

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DELLA TUSCIA DI VITERBO

DIPARTIMENTO DI ECOLOGIA E SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

CORSO DI DOTTORATO DI RICERCA

ECOLOGIA E GESTIONE DELLE RISORSE BIOLOGICHE – XXI Ciclo

UN APPROCCIO MODELLISTICO ALLO STUDIO DELL'ACCRESIMENTO

FOGLIARE IN *POSIDONIA OCEANICA*

BIO/07

Coordinatore: Dott.ssa Roberta Cimmaruta

Tutor: Prof. Michele Scardi

Dottorando: Paola Di Dato

Marzo 2010

INDICE

1. INTRODUZIONE	pag.3
1.1. La <i>Posidonia oceanica</i>	pag. 7
1.1.1. La pianta: caratteristiche morfologiche, fisiologiche ed ecologiche	pag. 7
1.1.2. La prateria: l'ecosistema <i>Posidonia</i>	pag. 10
1.1.3. I <i>patterns</i> di crescita di <i>P. oceanica</i> : analisi della letteratura storica	pag. 13
1.2. I modelli matematici in ecologia	pag. 18
1.2.1. Lo sviluppo fenologico vegetale	pag. 21
1.2.2. La modellizzazione della dinamica di crescita nelle fanerogame marine	pag. 22
1.2.3. I <i>patterns</i> di crescita di <i>P. oceanica</i> : approcci modellistici	pag. 23
2. MATERIALI E METODI	pag. 29
2.1. La base dei dati	pag. 29
2.2. Il modello di crescita delle foglie di <i>P. oceanica</i>	pag. 31
2.2.1. Il diagramma concettuale e la formulazione matematica	pag. 31
2.2.2. Il linguaggio di programmazione	pag. 43
2.2.4. Lo sviluppo del codice	pag. 44
3. RISULTATI	pag. 52
4. CONCLUSIONI	pag. 76
5. BIBLIOGRAFIA	pag.80
6. ALLEGATI	pag. 87
6.1. “A machine learning approach to seagrass density modeling”	

1. INTRODUZIONE

Negli ambienti marino-costieri, le fanerogame marine rappresentano delle vere e proprie *key species* costituendo ecosistemi complessi responsabili di contribuire in maniera considerevole alla stabilità ed alla conservazione della fascia costiera.

Appartenenti al gruppo delle 60 angiosperme monocotiledoni a vita acquatica, le specie presenti in Mediterraneo sono solo cinque (*Posidonia oceanica*, *Cymodocea nodosa*, *Zostera marina* e *Nanozostera noltii* ed una specie alloctona *Halophila stipulacea*), ma nel loro insieme contribuiscono a formare un manto vegetale a mò di cintura spesso molto esteso, che caratterizza il piano infralitorale.

Per il suo ruolo ecologico (indicatore biologico di qualità ambientale, elevata produttività, stabilizzazione dei processi di sedimentazione e conservazione dell'equilibrio geomorfologico del litorale, *habitat* di elezione e zona di *nursery* per numerose specie di interesse commerciale,) la *Posidonia oceanica*, è sicuramente la specie più importante tanto che le sue praterie sono oggi considerate *habitat* primario di interesse comunitario dalla Direttiva Habitat (92/43/CEE) (Cerrano et al, 2004).

Endemica del Mediterraneo questa fanerogama costituisce uno dei climax di questo bacino ed uno degli ecosistemi più produttivi della fascia costiera occupando una superficie compresa tra i 25.000 km² ed i 50.000 km² pari a circa il 25% dei fondali marini compresi tra 0 e 40 metri di profondità (Borum, Duarte, Krause-Jensen and Greve, 2004).

In questo ultimo secolo, il crescente impatto antropico (pressione demografica, urbanizzazione, industrializzazione, inquinamento e cambiamenti climatici globali) ha fatto sì che gli ecosistemi litorali, e quelli a *Posidonia oceanica* in particolare, fossero tra i più minacciati e soggetti a fenomeni di forte degrado tanto che la *Posidonia oceanica* è attualmente inserita nella lista delle specie in pericolo o minacciate acclusa alla Convenzione di Barcellona.

Tali premesse hanno reso sempre più forte la necessità di approfondire le conoscenze sulla biologia e la fisiologia di questa pianta allo scopo di comprendere anche i complessi meccanismi che sono alla base del suo ecosistema.

In quest'ottica il presente lavoro è parte di una ricerca multidisciplinare e pluriennale iniziata nel 2004, attualmente ancora in corso, e relativa ad un progetto di espianto, trapianto,

mantenimento e monitoraggio di esemplari di *Posidonia oceanica* nel tratto marino compreso tra i comuni di Civitavecchia (RM) e Santa Marinella (RM).

Tale progetto, che ha interessato 300.000 talee distribuite su una superficie complessiva di 10.000 m², ha fornito la possibilità di analizzare una enorme quantità di materiale fogliare restituendo una cospicua base di dati sia morfometrici che di accrescimento derivati da procedure di marcatura mediante metodo di Zieman (1974).

La disponibilità di questa estesa quantità di informazione fenologica, nonché di quella derivata da un intenso lavoro di recupero di *database* storici disponibili, ha rappresentato lo spunto per realizzare una analisi preliminare dei dati relativi ai tassi di accrescimento fogliare della prateria oggetto di studio, ma soprattutto per verificare e sviluppare applicazioni modellistiche anche innovative. Ciò non come puro esercizio teorico, quanto piuttosto come strumento di utilità pratica per lo studio e la valutazione dello stato funzionale (produzione) delle praterie di *Posidonia* attraverso l'analisi di descrittori strutturali delle stesse come la densità assoluta dei fasci e la morfometria fogliare (fenologia) in termini di dinamica delle variazioni stagionali.

D'altro canto la produzione primaria espressa dalle praterie di *Posidonia* è attualmente stimata in maniera indiretta sulla base di una serie di relazioni empiriche (lepidocronologia) non sempre soddisfacenti tanto da indurre nel corso delle attività di questo progetto anche ad un approfondimento delle procedure lepidocronologiche in termini di riproducibilità ed affidabilità del metodo, mentre una l'analisi più approfondita delle relazioni tra la lunghezza delle foglie e quella della scaglia ha rappresentato l'oggetto di un altro progetto di dottorato.

La principale linea di ricerca di questo lavoro è stata dunque, la valutazione dei processi di crescita delle foglie di *Posidonia oceanica* sia attraverso metodi descrittivi che simulativi.

L'obiettivo primario è stato infatti, quello di formalizzare un modello analitico *ad hoc* capace di descrivere i principali processi di accrescimento delle foglie di *Posidonia* mediante la simulazione della dinamica stagionale delle fasi di espansione, longevità e senescenza dei suoi lembi fogliari. Le importanti differenze in termini fisiologici e di *pattern* di crescita, della *Posidonia oceanica* rispetto alle altre fanerogame marine, hanno reso e rendono infatti, ancora molto difficile l'applicazione a quest'ultima, di modelli già disponibili e sviluppati per altri generi di fanerogame.

Per quanto il modello implementato non preveda un approccio “*whole-plant*”, è indubbio che esso può rappresentare la prima essenziale componente di un modello più completo e complesso in cui la parte fogliare potrà essere complementata in un prossimo futuro, anche da un modello di crescita dei rizomi.

Contestualmente a questi aspetti, nel corso del progetto sono state sviluppate come linee collaterali di approfondimento, anche altre attività comunque connesse alla valutazione dello stato morfo-funzionale delle praterie di *Posidonia*:

- uno studio finalizzato alla stima e alla previsione dei valori attesi di densità assoluta dei fasci delle praterie di *Posidonia* mediante l'applicazione di modelli empirici;
- uno studio comparativo sulla affidabilità e riproducibilità del metodo lepidocronologico.

Nel primo caso, nel tentativo di definire lo strumento modellistico migliore capace di modellizzare i valori di densità assoluta sulla base di alcune variabili ambientali (binarie, categoriche e quantitative) espressione dell'assetto del sistema fisico al contorno, sono state paragonate le *performance* di 6 diversi approcci modellistici distinti tra tecniche di *Machine Learning* (*Classification Tree*, *Neural Networks*, *Case-Based Reasoning*, *Regression Tree*) e metodi regressivi (*Multiple Regression* e *General Additive Models*).

I risultati ottenuti hanno evidenziato le maggiori potenzialità delle ANNs (*Artificial Neural Networks*) e del CBR (*Case-Based Reasoning*), entrambi di recente introduzione in campo ecologico, rispetto agli altri metodi statistici.

I metodi utilizzati in tale lavoro, ed i risultati ottenuti, sono stati presentati in una comunicazione alla 5° Conferenza Internazionale di Ecologia Informatica (“*A machine learning approach to seagrass density modeling*”. ISEI5- Santa Barbara, CA, USA - 2006). In allegato è riportata una bozza del manoscritto attualmente in preparazione.

Nel secondo caso invece, la vastità del materiale vegetativo da analizzare a disposizione, ha consentito di complementare le attività di laboratorio (analisi lepidocronologiche e valutazioni dei valori di produzione primaria), svolte sui campioni recuperati nelle fasi del monitoraggio distruttivo del progetto di trapianto delle praterie del litorale laziale (Civitavecchia e Santa Marinella), con una analisi più approfondita della validità del metodo. I risultati ancora preliminari, sono stati interrogativi, ma in linea con le ipotesi formulate circa alcune perplessità sulla affidabilità di questo strumento di valutazione.

Ulteriori approfondimenti saranno condotti in questo senso in un prossimo futuro su sequenze di rizomi più lunghe (> 20 anni) di quelle rese disponibili per questo studio.

Nel complesso, per quanto sviluppata a diversi livelli di indagine e da differenti prospettive, la totalità delle attività svolte in questo progetto di dottorato, ha avuto come scopo ultimo soprattutto quello di approfondire la possibilità di applicare e/o sviluppare approcci modellistici adeguati da utilizzare come strumenti efficaci di ausilio all'avanzamento della comprensione dello stato funzionale delle praterie di *P. oceanica* e fornire conseguentemente un valido supporto alle attività di regolamentazione, modulazione e gestione degli interventi antropici sulla fascia costiera e sugli ecosistemi che la caratterizzano.

1.1. La *Posidonia oceanica*

1.1.1. La pianta: caratteristiche morfologiche, fisiologiche ed ecologiche

La *P. oceanica* è una fanerogama longeva a crescita lenta.

Caratterizzata da una netta differenziazione in radici, fusto (rizoma) e foglie, i processi di accrescimento che la caratterizzano sono ineguali per ciascuna delle sue parti. I rizomi infatti, si allungano abbastanza lentamente, mentre le foglie crescono assai più velocemente e mostrano una evidente stagionalità. Come le foglie, anche le radici avventizie presentano una crescita ed uno sviluppo con evidente andamento stagionale.

I rizomi, che costituiscono un fusto modificato sotterraneo simile nell'aspetto ad una radice ma dotato di foglie, hanno la funzione di trasportare i sali nutritivi alla componente fogliare, di immagazzinare i materiali di riserva ed unitamente alle radici, di rappresentare il sistema di ancoraggio della pianta. Possono accrescersi sia in direzione orizzontale (crescita plagiotropa), che verticale (crescita ortotropa) (Molinier & Picard, 1952; Caye, 1980) consentendo alla pianta di adottare una diversa strategia di crescita in funzione delle condizioni ambientali. La crescita orizzontale è infatti, pioniera permettendo alla pianta di conquistare o riconquistare spazio, mentre quella verticale le consente di crescere anche in assenza di spazio. È stato stimato che la crescita dei rizomi plagiotropi è di circa 4 cm all'anno, mentre quelli ortotropi non crescono più di 1 cm all'anno. Va sottolineato però, che in una stessa stazione, l'allungamento annuale è molto variabile da una stagione all'altra, da un rizoma all'altro e soprattutto da un anno all'altro con un tasso di crescita compreso tra i 3 ed i 77 mm per anno (Crouzert, 1981; Pergent et al. 1982). In pratica, l'estensione di una unità vegetativa di *P. oceanica* potrebbe richiedere anche 350 anni per raggiungere un diametro di 15 m.

