elevata concentrati in poche aree appetibili della laguna nord.

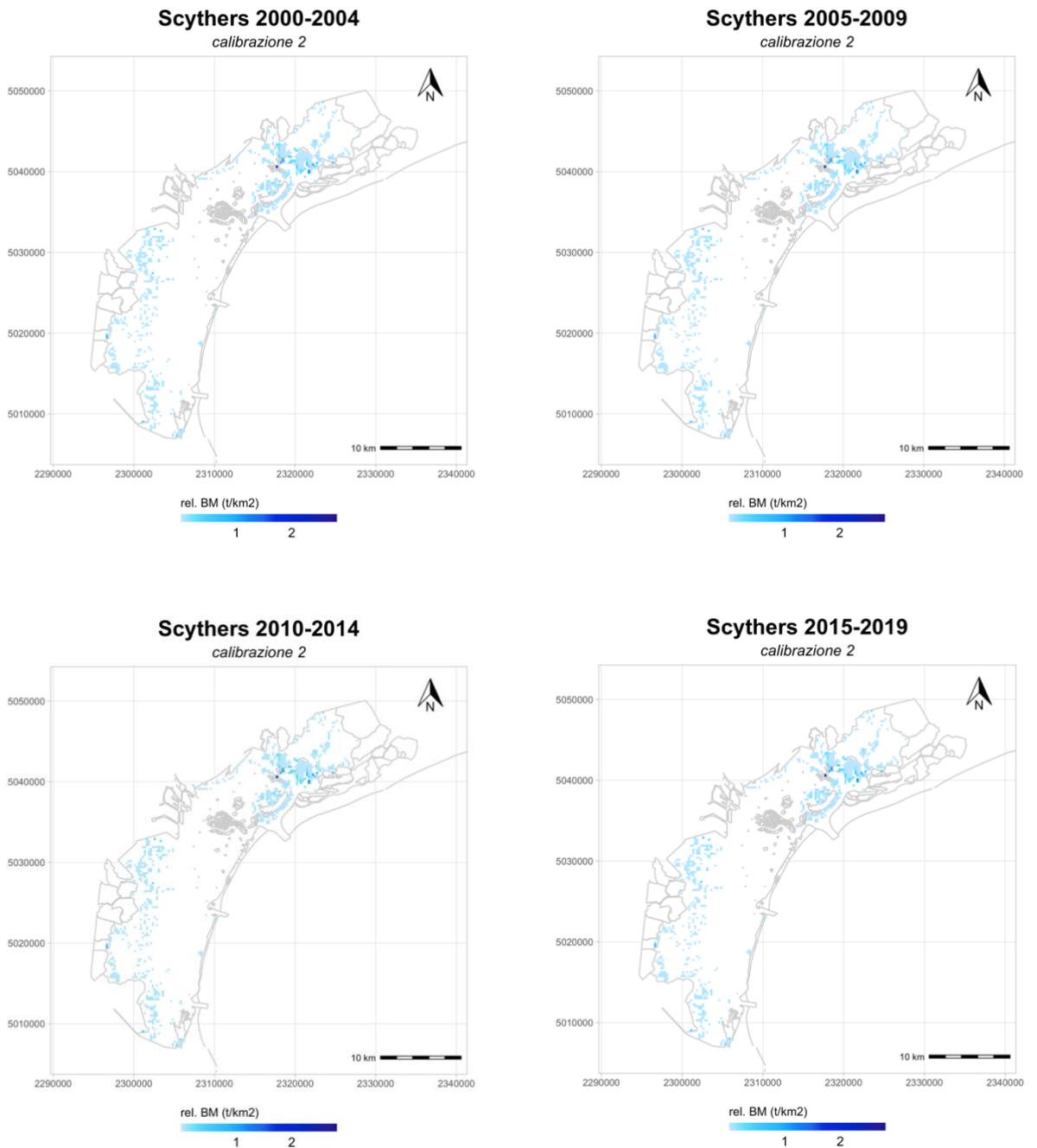
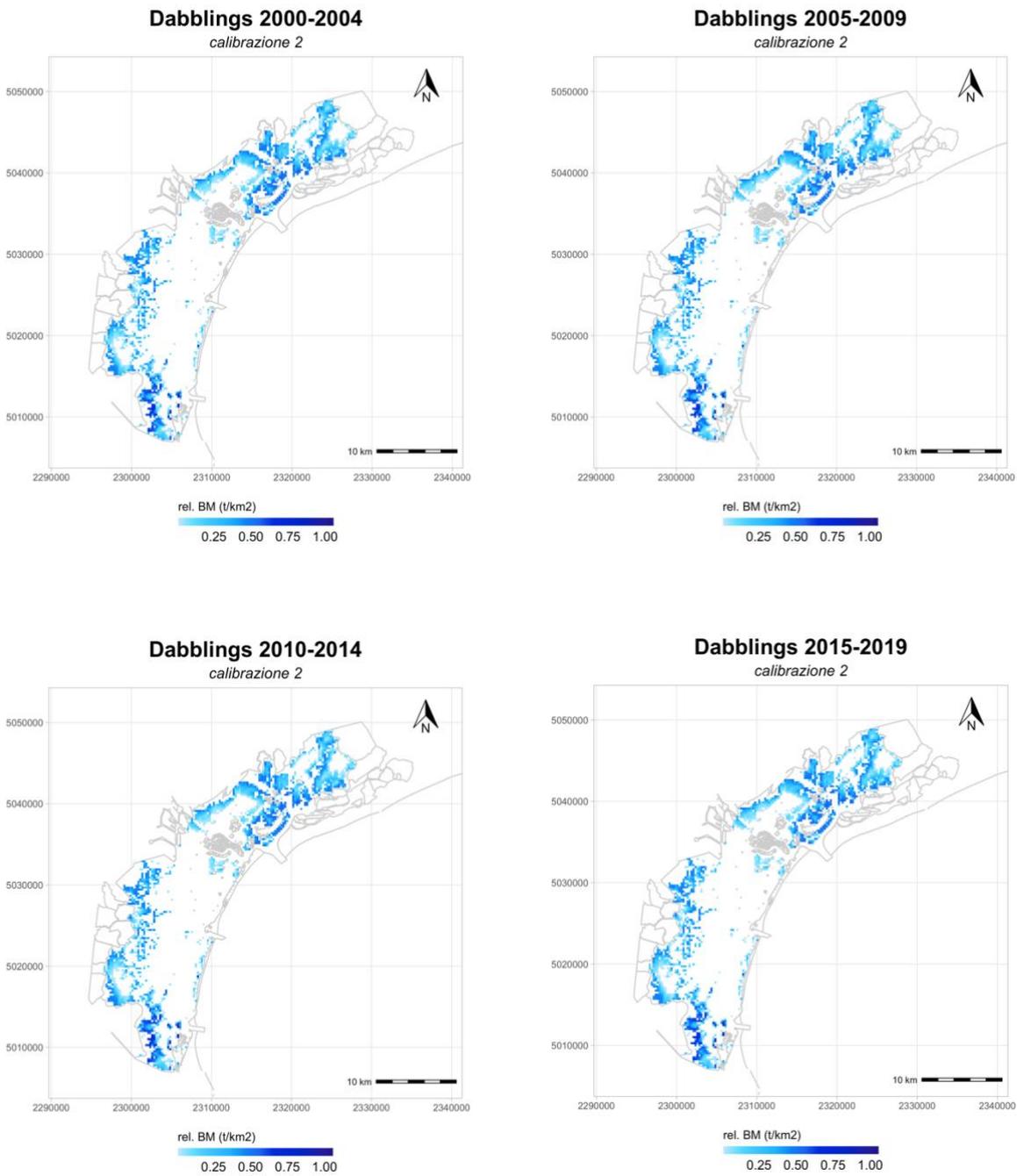


Figura 14: distribuzione spaziale potenziale dei filtratori. Si noti come picchi di concentrazione si hanno in pochissimi quadranti esclusivamente in laguna nord di Venezia.

3.3.5 Sguazzatori

Gli sguazzatori, comunemente detti anche anatre di superficie, si distribuiscono in modo uniforme e continuativo in tutte quelle porzioni di laguna antistanti le barene e i confini con valli e isole, aree idonee al loro foraggiamento. Il gruppo è caratterizzato da una distribuzione con zone di particolare densità attorno alle isole e sulla gronda lagunare dell'intera superficie lagunare.

F



igura 15: distribuzione spaziale potenziale delle anatre di superficie.

3.3.6 Nuotatori

Strettamente imparentate al gruppo precedente e affiliate per la tipologia di dieta (polifagi), le anatre tuffatrici (altro nome comune di questo gruppo) si sono adattate a cibarsi ad un diverso range di profondità rispetto alle anatre di superficie. Si distribuiscono in modo omogeneo occupando quasi tutta l'area di studio e con una densità quasi costante salvo alcune aree evidentemente meno appetibili nella zona centrale della laguna.