La componente fogliare è rappresentata invece, da lamine nastriformi, che possono superare il metro di lunghezza (Giraud, 1979). La larghezza varia tra 0.6 e 1.2 cm, mentre lo spessore si assottiglia gradualmente dalla base fino all'apice. Raccolte in fasci in numero variabile da 4 a 8 (Panayotidis & Giraud, 1981), le foglie sono attaccate al fusto con una disposizione a ventaglio (fillotassi distica) cosicché quelle più vecchie (ed in genere le più lunghe) sono le più esterne, mentre quelle giovani (più corte) si trovano in posizione più interna.

Sulla base di questa particolare distribuzione delle foglie nel fascio, è stato possibile stabilire un diverso grado di maturità delle stesse classificandole in adulte, intermedie, giovanili. Nelle foglie adulte si distingue una porzione bruna ed indurita detta “base” di lunghezza variabile tra 2 e 70 mm ed il lembo che rappresenta invece, la parte verde fotosintetizzante. Il limite tra base e lembo fogliare è segnato da una linea concava chiamata “ligula” in corrispondenza della quale le foglie, dopo un periodo di vita compreso tra 5 e 8 mesi (ma più raramente anche 13 mesi) , si staccano cadendo dal ciuffo cui rimane attaccata invece la base. Le foglie intermedie mancano della base essendo costituite dal solo lembo fogliare; la loro lunghezza è convenzionalmente limitata al di sopra dei 50 mm.

Le foglie giovanili infine, non superano mai i 50 mm di lunghezza e sono generalmente incolori o di un verde pallido più o meno traslucide.

La crescita delle foglie si determina per formazione di nuovo tessuto alla base (meristema basale) così che secondo un gradiente di età con andamento parallelo alla lamina fogliare, la porzione apicale rappresenta la parte più vecchia della foglia e quella che prima va incontro a fenomeni degenerativi che si manifestano con una variazione di colore e conseguente rottura degli apici.

La riproduzione di *P. oceanica* avviene sia vegetativamente mediante stolonizzazione o propagazione per talea, sia sessualmente con fecondazione di fiori e maturazioni di semi. Per quanto osservazioni più recenti dimostrino che la fioritura è un fenomeno meno raro di quanto non si pensasse in passato (Thelin & Boudouresque, 1985) e che la relativa rarità delle segnalazioni è la conseguenza dell'assenza di osservazioni piuttosto che di una reale rarità del fenomeno, ancora non è stato possibile stabilire se essa avviene con una periodicità definita e quali sono i meccanismi di insorgenza del fenomeno.

In termini fisiologici, la *Posidonia* ha evoluto una serie di adattamenti morfofunzionali atti a permetterle la vita in mare. In molti degli organi è presente un parenchima aerifero, che facilita gli scambi gassosi, mentre le foglie prive di stomi hanno una cuticola sottile per facilitare la diffusione di ioni e CO₂ e consentire l'assorbimento diretto dei nutrienti.

Come confermato da un sistema radicale poco sviluppato (Ott, 1980), i lembi fogliari della *Posidonia oceanica* rappresentano infatti, un importante mezzo di comunicazione tra l'acqua e la pianta tale che la morfologia stessa della foglia è oggi interpretata come uno specifico adattamento alle sue esigenze nutrizionali.

La struttura nastriforme lunga e sottile favorisce infatti, il movimento dell'intero strato fogliare aumentando la disponibilità di nutrienti presenti nella colonna d'acqua che a contatto con la foglia vengono assorbiti per semplice diffusione.

Di contro le radici consentono a queste piante di vivere anche su substrato anossico in quanto, oltre ad assicurare l'ancoraggio e l'assorbimento delle sostanze nutritive, fungono da organi di riserva dell'ossigeno prodotto per fotosintesi dalle foglie e trasportato dal parenchima aerifero.

Dal punto di vista ecologico la *P. oceanica* è una specie stenoalina particolarmente sensibile alle variazioni di salinità.

In particolare, la crescita e la sopravvivenza dei ciuffi e delle foglie sembra essere negativamente influenzata soprattutto dall'aumento dei valori di salinità, mentre è maggiore la tolleranza verso una riduzione degli stessi (forse come conseguenza della origine terrestre delle fanerogame marine).

I maggiori tassi di accrescimento fogliare si registrano infatti, tra il 25‰ ed il 39‰, mentre una elevata mortalità delle piante è stata riportata per valori superiori a 42‰ ed inferiori a 25‰ con un tasso di mortalità del 100% per salinità pari al 50‰ (Fernandez-Torquemada & Lizaso, 2005).

Malgrado ciò, va comunque ricordato che la *P. oceanica* è stata rinvenuta anche nelle lagune iperaline tunisine (Bahiret el Biban - 46‰ in media ad agosto) e libiche (Farwa - 39-44‰ in funzione del momento stagionale) in cui la vitalità della pianta (numero di foglie prodotte per anno e crescita dei rizomi) è risultata identica a quella osservata in mare aperto (Pergent et Zaouali, 1992; Pergent et Pergent-Martini, 2000; Pergent et al., 2002).

Di contro, questa fanerogama può sopportare ampie variazioni termiche (prossime a 20°C), anche se temperature troppo basse (inferiori a 10°C) o troppo alte (superiori a 28°C) sembrano essere sopportate solo in casi eccezionali, mentre i valori ottimali di temperatura per la sua crescita oscillerebbero tra i 13 ed i 18 °C (Bay, 1984).

La temperatura (Zupo et al., 1997; Setchell, 1929; Tutin, 1942; Phillips et al., 1983; Bulthuis, 1987; Lee and Dunton, 1996) così come la luce (Zimmerman et al. 1994), ma anche la disponibilità di nutrienti (Harlin and Thorne-Miller, 1981; Orth, 1977) e di spazio rappresentano i principali fattori che regolano la variabilità stagionale dei processi di crescita di *P. oceanica*.

Per quanto questa fanerogama colonizzi vaste aree costiere, interessando un ampio “range batimetrico”, la massima profondità alla quale è possibile trovare piante di *Posidonia* è 40-50 metri in acque particolarmente limpide, mentre normalmente la distribuzione batimetrica delle sue praterie va dalla superficie a 30-35 metri.

Riguardo alla tipologia di substrato favorevole all’insediamento di questa pianta, la *Posidonia* si insedia con successo preferenzialmente sui fondali sabbiosi, anche in presenza di una certa aliquota di fango, pur colonizzando non di rado zone caratterizzate da detrito grossolano o addirittura limitate superfici rocciose; in ogni caso necessita di un sedimento minerale con una giusta proporzione di materia organica (Molinier & Picard, 1952).

1.1.2. La prateria: l’ecosistema *Posidonia*

La *P. oceanica* può colonizzare vaste aree di fondo marino formando aggregati monospecifici ad elevata densità chiamati “praterie”. Queste caratterizzano tutto l’infra-litorale mediterraneo e costituiscono un vasto sistema biologico di cui da più di cento anni si cerca di descriverne e comprenderne la struttura ed il funzionamento.

Esse rappresentano un complesso ecosistema caratterizzato da sottili equilibri la cui importanza risiede proprio nella loro estensione, nell’elevata produttività e nella stabilità, (potendo persistere infatti anche migliaia di anni) (Boudouresque e Meinesz, 1982; Arata e Divacco, 1989) e la cui alterazione può avere molteplici effetti negativi sull’intero ecosistema marino costiero.

Le praterie di *Posidonia* possono fissare da 1.5 a 4.5 g di C al giorno tanto da essere considerate sito primario di fissazione biologica del carbonio e l’ecosistema più produttivo di tutto il Mediterraneo (Ott, 1980). Esse rappresentano un punto nodale nel flusso energetico dell’ecosistema litorale per la trasformazione e l’accumulo dell’energia indispensabile al sostentamento di un sistema complesso ed altamente strutturato. Nelle praterie di *Posidonia*, l’interazione tra comunità biotica ed ambiente fisico avviene infatti, in modo tale che un flusso di energia porta ad una ben definita strutturazione della comunità biotica ed ad una ciclizzazione dei materiali tra viventi e non viventi all’interno del sistema (Odum, 1983).

L’energia prodotta viene investita in *primis* dalla pianta nelle sue attività riproduttive e di accrescimento e successivamente, secondo molteplici canali, fluisce nelle zone

ecologicamente circostanti, anche utilizzando al meglio le strategie preda-predatore degli organismi che ne popolano l'ecosistema, fino ad innescare una fiorente via del detrito.

L'elemento cruciale di tale ecosistema è da individuare nella pianta stessa che con le sue caratteristiche fenologiche, la sua dinamica di crescita e la sua ripartizione della biomassa, costituisce un *habitat* multidimensionale ed un supporto fisico e trofico per comunità vegetali e animali molto diversificate (Ott, 1980; Pergent et al., 1994; Pergent-Martini et al., 1994; Boudouresque e Meinezs, 1982), influenzando in modo significativo la composizione e la struttura delle comunità ad essa associate (Chimenz et al. 1989).

In pratica, la prateria di *Posidonia* costituisce (Molinier, 1960; Peres & Picard, 1964; Fresi et al., 1979) una biocenosi estremamente originale (se non unica) e ben definita rappresentata da una combinazione caratteristica di gruppi ecologici (fotofili, sciafili ed endogei) con strette relazioni trofiche: il *Posidonietum oceanicae* FUNK.

La presenza delle piante di *Posidonia* amplifica la superficie disponibile e la complessità strutturale del fondo marino (Buia et al., 2000) tanto che le praterie di *Posidonia* rivestono un ruolo fondamentale come rifugio e come luogo dove molte specie di pesci ed invertebrati si alimentano, si riproducono e crescono (Buia et al., 2000; Mostafa, 2000).

Studi effettuati sulla fauna associata a *Posidonia* ne hanno rivelato una grande ricchezza (specifica e numerica) in confronto ai fondi molli privi di copertura, ed ai fondi duri. Questa ricchezza è dovuta alla presenza, all'interno della prateria, di differenti microclimi: lo strato fogliare, lo strato dei rizomi e lo strato del sedimento.

In particolare lo strato fogliare rappresenta un substrato altamente dinamico con tempi di *turn-over* piuttosto elevati ed un compartimento ad alta produttività. Malgrado ciò è soggetto solo in minima parte ad erbivoria diretta.

L'elevata percentuale di carboidrati strutturali presenti nel tessuto appaiono, infatti, poco disponibili al consumo da parte degli erbivori (Pirc, 1989; Lawrence et al., 1989). Solo una piccola porzione della biomassa generata dalla *P. oceanica* viene mangiata allo stato "fresco".

Le foglie più vecchie e più esterne vengono attaccate da pochissime specie apparentemente non selettive come, per esempio, l'osteito *Sarpa salpa*, che brucia le foglie, alcuni crostacei isopodi ed il riccio di mare *Paracentrotus lividus* considerato, classicamente il consumatore

più importante delle foglie di *Posidonia*, anche in relazione agli episodi di notevole riduzione di biomassa fogliare che è in grado di provocare (Verlaque & Nedelec, 1983).

Tale biomassa fogliare rimane dunque, pressoché intatta fino a quando (in autunno) le foglie, ormai vecchie, si staccano alla base e muoiono.

Per quanto l'alto valore del rapporto C/N nelle foglie morte e nel detrito fogliare dimostri un alto grado di resistenza (Pirc & Wollenweber, 1988), tale biomassa è sottoposta a due tipi di frammentazioni, una di tipo meccanico dovuta all'idrodinamismo e all'attività di numerosi invertebrati e l'altra di tipo chimico (decomposizione batterica). Solamente in questa fase l'energia chimica contenuta nel carbonio organico detritale si rende disponibile agli organismi detritivori, che assimilano sostanza organica viva come detrito.

Ma la lamina fogliare assume ulteriore importanza nei flussi energetici che attraversano l'ecosistema, nonché nella strutturazione della biocenosi che la caratterizza in quanto è senza dubbio un substrato valido ed efficace per tutta una serie di organismi, sia vegetali che animali che vivono sulla pianta e hanno relazioni nutrizionali più o meno stabili con tale substrato.

Poiché la *P. oceanica* è assimilata allo stato "fresco" solo in minima parte, la pianta, in vita, non è in grado di alimentare i comparti superiori se non indirettamente. Pertanto, la biomassa vegetale disponibile è soprattutto quella delle alghe epifite; in assenza di queste diventa di fondamentale importanza il *film* batterico presente sulla foglia che, in alcuni casi, insieme alle diatomee bentoniche, è in grado di sostenere gran parte della rete trofica.

In aggiunta, anche il detrito fogliare e le scaglie rappresentano un *microhabitat* unico e preferenziale per molti organismi detritivori e perforatori. Esso contribuisce nello stesso tempo anche all'equilibrio dei litorali, alla stabilizzazione del fondale (insieme a rizomi e radici) ed al contenimento dell'erosione costiera mediante l'attenuazione dell'azione delle correnti e del moto ondoso (Gambi et al., 1989).

Ma l'ecosistema *Posidonia* è caratterizzato da equilibri sottili e molto complessi che lo rendono estremamente sensibile al disturbo ambientale ed antropico e quindi un ottimo indicatore di qualità in senso lato (Bellan-Santini et al., 1994).

Le caratteristiche fisiologiche ed ecologiche della prateria, delle piante che la compongono e dei popolamenti animali e vegetali che in essa vivono, fanno sì che il loro studio, in qualità di

descrittori sintetici delle caratteristiche ambientali di un sito, permetta di identificarne eventuali gradienti, *stress* o alterazioni.

Purtroppo, la documentata regressione delle fanerogame marine mediterranee ed in particolare della *P. oceanica*, non può non rappresentare il punto di partenza di una sorta di reazione a catena i cui molteplici effetti negativi sull'economia delle zone costiere sono peraltro ancora in parte sconosciuti.

Ne consegue che la conservazione ed il monitoraggio di questa pianta e del particolare ecosistema che essa crea sono di primaria importanza.

Ancora oggi si impone dunque, la messa a punto di ampi ed approfonditi studi per la caratterizzazione di tali ecosistemi al fine di verificarne il grado di integrità quale bene ambientale di interesse generale.

1.1.3. I patterns di crescita di *P. oceanica*: analisi della letteratura storica

Una gran parte degli studi svolti dall'inizio degli anni '60 e nei 30 anni successivi, ha avuto come oggetto principale l'analisi della dinamica di crescita delle foglie di *P. oceanica* (Molinier & Zevaco, 1961; Molinier & Zevaco, 1962; Ott, 1979; Panayotidis & Giraud, 1981; Bay, 1984; Buia, Zupo e Mazzella, 1992) a due diversi livelli di indagine: la foglia (accrescimento delle singole lamine fogliari) ed il fascio (processi di rinnovamento ciclico delle foglie all'interno del ciuffo).

Proprio alla luce della letteratura storica disponibile, sono oggi note ampie conoscenze circa le caratteristiche strutturali, morfometriche, di sviluppo e di rinnovamento di tali foglie.

Un'approfondita analisi critica dell'insieme dell'informazione storica disponibile sui processi di crescita di *P. oceanica*, è stata oggetto di una parte non trascurabile delle attività svolte in questo progetto di dottorato.

Il risultato di tale analisi è stato riorganizzato nelle pagine che seguono, come una sorta di descrizione riassuntiva non frammentaria, dello stato dell'arte sull'argomento allo scopo di fornire un quadro di insieme delle conoscenze acquisite nel corso del tempo.

In termini strettamente fogliari, ciascuna foglia di *Posidonia* si allunga per formazione di nuovo tessuto nel meristema posto alla base.

La parte apicale rappresenta quindi la porzione più vecchia e quella che per prima va

incontro a fenomeni di degenerazione.

Tali fenomeni comportano il rilascio da parte del lembo fogliare dei pigmenti fotosintetici con acquisizione di una colorazione bruna. A tale stadio la decomposizione microbica, il *grazing* animale e lo *stress* meccanico provocano una degenerazione del tessuto vegetale, mentre l'apice fogliare morto, talvolta espelle tutto il citoplasma e diviene bianco.

La porzione basale della foglia invece, differisce per colore e consistenza dal lembo e ne è separata da una ligula arcuata.

Il maggiore ispessimento della base deriva dall'esistenza di numerosi cordoni fibrosi che interessano anche il rizoma, ma che si arrestano all'inserzione del lembo. Questa porzione presenta anche sottili labbra dette stipule che, più larghe alla base rispetto alla sommità, racchiudono le basi delle foglie più giovani (Fig. 1).

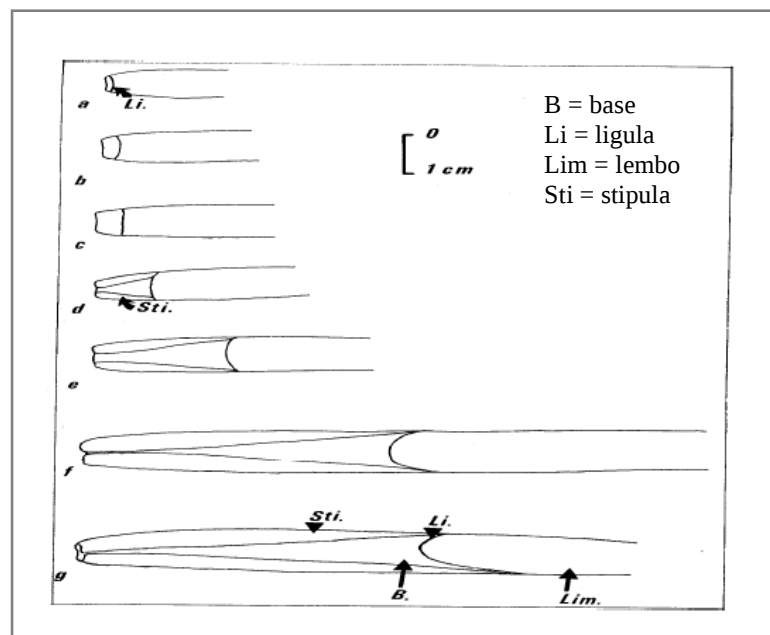


Fig. 1: Stadi di sviluppo della base della foglia adulta (Giraud, 1979).

Queste foglie si trovano all'interno del fascio e differiscono per colore e consistenza da quelle più vecchie.

All'interno dei fasci infatti, le diverse foglie hanno una disposizione a ventaglio (fillotassi distica) con quelle più giovani, sottili e molli, al centro ed alternate da lati opposti, e quelle

più vecchie generalmente più lunghe, all'esterno. In queste ultime il lembo è il primo ad accrescersi e solo in un secondo periodo compare la base che dalla ligula si allunga verso il basso (Fig. 2a, b).



Fig. 2: Scomposizione di un ciuffo di *P. oceanica* (Casola, 2002) secondo l'ordine distico (a) e sua rappresentazione schematica come da output grafico del modello implementato (b).

Il *pattern* di crescita delle lamine fogliari all'interno di ciascun fascio segue una tipica curva sigmoide (Fig. 3).

Nelle foglie giovanili la lunghezza, che può essere misurata (lunghezza apparente), è uguale alla crescita totale della foglia e l'apice si presenta ancora integro ed arrotondato.

Dopo un certo periodo, nel quale la foglia cresce ancora alla massima velocità, l'apice ormai fortemente epifitato, comincia a perdere i pigmenti fotosintetici clorofilliani, diviene bruno mediante l'espulsione di tali pigmenti e muore; l'azione microbica, il *grazing* animale e lo *stress* meccanico lo decompongono poi completamente. La foglia che è ancora in una fase di crescita logaritmica, mostra perciò, un calo nella sua lunghezza apparente finché il deterioramento non uguaglia la crescita; a questo punto la lunghezza apparente rimane

costante e si ha la massima lunghezza ottenibile. Successivamente la foglia diviene più corta ed il deterioramento supera la crescita (Ott, 1980)

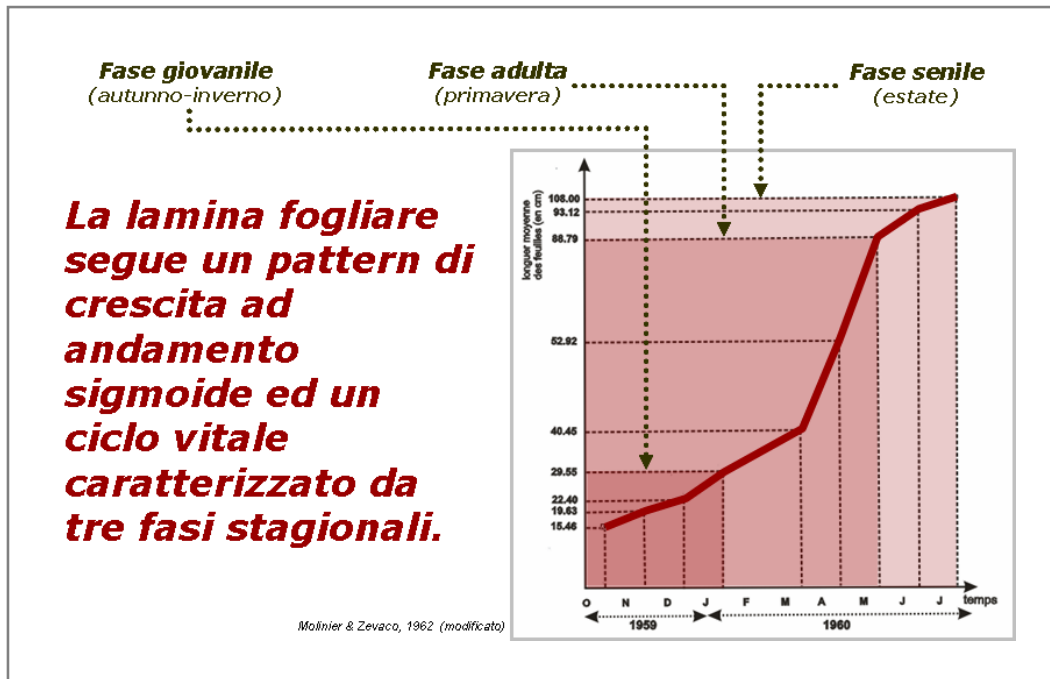


Fig. 3: Pattern di accrescimento della lamina fogliare (Molinier & Zevaco, 1962).

Quando le foglie muoiono si staccano dalla base che invece, rimane attaccata al rizoma perché più resistente, riducendosi a sottili “scaglie” (Grenier, 1860). L’aspetto “peloso” del rizoma è dovuto proprio a questo manicotto di scaglie che lo circonda completamente.

Il ciclo di crescita delle foglie così descritto, conferisce alla prateria un aspetto completamente diverso durante i diversi mesi dell’anno. Numerosi studi sulle modalità di rinnovamento delle foglie hanno mostrato infatti, l’esistenza di un ciclo fenologico ben chiaro, con una evidente stagionalità (Fig. 4). In particolare, le foglie sono caratterizzate da una crescita continua e la comparsa di nuove foglie sembra avvenire durante tutto l’anno, anche se con ritmi completamente diversi. Nei mesi di settembre ed ottobre le violente mareggiate portano via le rimanenti foglie ormai vecchie e fino a dicembre, sembra che l’accrescimento di quelle intermedie sia molto ridotto o quasi inesistente; in questo periodo è massima invece, la nascita di nuove foglie che ringiovaniscono l’intero ciuffo.

Nei mesi successivi fino ad aprile la crescita delle foglie intermedie, nate nella stagione precedente, comincia ad aumentare lentamente finché, con la primavera, raggiunge il suo massimo; la crescita sembra accelerata e l'intera prateria risulta verde, lucente e ancora completamente integra.

In estate la crescita appare più lenta ed è solamente a giugno che le foglie intermedie si trasformano in adulte, sviluppando la loro base.

Dopo una breve pausa, tra giugno e luglio, le prime foglie della nuova generazione compaiono ad agosto, mentre le più vecchie, dell'ultima generazione che hanno rallentato il loro accrescimento, sono presenti ancora sulla pianta.