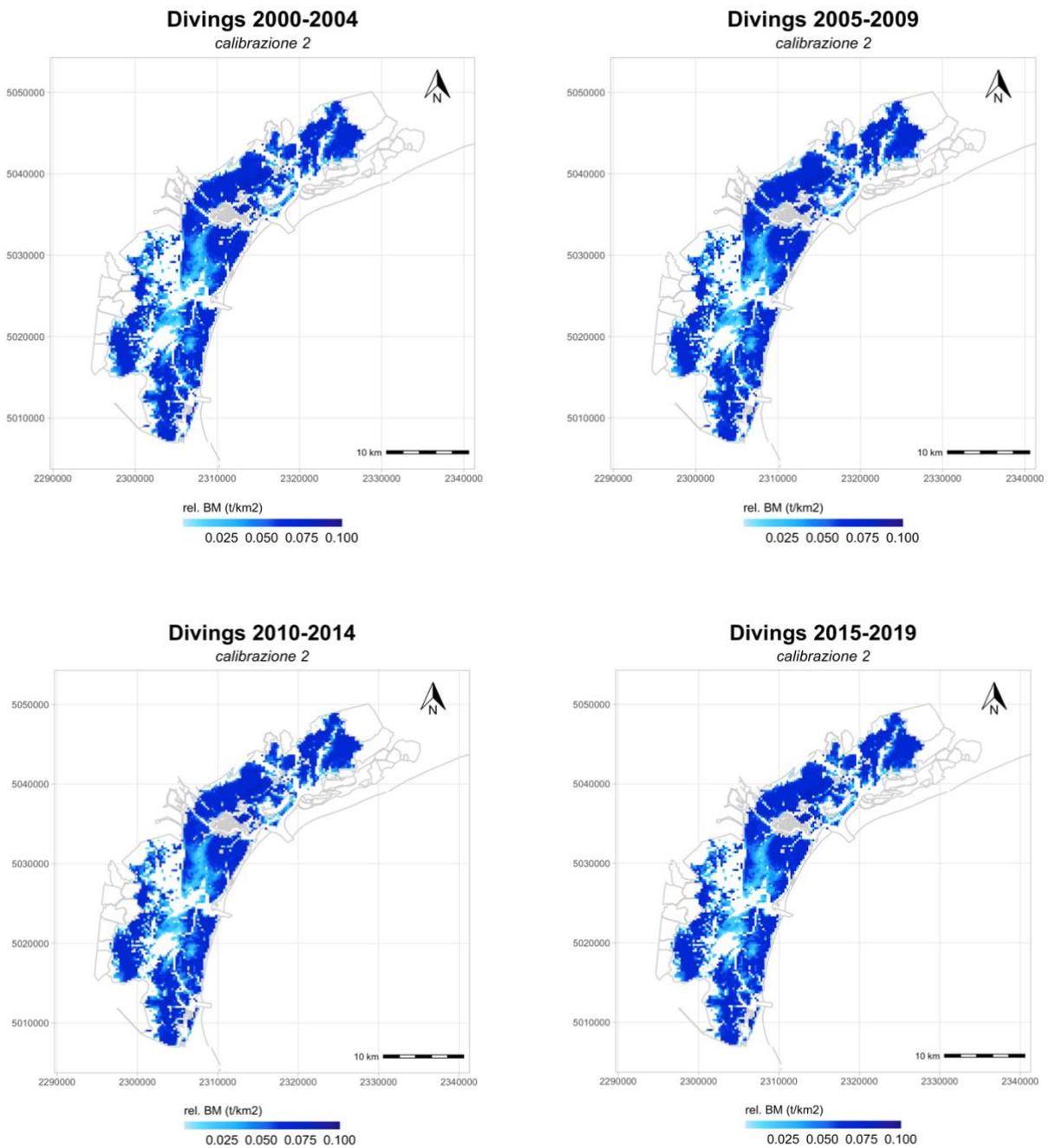


Figura 16: distribuzione nei vent'anni dei nuotatori

3.3.7 Ittiofagi trampolieri

Tale categoria comprende essenzialmente gli aironi. È connotata da una distribuzione molto rarefatta e con poca densità di biomassa. Lo spettro della dieta molto varia che contempla anche gruppi non considerati nel lavoro quali micromammiferi, anfibi e rettili, porta inevitabilmente ad una diminuzione della consistenza del popolamento che potenzialmente può gravitare nell'area oggetto di studio.

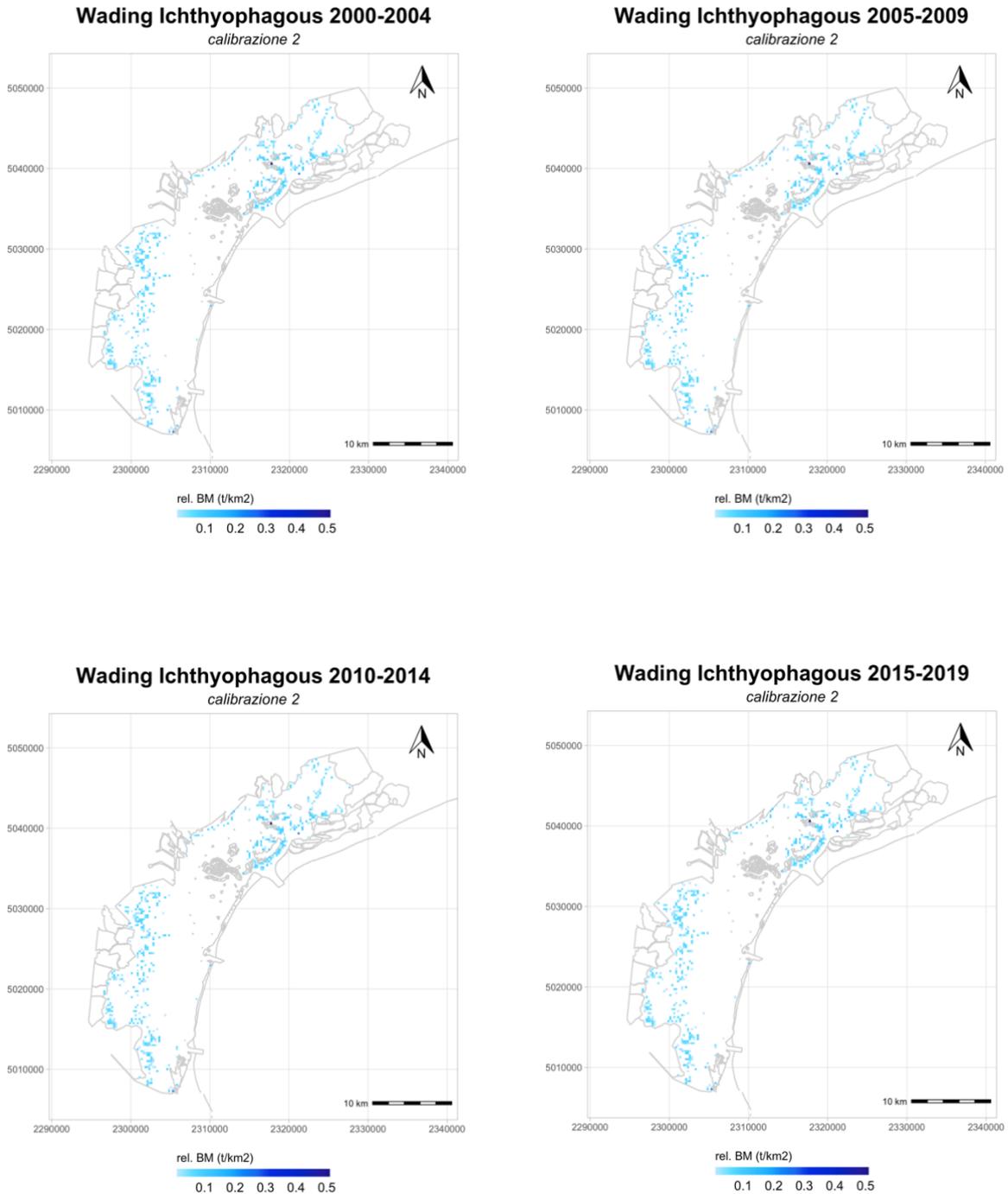


Figura 17: distribuzione spaziale degli ittiofagi trampolieri in laguna soggetta a marea.

3.3.8 Malacofagi

Anatre marine e non troppo comuni, specializzate nell'alimentarsi di molluschi bivalvi, si distribuiscono in modo uniforme su tutta l'area di studio ma con densità veramente basse, prediligendo le massime profondità dei canali navigabili.

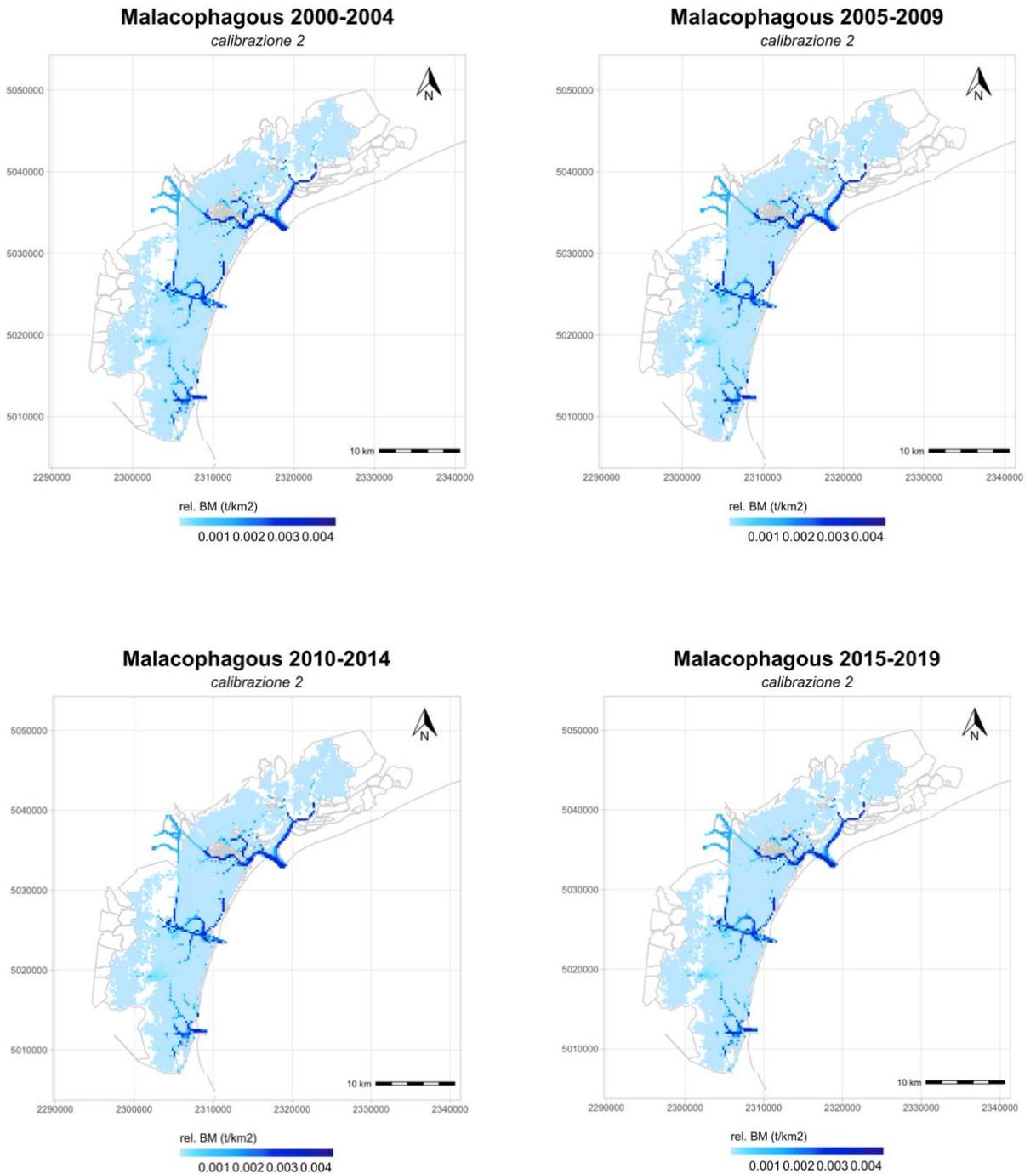


Figura 18: distribuzione spaziale potenziale dei malacofagi nella laguna soggetta a marea

3.4 Grafici di validazione

In questo paragrafo si illustrano i risultati della validazione ottenuta confrontando i dati di biomassa estrapolati dal modulo Ecospace con i dati di biomassa iniziali ricavati dal progetto IWC. Tale processo riguarda tutte e otto le categorie trofiche inerenti agli uccelli acquatici e considera i dati di Ecospace derivanti dalle due calibrazioni di Ecosim che si è deciso di elaborare nel modulo Ecosim (paragrafo 2.4.1). La validazione è stata sviluppata attraverso due diversi approcci: il primo ha riguardato la correlazione dei dati di biomassa per i primi cinque anni delle serie temporali corredato anche dall'errore standard per entrambe le variabili considerate. Il secondo approccio, invece, ha riguardato solo le categorie più rappresentative della laguna di Venezia e ha indagato quanto tali gruppi si spostino o meno all'interno delle singole zone (ai sensi della classificazione IWC) tra il periodo di riposo (monitoraggio IWC) e il periodo di foraggiamento (dati di Ecospace).