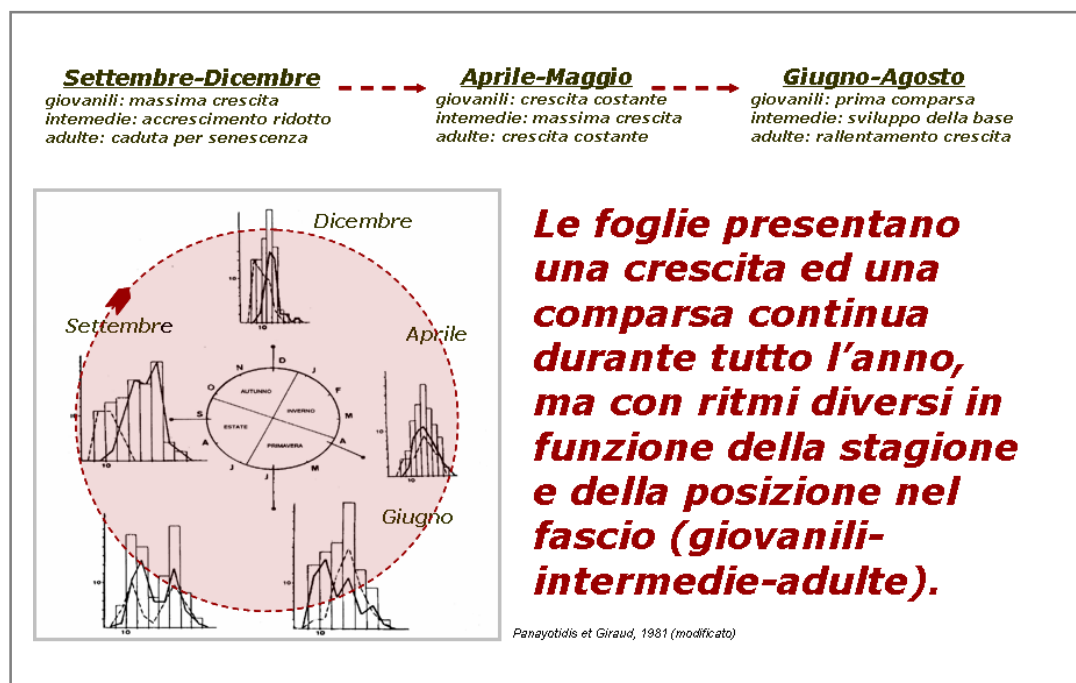


Fig. 4: Ciclo fenologico di rinnovamento delle foglie (Panayotidis & Giraud, 1981).

In questo momento la prateria è fortemente epifitata sia da specie vegetali che animali e perde il colore verde brillante dei mesi precedenti.

Il ciclo così descritto consente di individuare, dal punto di vista morfologico e con un ruolo fisiologico ben distinto, tre differenti categorie di foglie: le foglie giovanili equivalenti ad “embrioni” di foglia, le foglie intermedie pari ad elementi a crescita rapida ed infine, le foglie

adulte paragonabili ad elementi a crescita rallentata che assicurano la fotosintesi e la coesione del fascio (Panayotidis & Giraud, 1981).

1.2. I modelli matematici in ecologia

I fenomeni naturali sono caratterizzati da un'estrema complessità dato che in essi intervengono numerose variabili tutte intrinsecamente connesse in modo non lineare.

Tale complessità e non linearità nelle interazioni fra le componenti dei sistemi naturali ha spesso indotto a servirsi di modelli matematici con cui creare analogie o corrispondenze con i sistemi reali fornendo un'immagine capace di comprenderne uno o più aspetti.

Un modello, è dunque un oggetto usato per rappresentare qualcosa d'altro ed un modello matematico in particolare, è un modello che ha come componenti concetti matematici, quali costanti, variabili, funzioni ed equazioni.

Esso costituisce una rappresentazione idealizzata della realtà che si esprime attraverso una relazione in termini logico-matematici tra le variabili caratteristiche del sistema.

Studiando le proprietà di un modello è possibile comprendere e prevedere l'evoluzione del sistema stesso, le relazioni tra le sue diverse variabili, o capire le conseguenze di un certo intervento, in modo da poter intervenire poi direttamente nella realtà.

Raramente i modelli includono tutti gli aspetti di un fenomeno, ma spesso si limitano a descriverne quelli più essenziali.

In tal modo il modello è non solo più semplice da risolvere, ma anche più utile come strumento per capire la correlazione tra i vari elementi che lo compongono.

Un modello per essere funzionale deve possedere contemporaneamente tre elementi che spesso sono in contrapposizione tra loro: generalità (deve descrivere una classe di fenomeni quanto più ampia possibile), affidabilità (deve descrivere un processo abbastanza accuratamente, in modo che il modello, pur fornendo risultati approssimati, sia abbastanza significativo) e semplicità (deve essere sufficientemente semplice da poter essere risolto matematicamente, ma non troppo da generare simulazioni in disaccordo con i dati sperimentali, risultando quindi di scarsa utilità).

Purtroppo, nessun modello può essere al tempo stesso generalizzabile, semplice ed accurato. Soltanto due di tali proprietà possono essere generalmente ottimizzate simultaneamente ed è

quindi possibile sviluppare modelli semplici e generalizzabili, ma scarsamente accurati, oppure modelli semplici ed accurati, ma non generalizzabili.

In questo quadro generale, la modellistica ecologica si configura come un utile strumento in grado di aiutarci a comprendere le proprietà dell'ecosistema ad ogni livello gerarchico (cellula, organismo, popolazione, comunità, ecosistema).

Nella sua formulazione matematica un modello ecologico si compone di cinque parti fondamentali: le funzioni forzanti (o variabili esterne), le variabili di stato, le equazioni matematiche, i parametri e le costanti.

Così come gli ecosistemi reali che essi simulano, i modelli ecologici hanno una dinamica strettamente legata alle variazioni di grandezze esterne che non sono controllate da parte delle diverse componenti degli ecosistemi stessi. Queste grandezze sono dette funzioni forzanti. Tutte le variabili che descrivono la situazione interna del sistema sono dette invece variabili di stato, mentre gli altri tassi e coefficienti sono i parametri del modello, che si assumono come costanti.

I modelli finalizzati alla simulazione dei processi ecologici ed all'analisi della loro dinamica mediante un approccio meccanicistico e riduzionistico, cioè basato sull'analisi e sulla scomposizione dei processi più rilevanti in un certo numero di sottoprocessi più semplici sono definiti, in ragione dell'approccio utilizzato e dei metodi di calcolo impiegati, come modelli analitici. Questi possono essere utilizzati come base per la costruzione di modelli di gran lunga più complessi, sia mediante l'introduzione di altri processi e di altre variabili di stato, sia mediante l'espansione del livello di dettaglio utilizzato per quelli già considerati.

Una delle principali difficoltà nello sviluppo dei modelli ecologici è da ricercarsi nella definizione di scale spaziali e temporali appropriate, poichè gli ecosistemi reali che vengono simulati spesso non hanno limiti spaziali ben definiti e le loro componenti sono caratterizzate da dinamiche temporali molto eterogenee (es. cicli vitali di ore per le alghe unicellulari o di anni per i pesci).

Non meno delicata è la scelta dei valori dei parametri dei modelli. Molti parametri, ad esempio quelli che traducono dei processi fisiologici, sono noti, almeno in termini di intervalli di variazione, in quanto sono stati misurati direttamente in condizioni naturali o di laboratorio. Tuttavia, data la enorme complessità dei sistemi ecologici, molti altri parametri possono essere stimati soltanto per analogia o in rapporto a considerazioni di tipo teorico.

Anche se i modelli matematici ecologici possono essere usati in chiave previsionale, è soprattutto quando essi vengono impiegati come strumenti di studio e di formalizzazione di ipotesi e di conoscenze che possono contribuire efficacemente all'avanzamento della nostra comprensione dei processi ecologici.

In ogni caso, lo sviluppo di qualsiasi modello si compie in tre fasi successive, spesso reiterate fino al raggiungimento di un risultato soddisfacente.

Tali fasi sono dette, in particolare, di *formulazione*, *calibrazione* e *validazione* (Fig. 5).

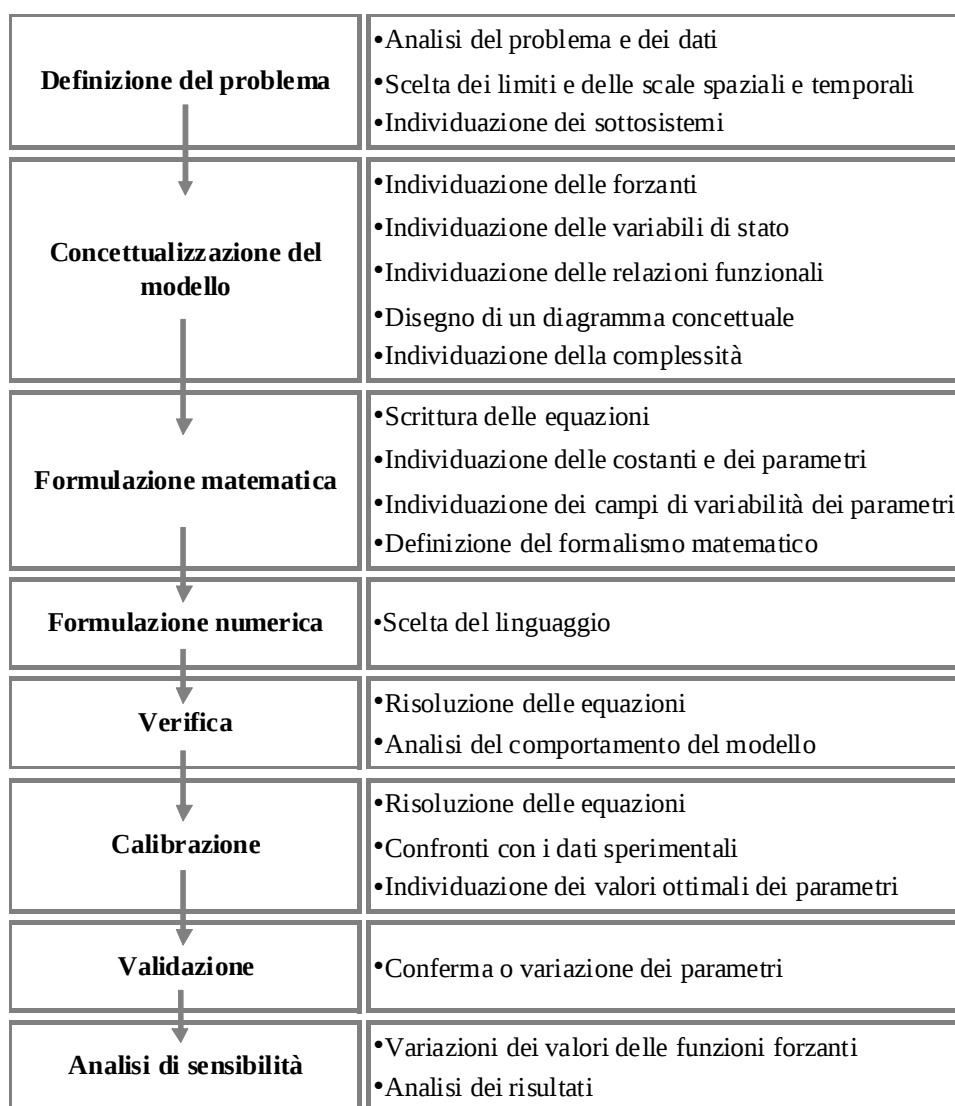


Fig. 5: Procedura per la costruzione di un modello.

La *formulazione* di un modello implica essenzialmente la scelta delle variabili di stato, la conversione in funzioni matematiche più o meno complesse dei processi considerati come rilevanti ai fini della simulazione e la selezione dei parametri e delle scale spazio-temporali più appropriati per le finalità della simulazione stessa. La *calibrazione* del modello viene effettuata invece, facendo variare uno o più parametri ed analizzando la risposta del modello, fino ad ottenere un funzionamento realistico di quest'ultimo. Anche se i valori di molti parametri sono effettivamente disponibili, le semplificazioni adottate in fase di formulazione rendono sempre necessari tali aggiustamenti. La *validazione*, infine, è la procedura mediante la quale si verifica se un modello riesce a riprodurre con sufficiente accuratezza il funzionamento del sistema reale, generalmente in rapporto ad un insieme di dati non utilizzati per la calibrazione del modello.

In particolare, la procedura per la costruzione di un modello può essere schematizzata in una sequenza ben definita che delinea in sostanza il progredire di una ricerca scientifica.

1.2.1. Lo sviluppo fenologico vegetale

La fenologia vegetale (o fitofenologia) è lo studio della periodicità degli stadi di sviluppo e delle fasi biologiche degli organismi vegetali e della relazione di tali cicli con le condizioni climatiche.

Lo studio dello sviluppo vegetale comporta la rilevazione della comparsa e scomparsa degli organi nonché di altre importanti modificazioni nelle funzioni e nell'aspetto degli organismi viventi vegetali durante il loro ciclo vitale.

Essa definisce in modo chiaro, per mezzo delle cosiddette scale fenologiche, quali sono i fenomeni da registrare (es: germinazione, fioritura, caduta delle foglie ecc.), e fornisce delle tecniche riproducibili e generalmente non distruttive per l'effettuazione delle osservazioni stesse.

In pratica, lo studio fenologico si occupa essenzialmente della collocazione temporale delle fasi fenologiche, che nel contesto specifico di questo lavoro si identificano con le fasi di fogliazione e decadimento dei lembi fogliari delle piante di *P. oceanica*.

L'importanza della ricerca fenologica deriva proprio dalla possibilità di sfruttare i principali eventi fenologici, e le relative variazioni temporali, come indicatori degli effetti del *global change* sui sistemi biologici. La fenologia dei vegetali è infatti, un descrittore adeguato dei

fenomeni ambientali e riveste un ruolo fondamentale nell'elaborazione di modelli di simulazione di ecosistemi, tanto su scala regionale, quanto su scala globale.

La modellazione matematica della fenologia (*computational plant models or virtual plants*) costituisce oggi, un importante complemento all'attività di osservazione fenologica.

1.2.2. La modellizzazione della dinamica di crescita nelle fanerogame marine

Banks e Carson (1984) hanno definito la simulazione come l'imitazione di un processo o di un sistema reale nel tempo capace di determinare la creazione di “una storia artificiale” del sistema stesso, permettendone una valutazione allo scopo di operare inferenze concernenti le sue caratteristiche operative.

Negli ultimi 30 anni, parte della letteratura relativa alle fanerogame marine, non solo mediterranee, ha avuto come obiettivo lo sviluppo di modelli di simulazione della dinamica stagionale dei *patterns* di crescita della biomassa vegetale, della evoluzione temporale dei tassi di accrescimento, nonché dei flussi dei nutrienti in esso implicati (Short, 1980; Zimmerman et al., 1987; Bach, 1993; Madden and Kemp, 1996; Bach et al., 1997; Bocci et al., 1997; Coffaro and Sfriso, 1997; Zupo et al., 1997; Elkalay et al., 2000).

La maggior parte di questi modelli sono stati implementati per fanerogame (Bocci et al., 1997; Best et al., 2001; Brigolin, 2003, Zharova, 2001) diffuse anche in ambienti lagunari (*Zostera marina*, *Zostera noltii*, *Cymodocea nodosa*), dove negli ultimi anni sono stati registrati preoccupanti processi regressivi.

I modelli attualmente sviluppati sono stati comunque, concentrati soprattutto su specie di zone temperate ed in particolare su *Zostera marina* (Bach, 1993; Wetzel & Neckles 1986) anche se non mancano studi di modellizzazione sui processi evolutivi a carico della biomassa di altre specie come *Potamogeton perfoliatus* (Madden & Kemp, 1996), *Potamogeton pectinatus* (Best et al., 2003), *Ruppia maritima* (Teixeira da Silva, 2001) e *Halodule wrightii* (Fong & Harwell, 1994; Fong et al., 1997).

Alcuni di questi modelli sono stati implementati per comprendere gli effetti della componente vegetale macrofita sull'ambiente circostante e viceversa (Best, 1990; Carr et al. 1997), talvolta sono stati finalizzati alla descrizione di tale vegetazione nel suo complesso senza fare differenze tra le varie specie, in tanti altri casi invece, sono stati rivolti a singole

specie sulla base della disponibilità di specifici dati fisiologici e morfologici (*Potamogeton pectinatus* L.: Scheffer et al., 1993; Van Dijk and Janse, 1993; Hootsmans, 1994; Asaeda and Van Bon, 1997; Hootsmans, 1999; *Ruppia cirrhosa* Petagna (Grande): Calado and Duarte, 2000; *Zostera marina* L.: Short, 1980; Verhagen and Nienhuis, 1983; Wetzel and Neckles, 1987; Bach, 1993).

Nel complesso l'analisi della letteratura disponibile sull'argomento rivela una impostazione abbastanza ricorrente nell'impianto concettuale, nella scelta delle componenti del modello (variabili di stato, funzioni forzanti, parametri) e nella formalizzazione matematica (prevalentemente sistemi di equazioni differenziali).

La struttura di tali modelli matematici si basa principalmente su due variabili di stato: la biomassa del "comparto" epigeo, e quella del "comparto" ipogeo, (formato da rizomi e radici), cui in alcuni casi si aggiunge quella dell'epiflora di ciascuno dei due compartimenti.

L'evoluzione stagionale di tali biomasse è considerata condizionata prevalentemente da due funzioni forzanti: la temperatura dell'acqua e la radiazione solare incidente che raggiunge le foglie, considerate entrambi fattori chiave nella regolazione della crescita delle fanerogame (Pérez e Romero, 1992).

In particolare, l'azione delle forzanti sulla crescita risulta generalmente simulata attraverso un modello di tipo moltiplicativo, dove il tasso di produzione specifico massimo viene limitato da ciascuna di esse indipendentemente e dalla capacità portante del sistema. (Bach, 1993).

In figura 6 (a e b) è riportata in forma più o meno semplificata la rappresentazione diagrammatica delle interazioni tra le principali componenti di tali modelli. I rettangoli indicano le variabili di stato, mentre le frecce rappresentano i flussi tra le variabili ed i fattori limitanti per il processo. Le funzioni forzanti sono riportate a margine del diagramma.

1.2.3. I patterns di crescita di *P. oceanica*: approcci modellistici

Malgrado la vasta quantità di lavori sviluppati sulla simulazione della dinamica di crescita delle fanerogame marine, per la *P. oceanica* la letteratura disponibile è invece, particolarmente ridotta tanto che negli ultimi dieci anni si può far riferimento a soli tre studi ad approccio modellistico di reale interesse.

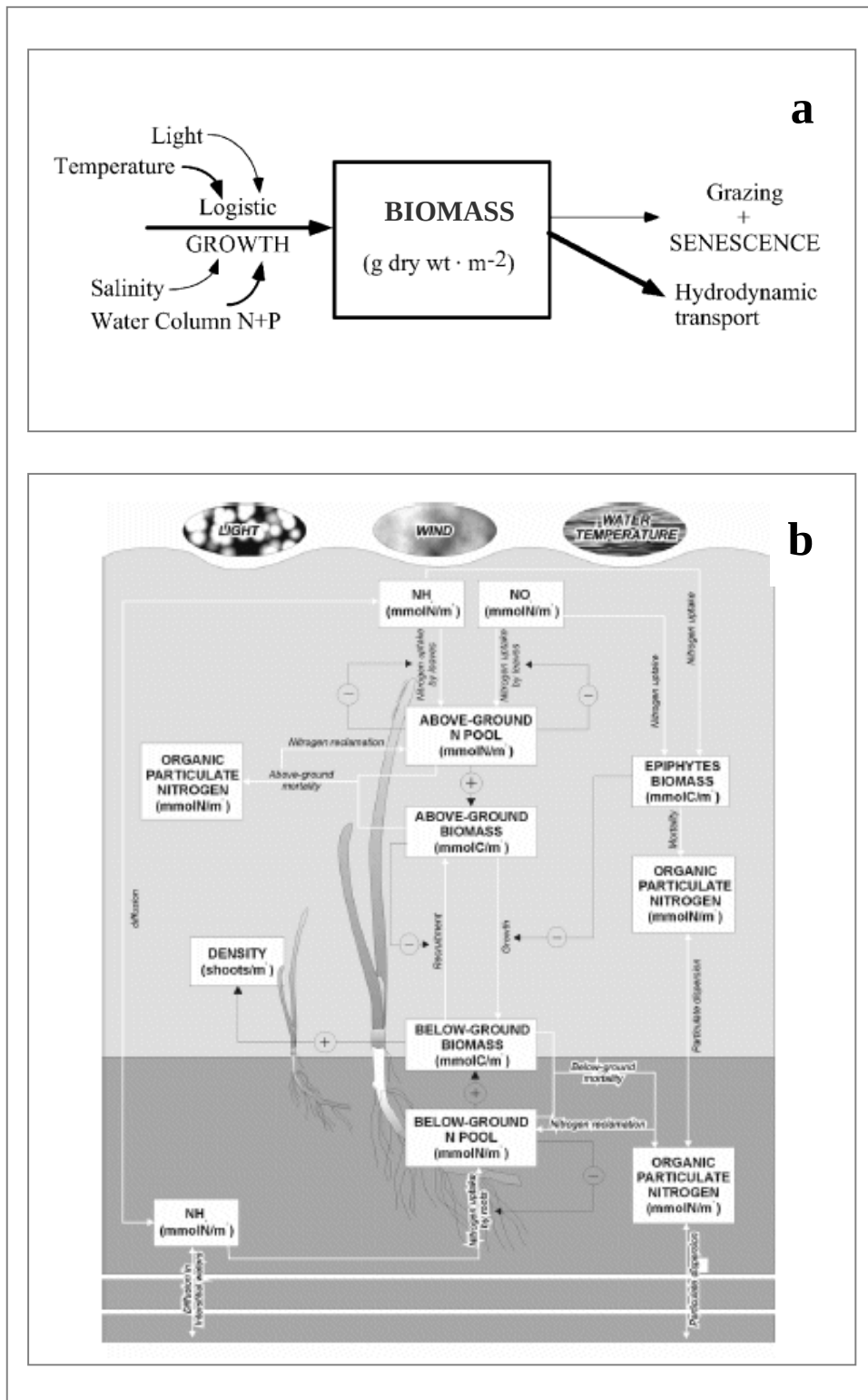


Fig. 6: Esempi di diagramma concettuale: Biber, 2004 (a), Plus, 2003 (b).

Il primo lavoro risalente alla metà degli anni '90 (Zupo et al., 1997), fa riferimento alla implementazione di un modello matematico di simulazione basato sulla dinamica di accrescimento ed apparizione di nuove foglie di *Posidonia* ed i relativi effetti della temperatura su questi due efficienti descrittori fenologici.

Mediante un sistema di equazioni differenziali e prendendo in considerazione la data di apparizione di ciascuna foglia e la temperatura dell'acqua, viene calcolata l'età ed i tassi di allungamento giornaliero dei lembi fogliari successivamente trasformati in unità di peso di nuovo tessuto prodotto.

Il modello applicato ad una serie storica (quattro anni) di valori mensili di temperatura misurati nella prateria di Ischia (Mar Tirreno - Italia meridionale), fornisce anche una simulazione a lungo termine della crescita delle foglie di *Posidonia* nella area studiata.

I risultati confermano che sia i tassi di apparizione che di allungamento di nuove foglie variano in funzione del rango fogliare essendo più elevati nelle foglie più giovani (seconda e terza foglia). Inoltre la variabilità stagionale della temperatura rivela una scala temporale fortemente correlata a quella dei processi produttivi della pianta sia in zone profonde che superficiali.

In pratica, la temperatura modulerebbe i *patterns* di produzione stagionali regolando la variabilità stagionale della crescita più della luce e dei nutrienti.

Un approccio più complesso è invece, quello sviluppato nel lavoro di Elkalay (Elkalay et al., 2003) basato su un modello volto a descrivere i processi di sviluppo e le variazioni di biomassa e di crescita della *P. oceanica*, sia nelle sue componenti ipogee (radici, rizomi) che epigee (foglie, epifiti) in relazione ad alcune funzioni forzanti (luce, temperatura, disponibilità dei nutrienti e di spazio, ecc.).

Tale modello rappresenta al momento, l'unico tentativo di cercare di eliminare il *gap* tra i modelli già esistenti contemplando un approccio allo studio della dinamica di crescita dell'intera pianta mediante la modellizzazione dei suoi processi di accrescimento e di variazione di biomassa.

Le variabili di stato e le funzioni forzanti prese in considerazione in questo modello sono schematicamente riportate nella rappresentazione di figura 7.

La crescita netta viene definita come il risultato del bilanciamento tra processi produttivi (che accumulano biomassa) e degenerativi (che consumano biomassa) che intervengono in

ciascuno dei tre compartimenti considerati (radici e rizomi, foglie, epifiti) e delle loro interazioni sotto l'influenza di un ampio *range* di fattori fisici (temperatura, irradianza), chimici (es: concentrazioni di azoto in sedimento, colonna d'acqua, epifiti, pianta) e meccanici (erbivoria, idrodinamismo).