Nel primo approccio, le correlazioni possono essere sia positive che negative. La correlazione positiva significa che tanto vedo in laguna di Venezia tanto il programma mi ha restituito in termini di biomassa. Invece, la correlazione negativa indica che esiste una differenza tra le quantità di biomasse osservate durante il progetto IWC e quanto restituito dal programma. Questo avviene perché il modello non considera ed elabora la biomassa presente all'esterno dell'area di dominio del programma ma che viene riscontrata invece durante il progetto IWC. Questa dinamica, seppur negativa, è sinonimo di alta mobilità da parte di alcune categorie trofiche ed è rappresentativa del contesto invernale della laguna di Venezia.

Le correlazioni delle due calibrazioni sono accompagnate dall'errore standard, rappresentato graficamente dai 'baffi' (whiskers).

Calibrazione 2

La calibrazione 2 in Ecosim, prevede che il grado di vincolo nei rapporti tra i gruppi è uguale a '0'. Pertanto, dal software la biomassa riferita ai gruppi è considerata relativa. Tutte e otto le categorie di uccelli hanno questo parametro e vengono considerati sullo stesso piano nell'andamento temporale e nel rapporto preda-predatore.

Calibrazione 4

La calibrazione 4, invece, prevede che il grado di vincolo nei rapporti tra i gruppi è uguale a '-1' per gli ittiofagi e i limicoli e per i restanti gruppi rimanga '0'. Sui due gruppi più importanti della laguna soggetta a marea, pertanto, ho imposto una biomassa forzata che significa che il software segue l'andamento temporale di quei due gruppi. Di conseguenza, le altre categorie e i loro rapporti preda-

predatore si adeguano a questa imposizione. Una differenza minima di approccio iniziale all'elaborazione ma con ripercussioni e risvolti significativi in fase di risultati.

La validazione è risultata significativa in quanto il p-value ottenuto con il test di Mann Whitney Wilcoxon è inferiore al valore *alfa* (tabella 21 pag. 66).

Calibrazione 2

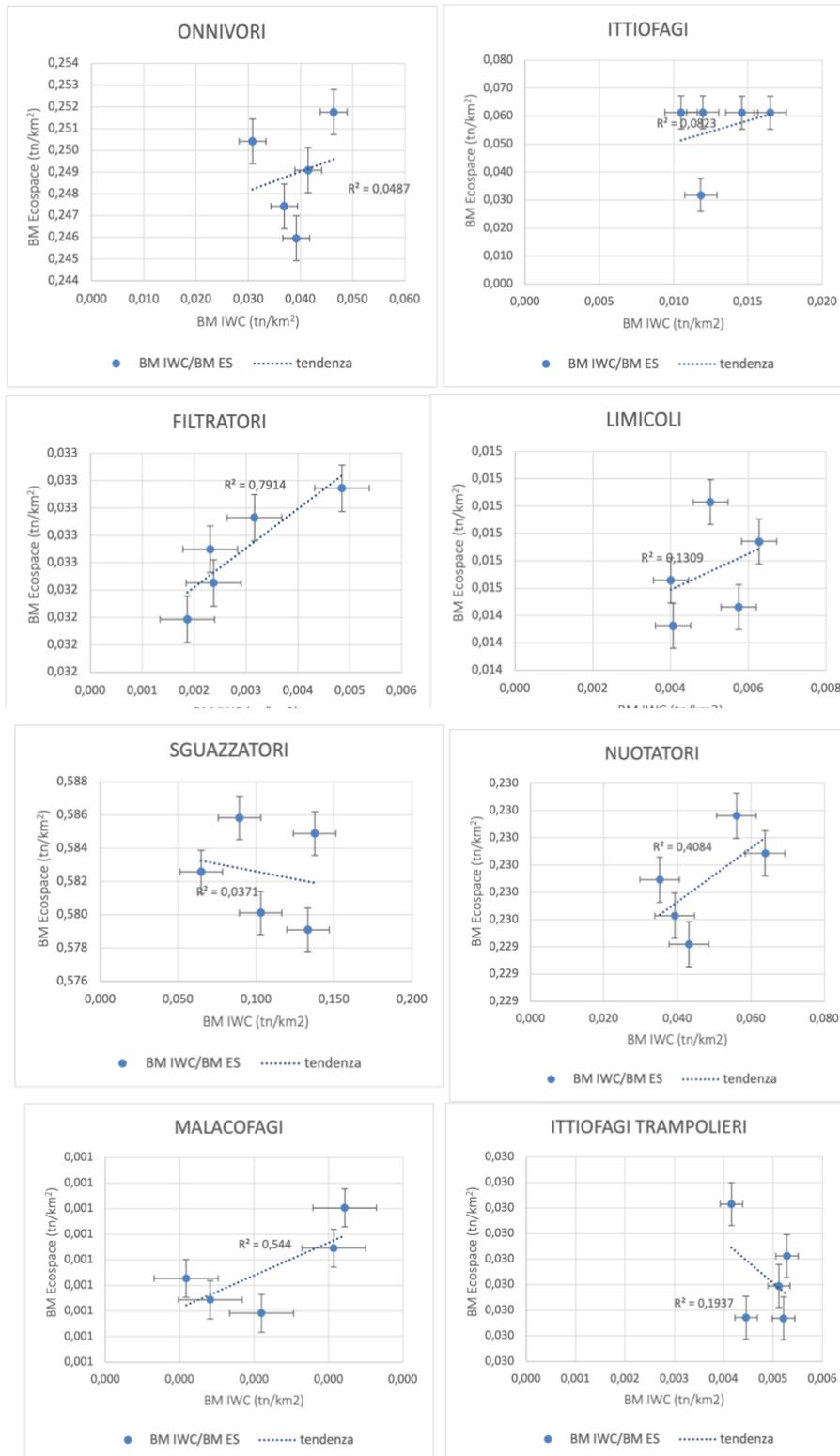


Figura 19: grafici che illustrano il rapporto tra le biomasse iniziali (IWC, in ascissa) e quelle finali (Ecospace, in ordinata) delle prime quattro categorie trofiche di uccelli nei primi cinque anni di analisi. E' presente l'errore standard, la linea di tendenza e 'R²' misura l'affidabilità della linea di tendenza: più R² è vicino a 1, meglio la linea di tendenza è adatta ai dati.

Calibrazione 4

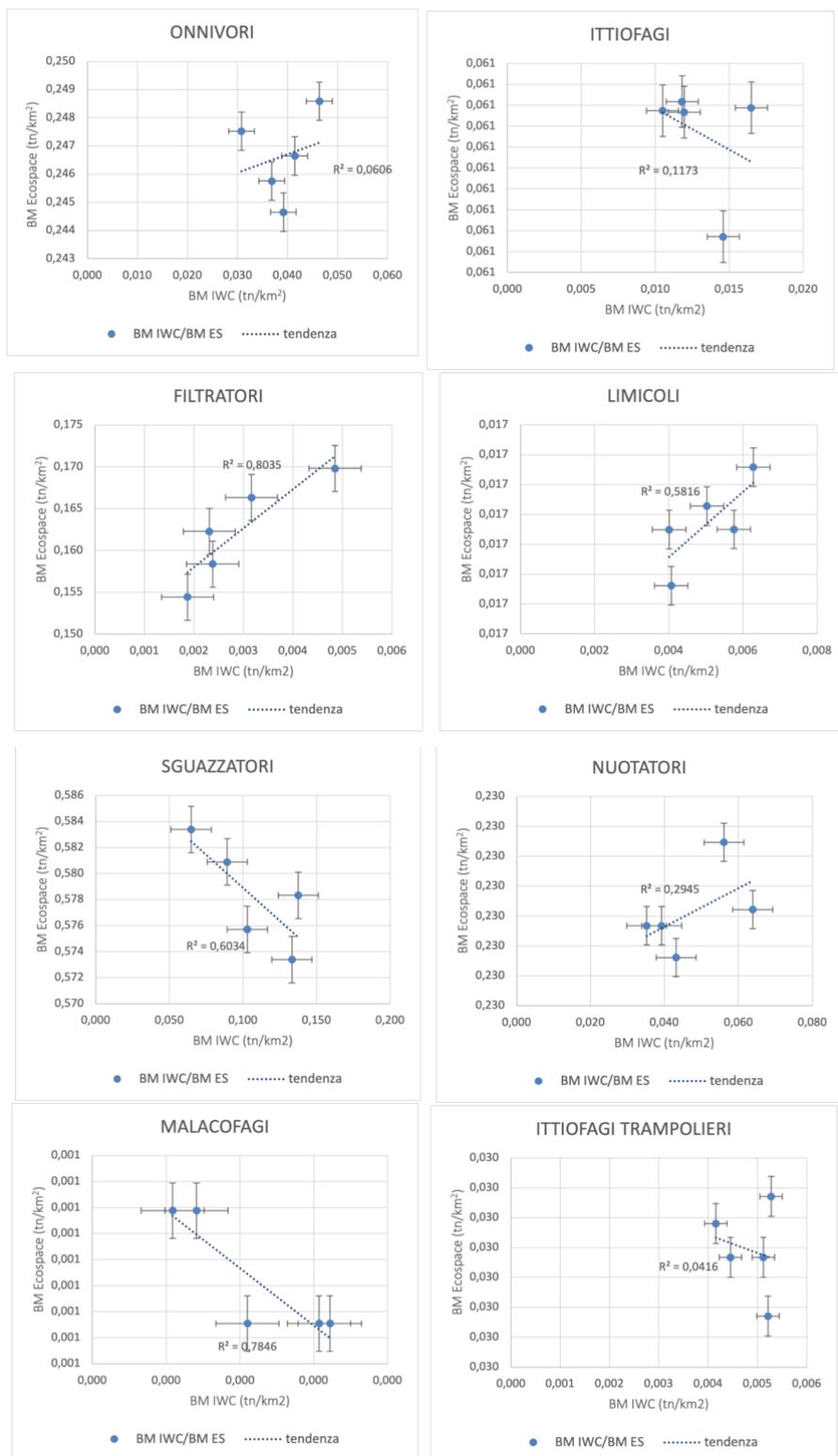


Figura 20: grafici che illustrano il rapporto tra le biomasse iniziali (IWC, in ascissa) e quelle finali (Ecospace, in ordinata) delle prime quattro categorie trofiche di uccelli nei primi cinque anni di analisi. E' presente l'errore standard, la linea di tendenza e 'R2' misura l'affidabilità della linea di tendenza: più R2 è vicino a 1, meglio la linea di tendenza è adatta ai dati.

Nel secondo approccio, invece, si è indagata la correlazione tra i dati di biomassa iniziali (progetto IWC) e finali (modulo Ecospace) per soltanto quattro categorie trofiche di uccelli all'interno delle singole zone elementari in cui viene suddivisa la laguna di Venezia,

Calibrazione 2

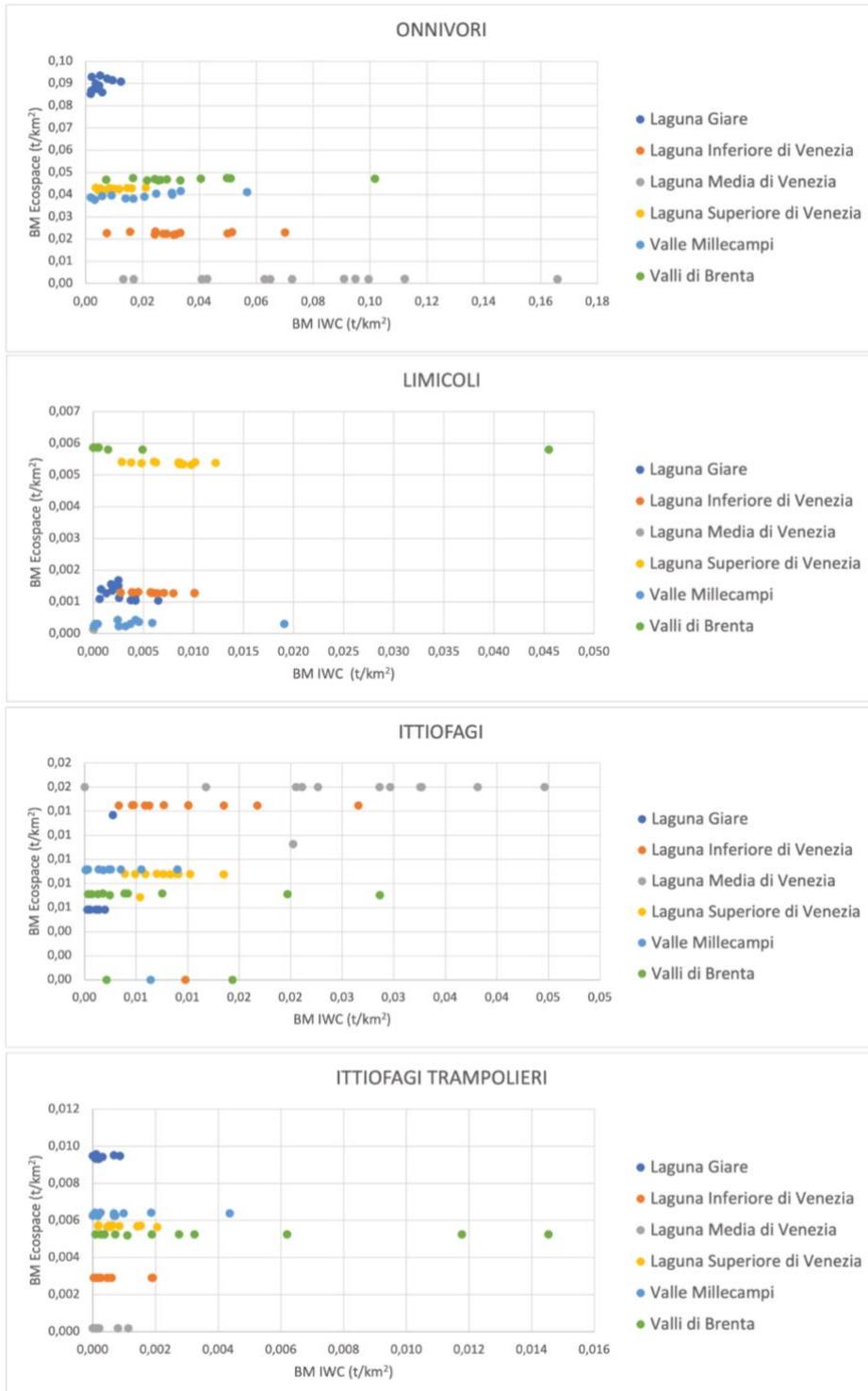


Figura 21: grafici che illustrano per i 4 gruppi caratteristici dell'area di studio il rapporto tra biomasse iniziali e quelle ottenute tramite Ecospace all'interno delle zone elementari IWC. Più il cluster è unito meno quella categoria si sposta da quella data zona tra il periodo di riposo e di foraggiamento.

per valutare eventuali movimenti all'interno o verso l'esterno delle singole zone semplici tra i momenti di riposo (progetto IWC) e il periodo di foraggiamento (dati di Ecospace). La validazione è risultata significativa in quanto il p-value ottenuto con il test di Mann Whitney Wilcoxon è inferiore al valore *alfa* (tabella 21 pag. 66).

Calibrazione 4



Figura 22: grafici che illustrano per i 4 gruppi caratteristici dell'area di studio il rapporto tra biomasse iniziali e quelle ottenute tramite Ecospace all'interno delle zone elementari IWC. Più il cluster è unito meno quella categoria si sposta da quella data zona tra il periodo di riposo e di foraggiamento. Le differenze tra le rispettive categorie trofiche sono minime.

Test di significatività non parametrico Mann Whitney Wilcoxon

Di seguito si riporta la tabella riassuntiva dei valori del test di significatività Mann Whitney per ogni validazione svolta.

Tabella 21: i valori del test effettuato per le rispettive validazioni i cui risultati sono illustrati nelle pagine precedenti. In tipologia di validazione: 'Approccio 1' riguarda il confronto tra le biomasse IWC ed Ecospace nei primi cinque anni di analisi per tutta la laguna con la distinzione della calibrazione svolta nel modulo Ecosim; 'Approccio2' è invece il confronto tra le biomasse all'interno delle singole zone elementari in cui è suddivisa la laguna soggetta a marea. Anche in questo caso è presente la distinzione tra le due calibrazioni effettuate alle serie temporali dei dati.

Tipologia di validazione	P-value
Approccio 1, calibrazione 2	<0,001
Approccio 1, calibrazione 4	<0,001
Approccio 2, calibrazione 2	0,004
Approccio 2, calibrazione 4	<0,001

3.5 Mappa di rilevanza trofica della laguna di Venezia

L'ultimo step di questa indagine ha riguardato il tentativo di quantificare il contributo dell'area di studio al sostentamento della comunità di uccelli acquatici convertendo la distribuzione potenziale delle categorie in consumo equivalente di produzione primaria. In Fig. 23 viene mostrato il consumo totale da parte degli uccelli nell'arco dei venti anni.

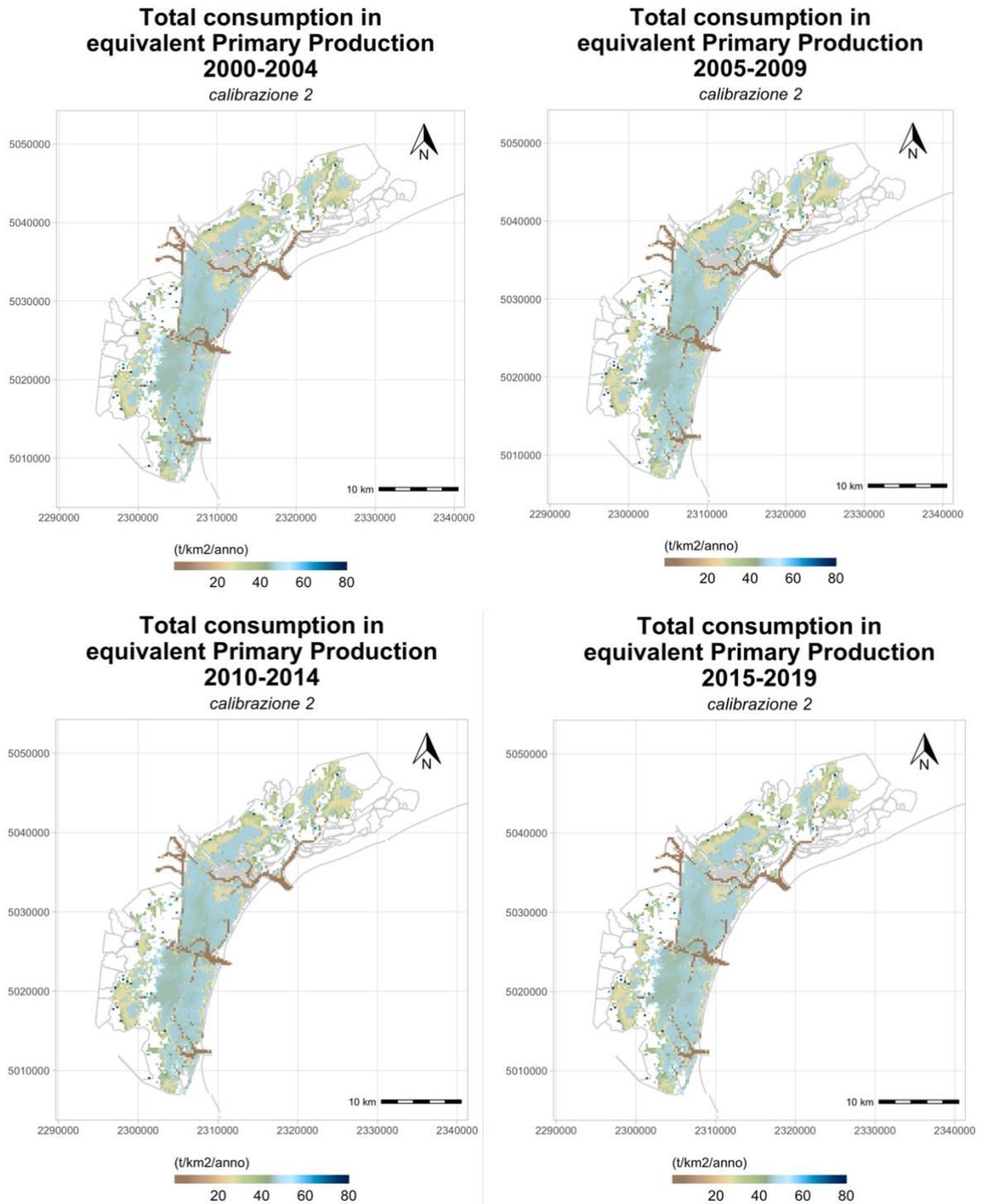


Figura 23: distribuzione potenziale della produzione primaria necessaria a soddisfare la domanda di consumo da parte della comunità ornitica oggetto dello studio.