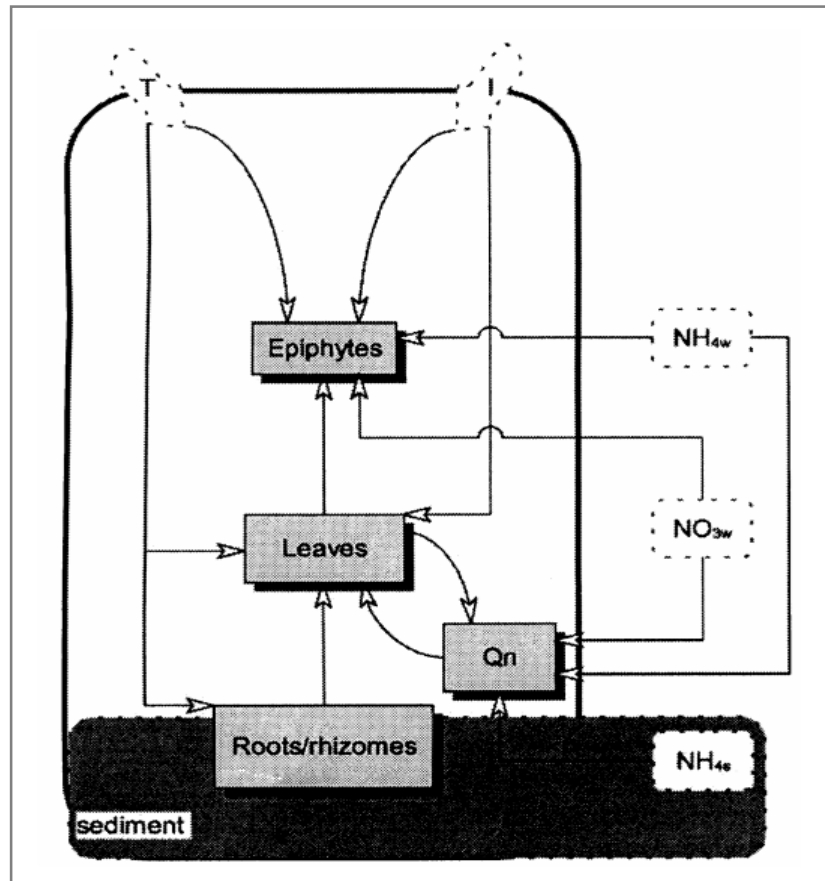


Fig. 7: Diagramma delle interazioni tra variabili di stato e funzioni forzanti (Elkalay, et al., 2003).

Un semplice sistema di equazioni differenziali descrive per ciascuna delle variabili di stato considerate, la variazione di biomassa e di crescita.

Nella sua formulazione più generale tale variazione può essere così riassunta:

$$\frac{d_VS}{dt} = (Gro_VS - trans_VS - Res_VS) \times VS$$

dove per ciascuna variabile di stato (VS), *Gro_VS* rappresenta il tasso di crescita giornaliero, *trans_VS* il tasso di traslocazione tra i vari comparti (foglie-epifiti, rizomi-foglie) e *Res_VS* i processi catabolici giornalieri (tassi di respirazione).

Per ciascun comparto, i tassi di crescita, i processi degenerativi e di senescenza nonché quelli di interscambio risultano strettamente correlati con una o più funzioni forzanti e in stretta relazione con le rispettive variazioni stagionali. Nella sua impostazione così come nel suo sviluppo matematico, tale modello risulta più basato su un approccio mutuato dal comparto pelagico (ed i suoi fattori limitanti) che strettamente legato alla natura della *Posidonia*. Esso rivela comunque, una estrema versatilità ed ampie potenzialità di implementazione per differenti esperimenti di simulazione (Fig. 8).

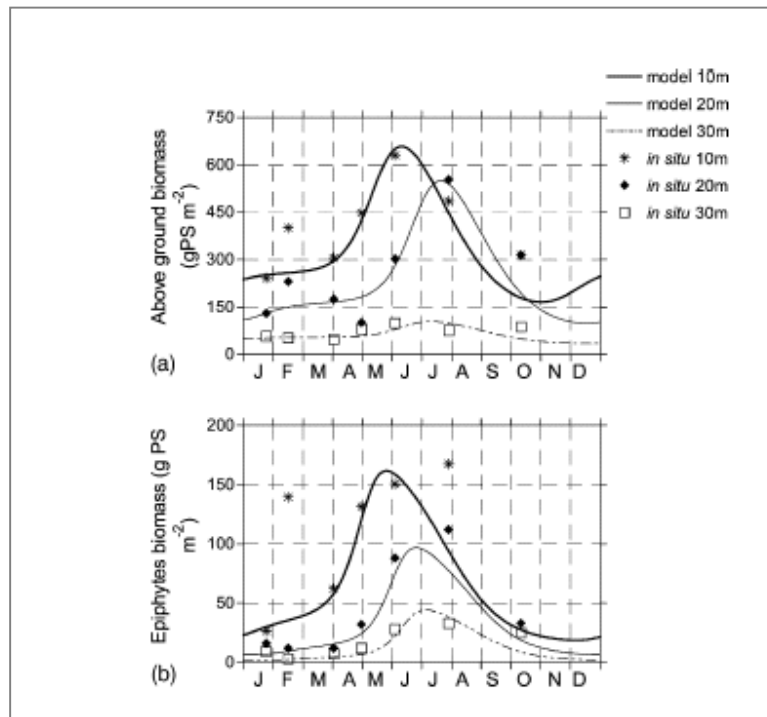


Fig. 8: Valori di biomassa osservati e simulati per foglie (a) ed epifiti (b) (Elkalat, et al., 2003).

Inoltre, dalla implementazione di una analisi di sensibilità, tale modello sembra includere i principali fattori che controllano i processi di crescita e produzione della *P. oceanica* fornendo una ragionevole rappresentazione del suo ciclo stagionale di accrescimento.

Completamente diverso negli obiettivi e nella impostazione è invece, l'approccio alla base del lavoro di Molenaar (Molenaar et al., 2000), in cui i *patterns* di crescita di *Posidonia* sono stati modellizzati in funzione di alcuni aspetti della architettura delle sue piante. Tali modelli architetturali di crescita, noti per varie fenerogame terrestri (de Reffye et al., 1899; Dabadie et al., 1991; Costes et al., 1993), sono stati applicati alla *P. oceanica* allo scopo di quantificarne i processi di crescita in praterie naturali. In particolare, il modello implementato è stato basato soprattutto sui processi di dicotomizzazione dei rizomi, sui tassi di trasformazione degli stessi da plagiotropi ad ortotropi e su quelli di mortalità in funzione dell'età della pianta.

I risultati rivelano che ogni anno lungo i rizomi di *P. oceanica* si verificano, due serie di biforcazioni statisticamente indipendenti (la formazione della prima non modifica affatto la probabilità di verificarsi della seconda), separate da un tempo ben definito e pari a circa 6 mesi, mentre la trasformazione nella direzione di crescita dei rizomi dipende dallo spazio disponibile nella prateria. Inoltre, i risultati ottenuti sarebbero consistenti con l'ipotesi che la crescita ed i processi di biforcazione dei rizomi in *P. oceanica* possono essere controllati da un orologio biologico interno anche se un controllo sulla stimolazione e sulla inibizione di alcune fasi sarebbe molto probabilmente regolata da fattori ormonali in relazione a parametri stagionali quali temperatura dell'acqua, fotoperiodo ed idrodinamismo.

2. MATERIALI E METODI

2.1. La base dei dati

La difficoltà principale nello sviluppo di un modello ecologico non risiede soltanto nella sua formulazione matematica o nella risoluzione computazionale; il problema maggiore è infatti, quello di avere una conoscenza adeguata del sistema che si vuole modellizzare, che permetta la definizione di quali componenti e processi includere nel modello e quali poter trascurare. Alla luce di tali considerazioni, i processi di sviluppo fenologico a carico delle foglie di *P. oceanica* sono stati approfonditamente analizzati grazie alla disponibilità di una ampia base di dati realizzata mediante un lungo ed attento lavoro di recupero e riorganizzazione di *database* storici riferibili ad una discreta quantità di praterie mediterranee. (Fig. 9).



Fig. 9: Distribuzione geografica dei dataset storici analizzati.

In particolare, il *dataset* complessivo contempla, più di 30.000 *records* di dati sulla fenologia fogliare raccolti nel periodo compreso tra la fine degli anni '90 e la metà degli anni 2000 in praterie soprattutto tirreniche, in differenti momenti stagionali. A tale banca dati va aggiunta

la vasta informazione, non solo sui caratteri morfologici, ma anche sui processi di accrescimento, che si è resa disponibile come risultato di un progetto di espianto, trapianto, mantenimento e monitoraggio partito nel 2004 e tuttora in corso, che ha interessato le praterie di *Posidonia oceanica* nel tratto marino compreso tra i comuni di Civitavecchia (RM) e Santa Marinella (RM). Il *dataset* completo è stato uniformato così che in ciascun *record*, corrispondente ad un punto stazione, fossero riportate le informazioni sul periodo di campionamento, la profondità, la posizione della foglia nel fascio (rango), la sua larghezza e la sua lunghezza, l'estensione in centimetri del tessuto verde, del bruno e del bianco, lo stato dell'apice (eroso o integro), la tipologia fogliare (adulta, intermedia, giovanile) (Fig. 10).

località	mese	stagione	stazione	profondità	ciuffo	foglia	larghezza	lunghezza	ligula	lembo	verde	bruno	bianco	apice	tipo foglia
CV_approdi	dicembre	inverno	1	6	1	1	0.2	0.1	0	0.0	0.0	0.0	0.0	1	J
CV_approdi	dicembre	inverno	1	6	1	2	0.4	0.3	0	0.0	0.0	0.0	0.0	1	J
CV_approdi	dicembre	inverno	1	6	1	3	0.9	2.6	0	0.2	0.2	0.0	0.0	1	I
CV_approdi	dicembre	inverno	1	6	1	4	1.0	7.7	0	4.6	4.6	0.0	0.0	1	I
CV_approdi	dicembre	inverno	1	6	1	5	1.0	14.0	0	9.8	9.8	0.0	0.0	1	I
CV_approdi	dicembre	inverno	1	6	1	6	1.0	22.3	0	18.5	18.5	0.0	0.0	1	I
CV_approdi	dicembre	inverno	1	6	1	7	1.0	25.9	0	22.0	22.0	0.0	0.0	0	I
CV_approdi	dicembre	inverno	1	6	1	8	1.0	19.0	1	15.9	15.9	0.0	0.0	0	A
CV_approdi	dicembre	inverno	1	6	1	9	1.0	15.3	1	12.2	10.4	1.8	0.0	0	A
CV_approdi	dicembre	inverno	1	6	2	1	0.2	0.1	0	0.0	0.0	0.0	0.0	1	J
CV_approdi	dicembre	inverno	1	6	2	2	0.3	0.2	0	0.0	0.0	0.0	0.0	1	J
CV_approdi	dicembre	inverno	1	6	2	3	0.8	0.9	0	0.0	0.0	0.0	0.0	1	J
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

Fig. 10: Estratto del dataset dei parametri fenologici.

Dell'intera banca dati una porzione relativa ai dati fenologici delle praterie del litorale tirrenico laziale (circa il 20%) è stata utilizzata nella fase conclusiva di validazione come *set* di dati indipendente su cui testare quanto bene l'*output* del modello fittava i dati osservati.

La restante parte del *dataset* è stata impiegata per l'implementazione preliminare del modello.

2.2. Il modello di crescita delle foglie di *P. oceanica*

2.2.1. Il diagramma concettuale e la formulazione matematica

Sulla base delle conoscenze acquisite dai dati disponibili e dalla letteratura storica, ed alla luce di quanto delineato negli studi di più recente impostazione modellistica, è sembrato utile sviluppare un percorso di analisi ed approfondimento dei processi di espansione ed erosione delle foglie di *P. oceanica* che avesse come obiettivo ultimo la formalizzazione di un modello capace di descriverne la dinamica stagionale di accrescimento.

In particolare, l'impianto teorico generale su cui è stato sviluppato il modello concettuale (Fig. 11) presuppone una fase iniziale in cui la foglia di nuova apparizione nel fascio (giovane) presenta una lunghezza uguale alla sua crescita totale (1).

Nel periodo successivo di allungamento, la foglia cresce alla massima velocità anche se l'azione microbica, il grazing animale e lo stress meccanico iniziano a favorirne la decomposizione nella porzione apicale con formazione di tessuto bruno (2).