4 DISCUSSIONE

In questo capitolo si discutono i risultati ottenuti.

4.1 Bilanciamento trofico

Il bilanciamento trofico ottenuto con il primo modulo di Ecopath rappresenta la base da cui si è sviluppato il lavoro. Tale base è tanto dettagliata quanto i dati a disposizione per costituirli sono puntuali e solidi. L'aver privilegiato il punto di vista degli uccelli è dipeso soprattutto dal fatto che essi sono il gruppo con la miglior serie temporale di dati di biomassa a distribuzione, prerogativa importante in fase di avvio dell'elaborazione.

D'altro canto, a differenza delle altre categorie, l'elaborazione si è concentrata nell'ottimizzare i parametri già disponibili, nel trovare quelli mancanti quali consumo e produttività e nel creare la matrice dieta. Sicuramente il software, per come è strutturato, aiuta molto nell'ottenere il risultato finale (tabella 20 pag. 46) guidando l'utente nel sistemare le relazioni e correggere i parametri errati (evidenziati dallo stesso programma). Come in altri lavori ecologici, sicuramente la mediazione e la semplificazione di alcuni aspetti, di dati e di parametri è inevitabile: dal definire quali categorie trofiche tenere o meno in considerazione, al comporre la dieta per categoria e non per singola specie; dall'escludere dalla ricerca bibliografica parti anche consistenti di dati e valutazioni al riportare la produttività pesando in modo opportuno le specie più rappresentative (quindi escludendone alcune). Tutti questi sono alcuni degli aspetti di questa tesi che inevitabilmente portano ad una semplificazione dei risultati ottenuti.

Il risultato finale, costituito dall'implementazione automatica della tabella con i valori di efficienza trofica e di rapporto produttività/consumo, ha rilasciato, alla prima elaborazione, alcuni valori errati che sono stati corretti intervenendo per piccoli e continui aggiustamenti nelle proporzioni delle diete dei gruppi fino ad ottenere la tabella 20 (pag. 46). Distribuendo il valore percentuale tra categorie di prede simili si è arrivati ad avere l'equilibrio atteso nei rapporti tra le varie categorie e, conseguentemente, la rete trofica bilanciata. Questo continuo aggiustamento dimostra come la mancanza di dati precisi, contestualizzati, porti inevitabilmente ad avere delle lacune nel flusso di lavoro nonostante le serie temporali consistenti. Di conseguenza, il programma, nonostante riesca a sopperire parzialmente alle lacune, inevitabilmente chiede di modificare i parametri fintanto che i vari gruppi con le loro caratteristiche risultino in equilibrio tra loro.

La mappa (fig. 9 pag. 47), graficamente e visivamente intuitiva, risalta per il posizionamento dei singoli gruppi nei vari livelli trofici ed evidenzia le connessioni più o meno forti tra i vari gruppi. Gli uccelli si posizionano tutti al di sopra del

secondo livello trofico, con gli 'sguazzatori' e i nuotatori (rispettivamente sigla 'Dab' e 'Divb' in fig. 9) alle posizioni più basse, direttamente collegate ai produttori primari. Gli ittiofagi ('IttioB') e gli ittiofagi trampolieri ('WadiB') invece sono all'apice della rete trofica risultando predatori apicali e specializzati in poche categorie di prede. I collegamenti tra i vari gruppi sono caratterizzati da una diversa intensità e tonalità di colore a seconda di quanto è forte il legame di inter e intra dipendenza tra preda e predatore.

4.2 Andamento temporale del rapporto preda-predatore

I risultati ottenuti attraverso il secondo modulo e consultabili a pag. 49 figura 10, sono frutto di un processo continuo e complesso di calibrazione tra i rapporti preda-predatore in base all'andamento delle biomasse inserite e al loro utilizzo in fase di calibrazione (biomassa relativa, biomassa assoluta o biomassa forzata). Va da sé che, se si volesse svolgere un'analisi molto dettagliata e inclusiva di tutte le varie possibilità di calibrazione, avendo quarantuno categorie e applicando i diversi incastri dati dai tre gradi di vincolo, si arriverebbe ad avere innumerevoli scenari da gestire. Pertanto, ci si è concentrati sulla registrazione dei rapporti delle sole categorie di uccelli con minime variazioni dei gradi del parametro 'type'.

I risultati ottenuti (figura 10, pag. 49) derivano dalle scelte dei parametri di impostazione dei modelli. La prima fatta durante il 'fitting' e che ha considerato i valori finali di alcuni parametri, quali 'Sum of Square' e 'Akaike criteria' e la seconda ha riguardato le considerazioni ecologiche generali scaturite da quanto credere o meno all'andamento temporale delle biomasse.

Il software impiegato necessitava di due accorgimenti per elaborare al meglio i dati tramite lo strumento vulnerabilità. Il primo accorgimento è dato dall'imposizione dell'import' all'interno della matrice dieta quale fattore sottrattivo di una quota parte di biomassa che non viene pertanto considerata nello strumento vulnerabilità. Il secondo, invece, è dato dall'aumento della finestra temporale in cui elaborare i rapporti preda-predatore, accompagnato dall'incipit iniziale di aumento del primo dato di biomassa inserito (anno 2000) e che è rappresentato dalla media delle biomasse dei primi cinque anni (anni 2000-2004). Questo accorgimento serve al programma per assestare i rapporti inter e intra gruppi iniziali anche alla luce dell'aumento imposto della finestra temporale che è stata fatta partire dal 1980 fino al 2050. Questo aumento necessario sembra portare il lavoro verso un'elaborazione predittiva, che risulterebbe in contrasto con l'obiettivo di stampo deterministico di restituire delle mappe di 'suitability' di alimentazione, ma risulta necessario per far elaborare al meglio gli andamenti temporali dei rapporti preda-predatore.

Inoltre, i vincoli inseriti (rappresentati da tre gradi, tabella 14 pag. 34) risultano essere un passo fondamentale nel processo di lavorazione sulla dinamica temporale. Sono state create sei calibrazioni che andassero a ricreare possibili scenari reali sui rapporti tra i vari gruppi di uccelli e di queste si sono tenute soltanto la numero 2 e la numero 4 (tabella 17 pag. 38). Queste due calibrazioni, tenuto conto dei valori finali ottenuti nel 'fitting', dell'andamento generale e delle considerazioni a carattere ecologico a livello di intera comunità avifaunistica, meglio rappresentano l'andamento temporale dei vari gruppi (figura 10 pag. 49).

La 'calibrazione 2' mette sullo stesso piano tutte le categorie avifaunistiche mentre con la 'calibrazione 4' il modello, per gli ittiofagi e i limicoli, forza l'andamento temporale seguendo i dati di biomassa inseriti. Questa forzatura, non presente nella prima calibrazione, prima ha delle ripercussioni sui rapporti preda-predatore relativi ai due gruppi e, successivamente, a cascata, su tutte le altre categorie. Un'importante differenza, inoltre, è che la calibrazione 2 meglio si presta ad essere usata per proiezioni future (es. proiezioni climatiche). Nella calibrazione 4 invece, la biomassa forzata risulta una specie di assimilazione dati che assicura maggiore accuratezza nella fase di rappresentazione del passato ma molta meno accuratezza per la previsione futura.

Questa differenza di impostazione, oltre a portare ad una differenza nell'andamento delle categorie di ittiofagi e limicoli, mostra come alcuni gruppi, quali sguazzatori, ittiofagi trampolieri e onnivori, non risentano della differenza di 'type' tra le due calibrazioni in quanto non si riscontrano scostamenti significativi nei rispettivi andamenti temporali. Questo significa che i rapporti preda/predatore di queste categorie non hanno risentito delle impostazioni definite in calibrazione 4. Invece, una differenza consistente e visibile riguarda il gruppo dei filtratori dove, in 'calibrazione 2', l'andamento si sviluppa in parallelo ai dati inseriti e solo nell'ultima parte si discosta, mentre in 'calibrazione 4', tale andamento ha un suo proprio sviluppo sin dall'inizio dell'andamento temporale. Questo divario è dovuto al fatto che nella 'calibrazione 4' la forzatura imposta ai limicoli ha delle ripercussioni sul rapporto preda-predatore dei filtratori, ed è avvalorato dal fatto che molte categorie di prede e loro quantità sono condivise tra i due gruppi che risultano essere in competizione (vedasi figura 10 pag. 49 per il confronto degli andamenti tra i rispettivi gruppi).

A seguito di queste differenze e, tenendo conto della visione di comunità che si vuole perseguire, si è optato per proseguire il lavoro di spazializzazione basandosi soltanto sulla 'calibrazione 2'.

4.3 Spazializzazione dei dati

Dopo aver creato la rete trofica bilanciata e averla resa dinamica nel tempo, l'ultimo modulo del programma ha consentito la spazializzazione di tali dati per ogni gruppo considerato nel lavoro. In Ecospace, una volta definita l'area di studio e il modulo base della griglia di cui si compone, è fondamentale creare le 'forzanti' di alimentazione delle categorie di uccelli che determinano soprattutto i limiti fisici e di frequenza entro i quali avviene la predazione. Le mappe ottenute sono delle fotografie della distribuzione potenziale per ogni categoria di uccelli. I vent'anni di analisi sono stati suddivisi in quattro periodi di cinque anni ciascuno. Nei quattro lustri viene rappresentato, per ogni singola cella che compone l'area di studio, il valore medio della biomassa dato dalla presenza e abbondanza di prede, e vincolato dalle forzanti imposte a seconda della categoria che si rappresenta. Si può notare come nelle varie mappe non si nota alcuna differenza sostanziale nella distribuzione. Ciò avviene perché il programma di default "spalma" l'andamento di biomassa ottenuto in Ecosim in tutte le celle designate. Se nel modulo precedente si aveva un andamento annuale preciso con crescite e decrescite ben visibili, in Ecospace si assiste ad un processo di distribuzione della biomassa in modo equo su tutta la griglia potenziale. Questa "spalmatura" viene, inoltre, enfatizzata, dal fatto che si restituisce un dato medio di cinque anni. Tale fenomeno si può facilmente vedere per gli uccelli filtratori, come descritto nel paragrafo precedente: nonostante una crescita esponenziale di biomassa visibile in Ecosim, questa non si riscontra in una marcata differenza distributiva nelle quattro mappe di Ecospace.

Questo è un aspetto del software di cui bisogna tenere conto in fase di elaborazione dei dati e che inevitabilmente ci si porta dietro nella restituzione spaziale. In questo studio non si è tenuto conto di alcun vettore di spostamento che descriva l'elevata mobilità degli uccelli. In futuro si potrebbero utilizzare informazioni dinamiche attraverso l'implementazione della funzione di "*spatial temporal framework*" (EwE) che consente di rappresentare dinamiche spazio-temporali.

Per quanto riguarda la grafica delle mappe del paragrafo 3.3 si è scelto di mantenere costante lo sfondo rappresentante la laguna di Venezia nella sua interezza e di usare la stessa gradazione di colori per la rappresentazione della biomassa per tutte le categorie. L'unico aspetto che varia è il range dei valori di biomassa associati alla scala di colore e rappresentati in legenda. L'intervallo è definito in base ai valori limiti presenti all'interno dei dati delle rispettive gilde. Pertanto, anche se non visibili perché graficamente sono quadrati troppo piccoli, anche i valori massimi sono stati rappresentati nelle mappe. Tutto ciò è stato 'ordinato' nello script di esecuzione del calcolo creato con il programma RStudio.

Le mappe ottenute mostrano con una buona definizione le potenzialità della distribuzione di queste categorie di uccelli in laguna di Venezia.

4.4 Considerazioni sulla validazione

La validazione dei risultati ottenuti con l'ultimo modulo Ecospace risulta essere stata necessaria per valutare se il lavoro svolto fosse verosimile a quanto avviene in laguna di Venezia durante gli inverni. In questo frangente si è deciso di effettuare la validazione su entrambe le calibrazioni ritenute le più idonee agli scopi di questo elaborato (paragrafo 2.5.1) ed è stata condotta con due obiettivi differenti.

Il primo è atto a verificare la correlazione di tutti i gruppi che gravitano su tutta l'area di studio prendendo in considerazione i dati dei primi cinque anni di analisi. Solitamente, la correlazione è considerata buona quanto il rapporto tra i dati che si analizzano, in questo caso le biomasse, risulta essere maggiore di 0.3 (M. C. Whitlock e D. Schluter, 2008).

Esistono delle differenze nei grafici tra le due calibrazioni. Per quanto riguarda la 'calibrazione 2', in cui si ricorda tutti i gruppi di uccelli hanno lo stesso grado di vincolo ($BM=0$, biomassa relativa), solo i filtratori, gli sguazzatori e i malacofagi hanno una buona correlazione mentre nelle altre cinque categorie la correlazione ha valori prossimi allo zero e addirittura in alcuni casi è negativa. Le correlazioni negative derivano dal fatto che alcuni gruppi quali gli sgozzatori, gli ittiofagi, gli ittiofagi trampolieri, hanno un comportamento altamente dispersivo dalle zone di riposo lagunari (progetto IWC) alle aree di foraggiamento (dati finali di Ecospace).

Nella 'calibrazione 4', dove ci sono due gruppi forzati, le correlazioni hanno valori più solidi. A differenza degli altri gruppi, ad esempio, gli ittiofagi hanno una correlazione negativa a testimonianza dell'alta mobilità di questo gruppo, che nonostante la forzatura delle biomasse imposta a livello dinamico-temporale (Ecosim) viene rappresentata con un'alta mobilità in ambito spaziale (Ecospace).

Infine, si evince da questa validazione che i gradi di libertà imposti alle serie temporali (il fitting effettuato in Ecosim, paragrafo 2.5.1), sono fondamentali a seconda dello scopo che si vuole raggiungere con la modellizzazione. Alla base della scelta c'è questa regola: forzare le serie temporali significa avere qualcosa di più deterministico e meno previsionale.

Alla luce di ciò, come già rimarcato, la 'calibrazione 2' risulta essere il miglior compromesso in base a tutte le considerazioni fatte in precedenza e risulta altresì ottima in termini previsionali permettendo di ritenere affidabile tale modello e di usarlo per ulteriori sviluppi e approfondimenti in un'ottica futura.

Il secondo obiettivo della validazione ha riguardato soltanto i quattro gruppi più rappresentativi in termini di visibilità quotidiana della laguna soggetta a marea, per un periodo di analisi di dodici anni, selezionato casualmente. Le categorie riguardano gli ittiofagi, gli onnivori, i limicoli e gli ittiofagi trampolieri. L'obiettivo è stato di confrontare i dati iniziali con quelli finali ma, in questo frangente, solo all'interno delle singole zone umide elementari che compongono l'area di studio (secondo la classificazione progetto IWC). La finalità è capire, in base alla distribuzione dei cluster di area, quanto le singole zone vengono sfruttate durante il riposo e durante il foraggiamento. Più il cluster è raggruppato, meno quella categoria di uccelli si sposta per andarsi ad alimentare, più i punti sono distribuiti nel grafico, più quel gruppo è abituato alla mobilità per il foraggiamento. Confrontando le distribuzioni dei cluster delle categorie ottenute con le due calibrazioni, emerge che non ci sono sostanziali differenze se non nel gruppo degli ittiofagi, dove il vincolo di biomassa forzata impostata nella 'calibrazione 4' determina una maggior rigidità che si traduce in un minor spostamento tra il periodo di riposo e il periodo di foraggiamento, andando in contrasto con quanto avviene invece nei periodi invernali dove gli ittiofagi sono caratterizzati da un'alta mobilità (anche oltre l'area di studio) per l'attività trofica. Questa differenza tra calibrazioni non si avverte nel confronto che riguarda i limicoli, l'altro gruppo forzato nella calibrazione 4.

Anche in questo frangente, la correlazione tra i dati iniziali e finali ha fatto emergere due aspetti fondamentali: il primo riguarda la bontà di questo modello deterministico nel rappresentare quanto ci si aspettava, anche in termini potenziali, dalla comunità ornitica; il secondo aspetto riguarda invece come il parametro vettoriale di spostamento sia fondamentale per una migliore rappresentazione della realtà ed ha evidenziato le potenzialità di conoscenza che si possono raggiungere studiando la rete trofica lagunare scendendo ad una scala più dettagliata.

A riprova della bontà dei dataset usati per la validazione dei risultati del modello è stato effettuato un test di significatività. Avendo pochi dati a disposizione e non avendo una distribuzione normale si è optato per un test non parametrico, e precisamente per il test di Mann Whitney Wilcoxon. L'ipotesi nulla è la non correlazione tra i dati di biomassa del progetto IWC con i dati di biomassa di Ecospace a cui è stata una soglia di probabilità del 5% ($\alpha = 0,05$). Dal test è emerso che tutti i valori di p-value delle validazioni effettuate sono al di sotto di tale soglia (vedasi tabella 21 pag. 65) pertanto si può rigettare l'ipotesi nulla e sostenere che i dati usati risultano essere significativi per la validazione del modello.

4.5 Consumo di produzione primaria equivalente

Questo ultimo risultato rappresenta il tentativo di quantificare il contributo dell'area di studio al sostentamento della comunità di uccelli acquatici svernanti. Per arrivare a determinare questo parametro non basta determinare quanto è il consumo delle diverse specie predate, ma è stato necessario calcolare il consumo richiesto dagli uccelli espresso in produzione primaria equivalente. Se all'inizio di questo percorso si era partiti dai dati ambientali e dalle prede per arrivare a posizionare le categorie ai livelli trofici più alti della rete, ora, una volta ottenuto il modello rappresentativo anche della comunità di uccelli acquatici svernanti, il processo si inverte avendo come obiettivo quantificare la produzione primaria equivalente necessaria a sostenere la comunità ornitica in laguna.

Il risultato finale mostra come tutta la laguna sia potenzialmente appetibile alle necessità trofiche degli uccelli acquatici considerati, anche se notevoli sono le differenze tra aree evidenziate graficamente tramite il gradiente di colore. Le zone a maggior produzione si collocano presso le aree barenali, lungo i bordi delle valli e della gronda lagunare, per poi andare a scemare man mano da tali ecotoni fino a risultare minime ma sempre appetibili in corrispondenza dei canali navigabili.

Questo risultato dimostra in modo semplice e generale come la produzione primaria in laguna di Venezia possa supportare la comunità ornitica che vi gravita durante gli inverni nel periodo analizzato.

5 CONCLUSIONE

Questo elaborato rappresenta un primo tentativo di unire la distribuzione locale degli uccelli acquatici, analizzando la rete trofica per la laguna di Venezia soggetta a marea. Partendo da dati di un monitoraggio degli uccelli basato su vent'anni di osservazioni si è giunti ad avere una prima stima delle potenzialità di produzione alimentare dell'area di studio per gli uccelli acquatici svernanti.

Numerosi sono gli aspetti problematici che sono emersi durante il lavoro. Esso risulta essere deficitario per mancanza di alcune informazioni specifiche e alcuni dati locali relativamente alle diete, ai tassi di accrescimento e di consumo degli uccelli. Sicuramente in futuro non si possono escludere le valli da pesca (che occupano circa il 18% del bacino lagunare) per il loro ruolo di attrarre gli uccelli in inverno, e i risvolti che esse hanno sia in ambito di rete trofica e sia in ambito di continuità ambientale con la laguna soggetta a marea (l'attuale area studio). Inoltre, si sottolinea come la parte fondamentale relativa alla creazione della matrice diete nel rapporto preda-predatore è stata 'assemblata' da bibliografia in quanto ad oggi per quasi la totalità delle specie considerate non si hanno dati su cosa e quanto mangino in laguna di Venezia.

Per quanto riguarda gli aspetti positivi si sottolinea come il programma usato per l'elaborazione dei dati, nato per l'ecologia marina, si è dimostrato applicabile anche in ambito lagunare, includendo la componente rappresentata dagli uccelli acquatici. Sarà interessante includere in futuro un vettore spaziale che permetta di includere informazioni sugli spostamenti, che sono certamente una componente importante nell'uso dello spazio da parte di questo gruppo animale.