Per quanto ancora in rapida crescita, la foglia mostra successivamente un calo di lunghezza finché il deterioramento non ne uguaglia la crescita. In questa fase la lunghezza che rimane costante, raggiunge il massimo valore ottenibile (3).

Successivamente, il deterioramento del lembo fogliare supera la crescita e la foglia riduce la sua lunghezza divenendo via via più corta (4).

Nell'ipotetico diagramma concettuale appena descritto (Fig.11) è riportato oltre alla variazione della lunghezza della foglia, anche lo schema generale dell'andamento nel tempo del tasso di accrescimento fogliare e, per ciascuna fase di crescita, alcuni dei fattori limitanti potenzialmente responsabili di influenzare lo stato della variabile considerata. In pratica, la dinamica di crescita di una foglia di *P. oceanica* è il risultato del bilanciamento dei processi di espansione a carico del tessuto verde e del tessuto bruno presenti sul lembo fogliare, ciascuno caratterizzato da una fase di crescita e di accorciamento in funzione del momento stagionale e/o di fattori casuali. A partire da tali considerazioni si è delineato quindi, un modello basato sullo sviluppo di due componenti (lunghezza del tessuto verde, lunghezza del tessuto bruno) ciascuna a sua volta, descrivibile attraverso una fase di accrescimento ed una di accorciamento (Fig. 12).

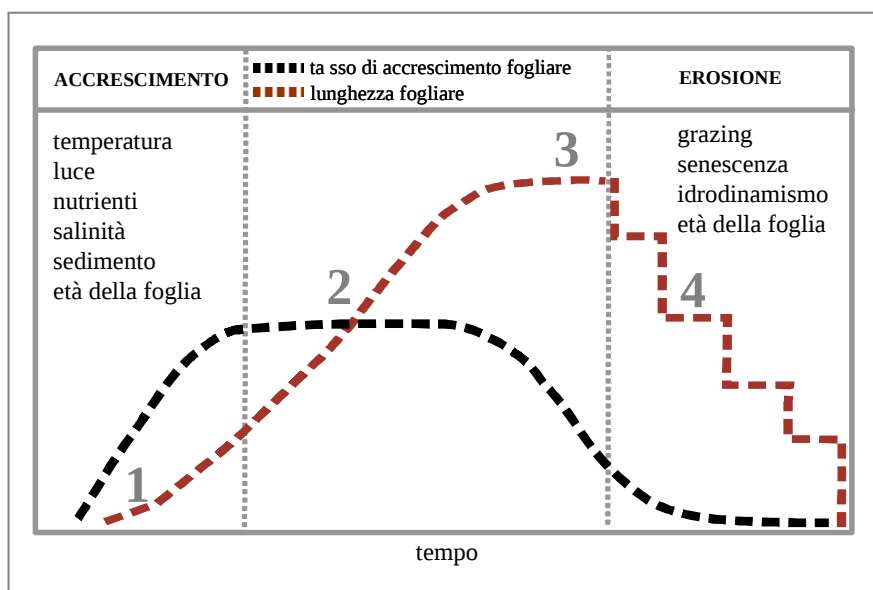


Fig. 11: Impianto teorico del modello di crescita delle foglie di *P. oceanica*.

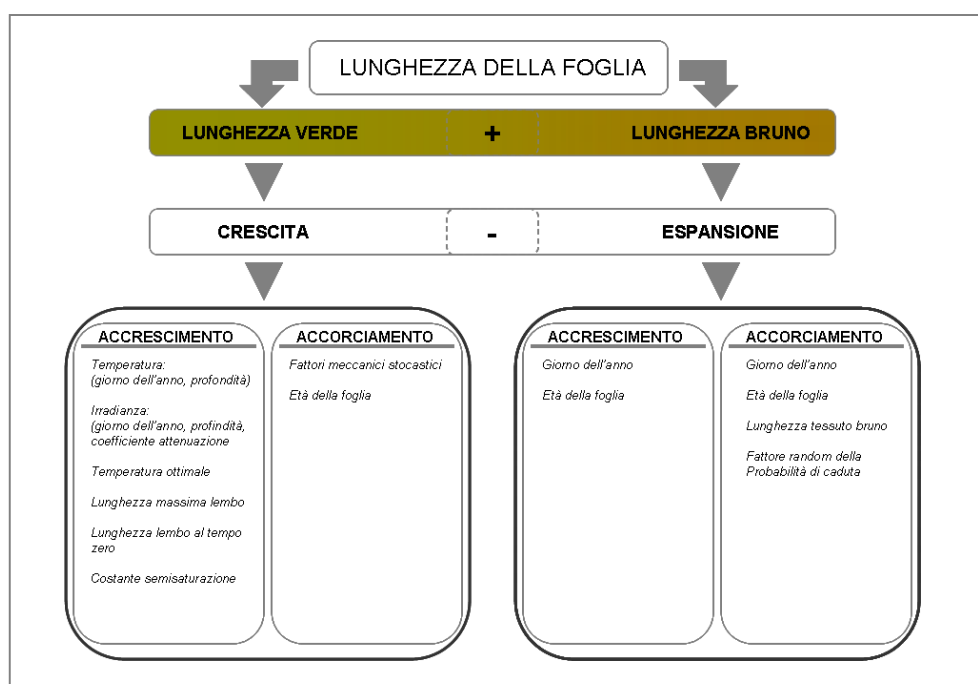


Fig. 12: Rappresentazione diagrammatica delle singole componenti sviluppate nella formalizzazione del modello.

Cercando di estrapolare dal sistema reale le informazioni, sia in termini quantitativi che qualitativi, tali da delineare una descrizione del fenomeno da analizzare, è stato poi sviluppato un modello concettuale che descrivesse la nostra rappresentazione delle variabili di stato critiche e dei processi implicati nella dinamica di accrescimento delle foglie di *Posidonia* (Fig.13).

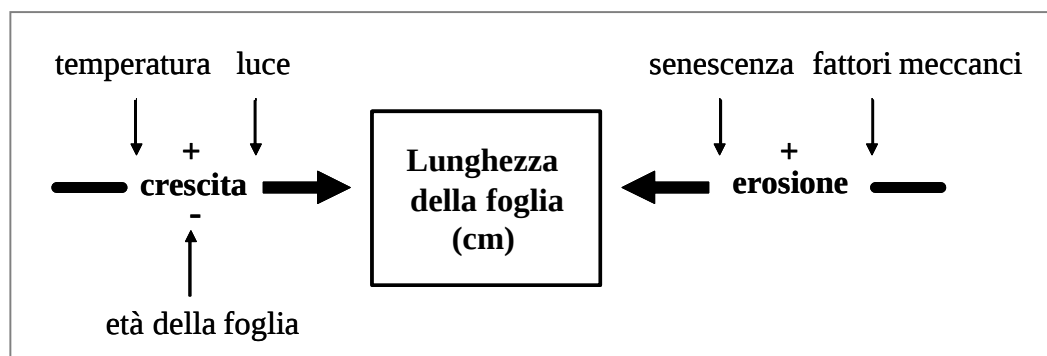


Fig. 13: Diagramma concettuale del modello di crescita delle foglie di *P. oceanica*.

In pratica, l'intero studio ha focalizzato la propria attenzione su una sola variabile di stato rappresentata dalla lunghezza della foglia, mentre come funzioni forzanti, sono state considerate lo stato di senescenza della foglia ed alcuni fattori fisici che anche sulla base di altre formulazioni modellistiche (Elkalay et al., 2003), sono sembrati controllarne i processi di crescita. Le variabili di stato, le funzioni forzanti, i parametri e le costanti utilizzate nel modello sono riportati nella tabella 1.

La *P. oceanica* è esposta ad un *range* relativamente ampio di fattori fisici e biologici tra cui la temperatura, l'irradianza, la disponibilità di nutrienti, la disponibilità di spazio, la tipologia del substrato.

Dati sperimentali suggeriscono che una discreta varietà di fattori fisici agisce in maniera gerarchica nel determinare l'allungamento delle foglie di *Posidonia* (Zupo et al., 1997). L'adattamento della pianta a tali differenti condizioni ambientali sembrerebbe collegata da un lato alla sua capacità di rispondere a fattori limitanti esterni e dall'altro ad intrinseci meccanismi di regolazione interna (Ott, 1979). L'equilibrio tra queste due componenti risulterebbe cruciale per il successo dei processi di crescita della pianta e di stabilità della sua prateria (Elkalay et al., 2003).

	Nome	Unità di misura
Variabili di stato	lunghezza della foglia	cm
Funzioni forzanti	luce	$microE\ m^{-2}s^{-1}$
	temperatura	°C
	età della foglia	giorni
parametri e costanti	accrescimento massimo giornaliero (K_{max})	$metri\ giorno^{-1}$
	tempo minimo apparizione bruno ($tempo_0$)	giorni
	lunghezza minima foglia (L_{min})	metri
	profondità ($depth$)	metri
	coefficiente di attenuazione ($depth_Secchi$)	$metri^{-1}$
	costante di semitarurazione – luce (I_{ss})	$microE\ m^{-2}s^{-1}$
	costante di semitarurazione – temperatura (T_{ss})	°C
	costante di semitarurazione – età foglia (E_{ss})	giorni

Tab. 1: Componenti del modello.

Tra i fattori limitanti la luce, influenzerebbe la produttività totale annuale della *Posidonia* (Pirc,1985a, b) mentre i *patterns* di produzione stagionale sarebbero modulati essenzialmente dalla temperatura (Zupo et al., 1997).

Nella implementazione del modello presentato in questo progetto, sia la luce che la temperatura sono state individuate come funzioni forzanti ed entrambe simulate mediante funzioni *ad hoc* allo scopo di costruire uno strumento modellistico svincolato dalla necessità di dover recuperare l'informazione da uno specifico set di dati.

La disponibilità di luce responsabile di regolare la distribuzione batimetrica e la produttività delle fanerogame marine in generale, e quindi anche della *Posidonia*, è stata formalizzata dalla relazione empirica fornita dalla legge di Beer's (Eq.1):

$$I_z = I_o \exp^{-k_z \times z} \quad (1)$$

dove k_z è il coefficiente di attenuazione ed è una costante tipica del mezzo attraversato per una data profondità (espresso in questo modello come funzione inversa della profondità del

disco Secchi ed uguale a $1.7/\text{profondità disco Secchi}$), I_z è l'irradianza alla profondità z all'interno della colonna d'acqua ed I_0 è l'irradianza alla superficie.

La risposta della pianta alla intensità luminosa è stata formulata invece, come (Eq.2):

$$K_IRRADIANCE = \left[\frac{I_z}{I_{ss} + I_z} \right] \times 1.25 \quad (2)$$

dove I_{ss} rappresenta una costante di semitarurazione. La dipendenza della crescita dalla luce è in pratica descritta da una cinetica di Michaelis-Menten in accordo con osservazioni sperimentali sulla crescita anche di altre fanerogame marine (Drew, 1979; Dennison & Alberte, 1986; Olesen & Sand-Jensen, 1993). La crescita del tessuto verde della foglia sarebbe una funzione lineare della luce a basse intensità, mentre raggiungerebbe asintoticamente il suo massimo ad intensità elevate (Bocci et al., 1997; Elkalay et al., 2003). L'andamento nel tempo del valore di $K_IRRADIANCE$ al variare della profondità e del coefficiente di attenuazione è riportato in figura 14 con un massimo raggiungibile ad una profondità di 10 metri e condizioni di trasparenza pari a quelle di zone di mare aperto (0.034 metri^{-1})

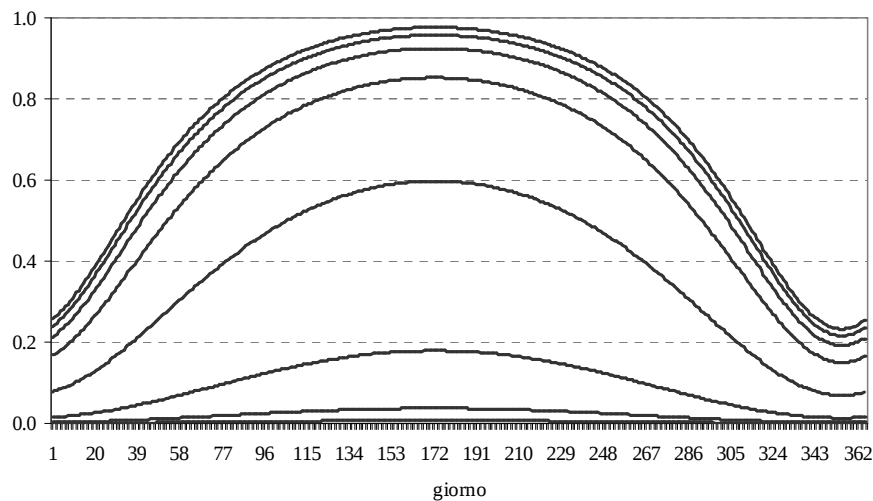


Fig. 14: Variazione nel tempo di $K_IRRADIANCE$ per differenti valori di profondità e del coefficiente di attenuazione.