Se da un lato, i modelli sono strumenti importanti in quanto possono simulare una vasta gamma di processi ecosistemici e impatti della pesca in un approccio su misura per l'ecosistema (Tsagarakis et al. 2022), dall'altro, non possono sempre essere tradotti in modo automatico in soluzioni per la gestione ambientale, in quanto hanno incertezze intrinseche su parametri, struttura, processi ecc. (Anelli Monti et al. 2021); tuttavia, possono rivelarsi utili per selezionare lo scenario più conforme su cui basare l'efficacia di successive scelte politiche in quanto offrono la possibilità di simulare gli effetti passati e futuri. La ricerca futura dovrebbe puntare sull'uso di una serie di indicatori per valutare gli effetti della pesca a diversi livelli gerarchici ecologici (popolazione, comunità, ecosistema), accoppiando così le valutazioni singole dello stock con le valutazioni basate sull'ecosistema (Libralato et al., 2008).

Il vantaggio principale di questo approccio di rete è la sua idoneità all'applicazione di un ampio campo di teorie utili per gli studi ecosistemici (Raicevich et al., 2003). Oltre a ciò, con ulteriori approfondimenti, l'approccio utilizzato

potrebbe essere usato per investigare i potenziali conflitti tra le attività antropiche lagunari, quali le attività di pesca tradizionale e l'attività venatoria (appostamenti fissi), e la comunità ornitica, andando a stimare la misura in cui tali attività abbiano effetto sulla potenzialità degli areali idonei al foraggiamento delle categorie considerate. Tale esempio di potenziale conflitto meriterebbe un'opportuna indagine, a partire da questa attività, per poter arrivare a delineare piani gestionali che rappresentino il compromesso ottimale tra la comunità ornitica svernante e le necessità della sfera antropica.

In termini conoscitivi invece, sarebbe auspicabile ampliare la finestra temporale di indagine al periodo riproduttivo della comunità ornitica presente in laguna di Venezia. Proprio per il respiro continentale di tale area, si potrebbe iniziare a lavorare in modo predittivo, vista la mancanza di dati raccolti in modo omogeneo nel passato. Conseguentemente, si lavorerebbe sul cambio di specie che vanno a comporre le stesse categorie, e a cascata, sul cambio dei parametri quali produttività e consumo, con l'aggiunta di altri parametri riguardanti il successo riproduttivo e le cure parentali, oltre che lavorare sul cambio di dieta. Anche in questo caso appare fondamentale ampliare l'area di studio includendo le valli da pesca e la costa. Altri aspetti, sicuramente stimolanti, da studiare e approfondire partendo da questo elaborato, riguardano gli effetti dell'andamento medio delle maree che sicuramente portano a cambiamenti diretti ed indiretti mediati dalla rete trofica anche sulla comunità degli uccelli. Inoltre, i cambiamenti nella distribuzione delle specie possono essere un effetto del cambiamento climatico di assoluto interesse, totalmente da indagare, e possono integrare cambiamenti nella fenologia delle comunità biologiche (Libralato et al., 2015). Infine, questo lavoro può rappresentare un buon caso studio anche per esplorare le dinamiche ecologiche legate al cambiamento simultaneo delle condizioni ambientali (dovuto al riscaldamento dell'acqua per esempio) e della struttura comunitaria (Libralato et al., 2015).

In modo predittivo questa produzione potrebbe diventare uno strumento per la gestione della laguna in un contesto ampio come quello riguardante i cambiamenti climatici. L'approccio attuale potrebbe essere utile per valutare strategie di gestione che includono una mitigazione degli effetti climatici, come il targeting delle specie appena arrivate in modo da massimizzare o preservare i valori storici o altri valori nel sistema sociale-ecologico complessivo (Libralato et al., 2015). Inoltre, tale modello potrebbe costituire la base per la creazione di strumenti di gestione, di partecipazione e di decisione, per esempio, in ambito di 'marine spatial planning'.

In conclusione, i risultati ottenuti sono complessivamente promettenti e suggeriscono che un approccio ecologico possa stimolare lavori più approfonditi, in

termini temporali, spaziali e di dettaglio delle specie considerate al fine di approfondire la conoscenza delle dinamiche ecologiche della laguna di Venezia.

6 RINGRAZIAMENTI

Al termine di questo lavoro desidero ringraziare coloro i quali hanno permesso di svolgere questo lavoro e vedere gli uccelli sotto una diversa luce.

Un sincero grazie al capo area BIO-EPD dell'ISPRA di Bologna, dott. N. Baccetti, per l'opportunità di aver lavorato in modo approfondito su un tema istituzionale dell'area, oltre alla sua sempre vigile e critica presenza lungo tutto il percorso, dal tirocinio fino alla stesura di questo documento.

Non sarà mai abbastanza il ringraziamento che esprimo ai ricercatori dott. Simone Libralato e dott. Davide Agnetta (Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale - OGS). Dai numerosi incontri in questo anno e mezzo è nata una collaborazione che ha portato ad un proficuo scambio di conoscenza e competenze. Il loro tempo dedicato alle mie domande, ai miei dubbi e alle mie difficoltà, non troverà mai giusta ricompensa nel mio sincero ringraziamento di queste righe.

Dedico questo lavoro all'amico e ornitologo M. Panuccio che mi ha spronato a questa avventura accademica, e al prof. M. Griggio con cui avrei voluto tanto lavorare. Infine, dedico questa tesi a chi ho incontrato sul mio percorso formativo.

7 BIBLIOGRAFIA

- AA. VV. in Provincia di Venezia, 2009. *Valli Veneziane, natura storia e tradizioni delle valli da pesca a Venezia e Caorle*. Venezia: Cicero.
- Abarca-Arenas L. G. e Ulanowicz R. E., 2002. «*The Effects of Taxonomic Aggregation on Network Analysis*». *Ecological Modelling* 149 (3): 285–96. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(01\)00474-4](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(01)00474-4).
- Agnetta D., Badalamenti F., Colloca F., D’Anna G., Di Lorenzo M., Fiorentino F., Garofalo G., et al. 2019. «*Benthic-Pelagic Coupling Mediates Interactions in Mediterranean Mixed Fisheries: An Ecosystem Modeling Approach*». A cura di Athanassios C. Tsikliras. *PLOS ONE* 14 (1): e0210659. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0210659>.
- Ahrens R. N. M., Walters C. J. e Christensen V., 2012. «*Foraging Arena Theory*». *Fish and Fisheries* 13 (1): 41–59. <https://doi.org/10.1111/j.1467-2979.2011.00432.x>.
- Anelli Monti M., Brigolin D., Franzoi P., Libralato S., Pastres R., Solidoro C., Zucchetta M., e Pranovi F. 2021. «*Ecosystem Functioning and Ecological Status in the Venice Lagoon, Which Relationships?*» *Ecological Indicators* 133 (dicembre): 108461. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108461>.
- Baccetti N., Fracasso N. & C.O.I., 2021. *CISO-COI Check-list of Italian birds - 2020*. *Avocetta* 45: 21-85. https://doi.org/10.30456/AVO.2021_checklist_en
- Bevilaqua P., 1998. *Venezia e le acque: una metafora planetaria*. Roma: Donzelli editore.
- Boldreghini P. e Dall’Alpi A., 2004. «*Abundance and Diversity of the Waterbird Community in a Managed Wetland Ecosystem*», 4.
- Boldreghini P. e Dall’Alpi A., 2008. «*Measuring the Abundance and Diversity of a Waterbird Community: Numbers or Biomass?*», 9.
- Bon M. e Scarton F., 2012. *Lo svernamento degli uccelli acquatici in provincia di Venezia (1993- 2012)*. Venezia: Provincia di Venezia, assessorato alla caccia.
- Bosworth R.J.B., 1999. «*Piero Bevilacqua, Venezia e Le Acque. Una Metafora Planetaria*», Rome, Donzelli. Pp. 176, ISBN 88-7989-442-0 Hbk, *Modern Italy* 4 (2): 261–63. <https://doi.org/10.1017/S1353294400007596>.

- Britton R. H., de Groot E. R. e Johnson. A. R., «*The Daily Cycle of Feeding Activity of the Greater Flamingo in Relation to the Dispersion of the Prey Artemia*», 5.
- Brochet A.-L., Mouronval J.-B., Aubry P., Gauthier-Clerc M., Green A. J., Fritz H. e Guillemain M., 2012. «*Diet and Feeding Habitats of Camargue Dabbling Ducks: What Has Changed Since the 1960s?*» *Waterbirds* 35 (4): 555–76. <https://doi.org/10.1675/063.035.0406>.
- Bullo G., 1940. *Le valli salse da pesca e la vallicoltura*. Venezia: Officine grafiche Carlo Ferrari.
- Carniello L., Defina A. e D'Alpaos L., 2009. «*Morphological evolution of the Venice Lagoon: evidence from the past and trend for the future*» *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 114(F4).
- Christensen V., Walters C. J., 2004. «*Ecopath with Ecosim: Methods, Capabilities and Limitations*». *Ecological Modelling* 172 (2–4): 109–39. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2003.09.003>.
- Christensen, Villy, C.J. Walters, e D Pauly. 2005. «*Ecopath with Ecosim: A User's Guide*», 155.
- Christian R. R. e Luczkovich J. J., 1999. «*Organizing and Understanding a Winter's Seagrass Foodweb Network through Effective Trophic Levels*». *Ecological Modelling* 117 (1): 99–124. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(99\)00022-8](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(99)00022-8).
- CORILA, 2019. *Venezia2021*. <http://venezia2021.corila.it/home/>.
- CORILA, 2020. *Venezia2021*. <http://www.corila.it/it/Venezia2021>.
- Cramp S., 1988. *Handbook of the birds of Europe, the Middle East and North Africa: the birds of the Western Palearctic*. Edited by Stanley Cramp. Vols. 1,2,3,4. 8 vols. Oxford University.
- D'Alpaos L., 2010. *L'evoluzione morfologica della Laguna di Venezia attraverso la lettura di alcune mappe storiche e delle sue carte idrografiche*. Venezia: comune di Venezia.
- D'Antoni M. e Natalia M.C., 2010. *Sinergie fra la Direttiva Quadro sulle Acque e le Direttive "Habitat" e "Uccelli" per la tutela degli ecosistemi acquatici con particolare riferimento alle Aree Protette, Siti Natura 2000 e Zone Ramsar. Aspetti relativi alla Pianificazione*. Roma: ISPRA.

- Dessborn, L., Brochet A. L., Elmberg J., Legagneux P., Gauthier-Clerc M. e Guillemain M., 2011. «*Geographical and Temporal Patterns in the Diet of Pintail Anas Acuta, Wigeon Anas Penelope, Mallard Anas Platyrhynchos and Teal Anas Crecca in the Western Palearctic*». European Journal of Wildlife Research 57 (6): 1119–29. <https://doi.org/10.1007/s10344-011-0577-z>.
- Dudgeon D., Arthington A. H., Gessner M. O., Kawabata Z.-I., Knowler D. J., Lévêque C., Naiman R. J. et al., 2006. «*Freshwater Biodiversity: Importance, Threats, Status and Conservation Challenges*». Biological Reviews 81 (02): 163. <https://doi.org/10.1017/S1464793105006950>.
- Erwin R. M., 1978. «*Population and Colony Site Dynamics in Selected Massachusetts Waterbirds*». Proceedings of the Colonial Waterbird Group 1: 19. <https://doi.org/10.2307/1520897>.
- Ferrarin C., Bajo M., Bellafiore D., Cucco A., De Pascalis F., Ghezzi M. e Umgieser G., 2014. «*Toward Homogenization of Mediterranean Lagoons and Their Loss of Hydrodiversity*». Geophysical Research Letters 41 (16): 5935–41. <https://doi.org/10.1002/2014GL060843>.
- Finlayson M. e Moser M., 1991. *Wetlands*. Oxford.
- Gagliardi A., Martinoli A., Preatoni D., Wauters L. A. e Tosi G., 2007. «*From Mass of Body Elements to Fish Biomass: A Direct Method to Quantify Food Intake of Fish-Eating Birds*». Hydrobiologia 583 (1): 213–22. <https://doi.org/10.1007/s10750-006-0528-y>.
- Giordani S. (red.), 1992. *La Laguna. Tomo I. Ambiente, Fauna e Flora*. Corbo e Fiore Editori, Venezia, 413 pp.
- ISPRA, *Inventario delle zone umide del territorio italiano*. <http://sgi1.isprambiente.it/zoneumide/>.
- Karpouzi V., Watson R. e Pauly D., 2007. «*Modelling and Mapping Resource Overlap between Seabirds and Fisheries on a Global Scale: A Preliminary Assessment*». Marine Ecology Progress Series 343 (agosto): 87–99. <https://doi.org/10.3354/meps06860>.
- Libralato S., Pranovi F., Raicevich S., Da Ponte F., Giovanardi O., Pastres R., Torricelli P. e Mainardi D., 2004. «*Ecological Stages of the Venice Lagoon Analysed Using Landing Time Series Data*». Journal of Marine Systems 51 (1–4): 331–44. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2004.05.020>.

- Libralato S., Christensen V., e Pauly D., 2006. «A Method for Identifying Keystone Species in Food Web Models». *Ecological Modelling* 195 (3–4): 153–71. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.11.029>.
- Libralato S., Coll M., Tudela S., Palomera I. e Pranovi F., 2008. «Novel Index for Quantification of Ecosystem Effects of Fishing as Removal of Secondary Production». *Marine Ecology Progress Series* 355 (febbraio): 107–29. <https://doi.org/10.3354/meps07224>.
- Libralato S. e Solidoro C., 2009. «Bridging Biogeochemical and Food Web Models for an End-to-End Representation of Marine Ecosystem Dynamics: The Venice Lagoon Case Study». *Ecological Modelling* 220 (21): 2960–71. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.08.017>.
- Libralato S., Coll M., Tempesta M., Santojanni A., Spoto M., Palomera I., Arneri E., e Solidoro C., 2010. «Food-Web Traits of Protected and Exploited Areas of the Adriatic Sea». *Biological Conservation* 143 (9): 2182–94. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2010.06.002>.
- Libralato S. e Solidoro C., 2010. «Comparing Methods for Building Trophic Spectra of Ecological Data». *ICES Journal of Marine Science* 67 (3): 426–34. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsp249>.
- Libralato S., Caccin A. e Pranovi F., 2015. «Modeling Species Invasions Using Thermal and Trophic Niche Dynamics under Climate Change». *Frontiers in Marine Science* 2 (maggio). <https://doi.org/10.3389/fmars.2015.00029>.
- Libralato S. e Solidoro C., 2021. «Bridging biogeochemical and food web models for an End-to-End representation of marine ecosystem dynamics: The Venice lagoon case study.» *Ecological Modelling* 2960-2971.
- Malavasi S. e Occhipinti I., 2014. «Dieta e strategie alimentari del cormorano (*Phalacrocorax carbo sinensis*) in valle Averte», 45.
- Moutopoulos D. K., Libralato S., Solidoro C. e Stergiou K. I., 2013. «Toward an Ecosystem Approach to Fisheries in the Mediterranean Sea: Multi-Gear/Multi-Species Implications from an Ecosystem Model of the Greek Ionian Sea». *Journal of Marine Systems* 113–114 (marzo): 13–28. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2012.12.002>.
- Nilsson L., 1972. «Habitat Selection, Food Choice, and Feeding Habits of Diving Ducks in Coastal Waters of South Sweden during the Non-Breeding Season».

- Ornis Scandinavica 3 (1): 55. <https://doi.org/10.2307/3676166>.
- Olney P.J.S., 1968. «*The Food and Feeding-Habits of the Pochard, Aythya Ferina*». Biological Conservation 1 (1): 71–76. [https://doi.org/10.1016/0006-3207\(68\)90026-8](https://doi.org/10.1016/0006-3207(68)90026-8).
- Pauly D. e Christensen V., 1995. «*Primary production required to sustain global fisheries*». Nature, 374(6519), pp.255-257.
- Phillips A. C., s.d. «*Mute swan impacts on native waterbirds and submerged aquatic vegetation in Illinois*», 17.
- Poysa H., 1983. «*Morphology-Mediated Niche Organization in a Guild of Dabbling Ducks*». Ornis Scandinavica 14 (4): 317. <https://doi.org/10.2307/3676325>.
- Pranovi F., Da Ponte F. e Torricelli P., 2008. «*Historical Changes in the Structure and Functioning of the Benthic Community in the Lagoon of Venice*». Estuarine, Coastal and Shelf Science 76 (4): 753–64. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.08.006>.
- Provincia di Venezia. 2007. «*La laguna di Venezia, ambiente, naturalità, uomo*». Venezia: nuova dimensione.
- Raicevich S., Granzotto A., Pastres R., Giovanardi O., Pranovi F. e Libralato S., 2003. «*Mechanical Clam Dredging in Venice Lagoon: Ecosystem Effects Evaluated with a Trophic Mass-Balance Model*». Marine Biology 143 (2): 393–403. <https://doi.org/10.1007/s00227-003-1072-1>.
- Quintana F., Wilson R., Dell’Arciprete P., Shepard E. e Laich A.G., 2011. «*Women from Venus, Men from Mars: Inter-Sex Foraging Differences in the Imperial Cormorant Phalacrocorax atriceps a Colonial Seabird*». Oikos 120 (3): 350–58. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2010.18387.x>.
- Rose P.M., Svott D.A., 1994. *Waterfowl Population Estimates. IWRB Publication 29*. Slimbridge, UK.
- Rova, S., Müller, F., Meire, P., Pranovi, F., 2019. *Sustainability perspectives and spatial patterns of multiple ecosystem services in the Venice lagoon: Possible roles in the implementation of the EU Water Framework Directive*. Ecol. Ind. 98, 556–567.
- Sibly R. M., Witt C. C., Wright N. A., Venditti C., Jetz W. e J. H. Brown. 2012.

- «*Energetics, Lifestyle, and Reproduction in Birds*». Proceedings of the National Academy of Sciences 109 (27): 10937–41. <https://doi.org/10.1073/pnas.1206512109>.
- Smart M. e Vinals M.J., 2004. *The Lagoon of Venice as a Ramsar Site*. Venezia: Provincia di Venezia.
- Solidoro C., Bandelj V., Bernardi F., Camatti E., Ciavatta S., Cossarini G., Facca C. et al., 2010. «*Response of the Venice Lagoon Ecosystem to Natural and Anthropogenic Pressures over the Last 50 Years*». In *Coastal Lagoons*, a cura di Michael Kennish e Hans Paerl, 20103358:483–511. Marine Science. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/EBK1420088304-c19>.
- Tsagarakis K., Libralato S., Giannoulaki M., Touloumis K., Somarakis S., Machias A., Frangoulis C., Papantoniou G., Kavadas S. e Stoumboudi M., 2022. «*Drivers of the North Aegean Sea Ecosystem (Eastern Mediterranean) Through Time: Insights from Multidecadal Retrospective Analysis and Future Simulations*». *Frontiers in Marine Science* 9 (luglio): 919793. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.919793>.
- Underhill L. G. e Prys-Jones R. P., 1994. «*Index Numbers for Waterbird Populations. I. Review and Methodology*». *The Journal of Applied Ecology* 31 (3): 463. <https://doi.org/10.2307/2404443>.
- Vlachopoulou M., Coughlin D., Forrow D., Kirk S., Logan P., Voulvoulis, N., 2014. *The potential of using the Ecosystem Approach in the implementation of the EU Water Framework Directive*. *Sci. Total Environ.* 470–471, 684–694. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.09.072>.
- Voulvoulis, N., Arpon K.D., Giakoumis T., 2017. *The EU Water Framework Directive: from great expectations to problems with implementation*. *Sci. Total Environ.* 575, 358–366. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.228>.
- Walters C., 1999. «*Ecospace: Prediction of Mesoscale Spatial Patterns in Trophic Relationships of Exploited Ecosystems, with Emphasis on the Impacts of Marine Protected Areas*». *Ecosystems* 2 (6): 539–54. <https://doi.org/10.1007/s100219900101>.
- Wetland International, 2022. *Waterbirds Population Portal*. Accessed 2022. <https://waterbird-population.vercel.app>.

- Whitlock M. C. e Schluter D., 2008. *The Analysis of Biological Data*. Roberts and Company Publishers.
<https://www.macmillanlearning.com/college/us/product/The-Analysis-of-Biological-Data/p/131922623X?searchText=whitlock>
- Zenatello M., Baccetti N., Borghesi F. 2014. *Risultati dei censimenti degli uccelli acquatici svernanti in Italia*. Distribuzione, stima e trend delle popolazioni nel 2001-2010. Roma: ISPRA, Serie Rapporti.
- Zenatello M., Baccetti N., Luchetta A., 2020. *INTERNATIONAL WATERBIRDS CENSUS - REPORT 2009-2018*, ISPRA & Tour du Valat coordinators, DOI: 10.13140/RG.2.2.24870.45123
- Zunino S., Libralato S., Melaku Canu D., Prato G. e Cosimo Solidoro. 2021. «Impact of Ocean Acidification on Ecosystem Functioning and Services in Habitat-Forming Species and Marine Ecosystems». *Ecosystems* 24 (7): 1561–75. <https://doi.org/10.1007/s10021-021-00601-3>