Anche la relazione della temperatura, responsabile di influenzare i principali processi fisiologici (fotosintesi, respirazione) alla base della crescita delle foglie, con le condizioni di

accrescimento è stata matematicamente formalizzata mediante una semplice relazione la cui formulazione presenta la forma (Eq.3):

$$K_TEMPERATURE = \left[\frac{(T - 13)}{(T - 13 + T_{ss} - 13)} \right] \times 1.5 \quad (3)$$

dove T è il valore della temperatura in un dato giorno dell'anno ad una data profondità, mentre T_{ss} rappresenta un valore costante di temperatura in corrispondenza del quale la dipendenza della crescita della foglia dalla temperatura è pari alla metà del suo valore massimo. La variazione del valore di $K_TEMPERATURE$ in funzione del tempo è rappresentata in figura 15.

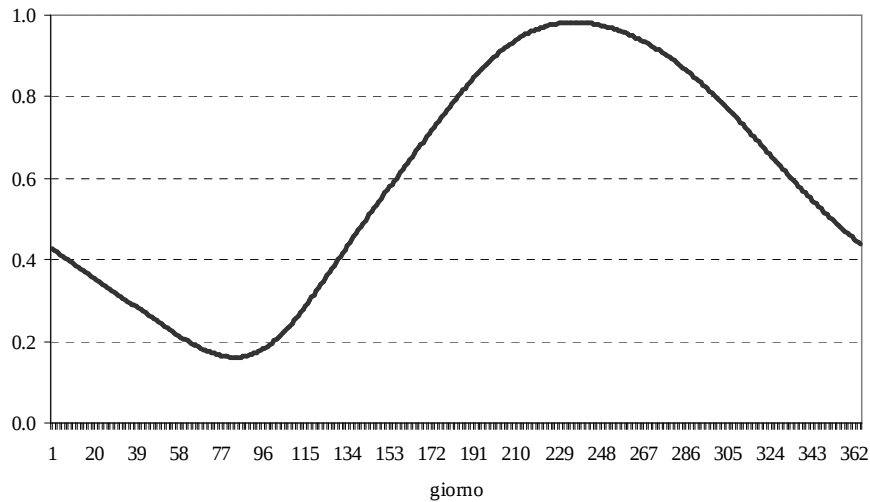


Fig. 15: Variazione nel tempo di $K_TEMPERATURE$.

In particolare, i valori di T che figurano nell'equazione 3 sono stati calcolati utilizzando una equazione logistica sviluppata empiricamente a partire da un esteso insieme di dati relativi a valori di temperatura per differenti fasce barimetriche e momenti stagionali in zone costiere del basso Tirreno.

La sua formulazione matematica è così rappresentata (Eq.4):

$$T = \left[\frac{1}{1 + \exp^{-ya+b}} \right] \times range + min \quad (4)$$

dove a , b , $range$ e min sono tutti parametri espressi in funzione del momento stagionale, mentre y rappresenta la profondità. L'equazione per il calcolo di T fitta l'andamento annuale della temperatura in funzione della profondità e del giorno dell'anno (Fig. 16).

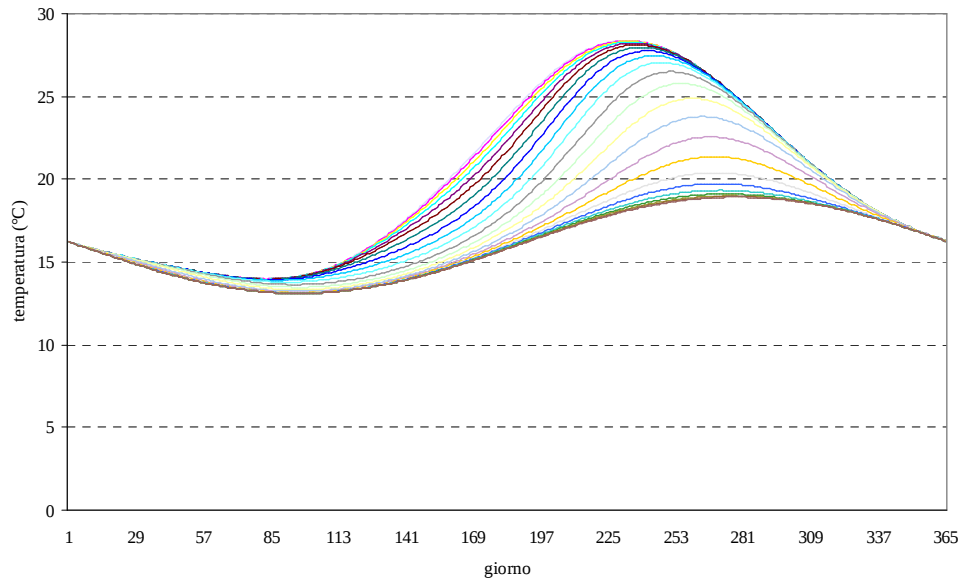


Fig. 16: Modellizzazione della temperatura per profondità comprese tra 1 e 45 metri.

Le formalizzazioni matematiche di ciascuno dei parametri inclusi nell'equazione di T sono riportate in tabella 2 dove dy rappresenta il giorno dell'anno (compreso tra 1 e 365).

a	$0.16 \times \cos \left[2\pi \times \left(\frac{dy}{365} - 3.11 \right) \right] - 0.35$
b	$6.22 \times \cos \left[2\pi \times \left(\frac{dy}{365} - 2.90 \right) \right] - 9$
$range$	$\left[5.1 \times \cos \left[2\pi \times \left(\frac{dy}{365} + 2.56 \right) \right] + 1.55 \times \cos \left[2\pi \times \left(\frac{dy}{182} - 1.41 \right) \right] \right] + 4$
min	$2.9 \times \cos \left[2\pi \times \left(\frac{dy + 20}{365} + 1.15 \right) \right] + 16$

Tab. 2: Equazioni per il calcolo dei parametri presenti nella formulazione della temperatura.

Così come applicato con successo in altre implementazioni modellistiche (Bach, 1993), l'influenza della luce e della temperatura sui tassi di crescita delle foglie di *Posidonia* è stata tradotta in una formulazione moltiplicativa in cui l'accrescimento del tessuto verde è stato calcolato come una frazione dei massimi tassi di crescita cui però è stata aggiunta anche quella relativa all'età della foglia (Eq.5):

$$CRESCITA_V = K_{max} \times K_IRRADIANCE \times K_TEMPERATURE \times K_ETAFOGLIA \quad (5)$$

con K_{max} pari al tasso di accrescimento massimo giornaliero, mentre $K_ETAFOGLIA$ è stato stimato come (Eq.6):

$$K_ETAFOGLIA = \frac{\left[- \left(\frac{EF - EF_{ss}}{\frac{1}{EF}} \right) - 60225 \right]}{[10000 - 60225]} \quad (6)$$

dove EF rappresenta l'età della foglia, cioè il tempo trascorso dalla sua apparizione nel fascio, e EF_{ss} una costante in corrispondenza del quale la dipendenza della crescita della foglia dalla sua età è pari alla metà del suo valore massimo. La variazione del valore di $K_ETAFOGLIA$ in funzione del tempo è rappresentata in figura 17.

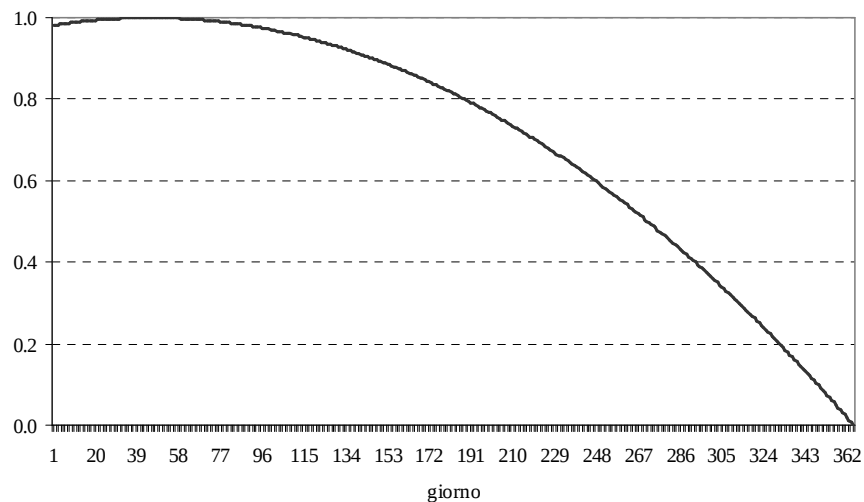


Fig. 17: Variazione nel tempo di $K_ETAFOGLIA$.

L'andamento dei valori medi per mese dei tassi di accrescimento del tessuto verde è riportato a titolo di esempio, in figura 18 per una profondità di 10 metri ed un valore di K_{max} pari a 0.00235 metri giorno⁻¹ (valore massimo registrato nella prateria laziale di S. Marinella).

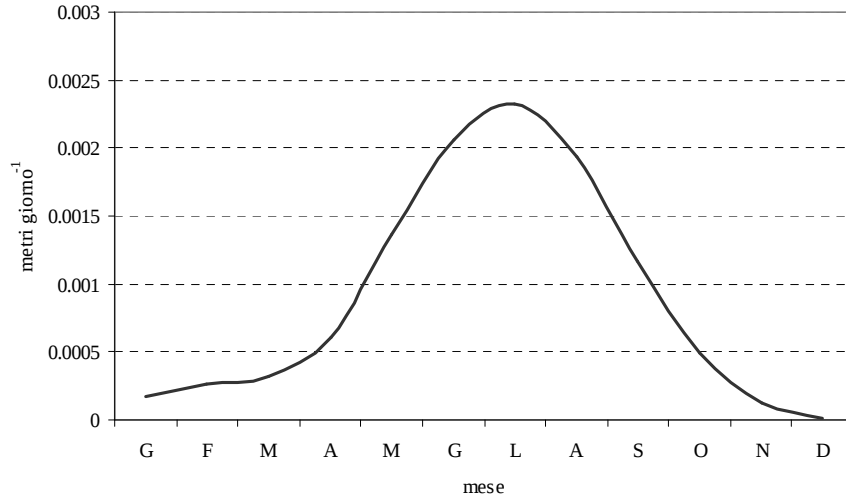


Fig. 18: Andamento dei tassi di accrescimento del tessuto verde.

In questa fase di implementazione del modello la componente di accorciamento del tessuto verde, per quanto ipotizzata come uno dei due fattori responsabili della regolazione della lunghezza della foglia, non è stata formalizzata perchè strettamente connessa a processi casuali e quindi difficilmente simulabile anche se non trascurabile.

Gli altri fattori implicati nella regolazione della crescita del tessuto verde e cioè l'espansione e l'erosione del tessuto bruno, sono stati anch'essi implementati mediante funzioni empiriche sviluppate sulla base degli andamenti e delle dinamiche riconosciute nei dati a disposizione. In particolare, l'accrescimento del tessuto bruno (fig.19) è stato modellizzato sulla base del giorno dell'anno ($Ts = tempo\ seriale$) nella forma espressa dalla equazione (Eq.7):

$$accrescimento_b = acr_1 \times \cos(Ts + acr_2) + acr_3 \quad (7)$$

dove $acr_1 = 0.1323$, $acr_2 = 1.4135$ ed $acr_3 = 0.1373$.

L'accrescimento del tessuto bruno è stato poi modulato in funzione della età della foglia (Fig. 20) così da ottenere un'equazione della curva di crescita così rappresentata (Eq.8):

$$CRESCITA_B = \left[\frac{\left[\frac{(EF)^2}{50000} \times accrescimento_b_{cum} \right]}{100} \right] + rand[0,0.001] \quad (8)$$

dove EF rappresenta l'età della foglia ed $accrescimento_b_{cum}$ il valore cumulato dell'accrescimento del tessuto bruno.

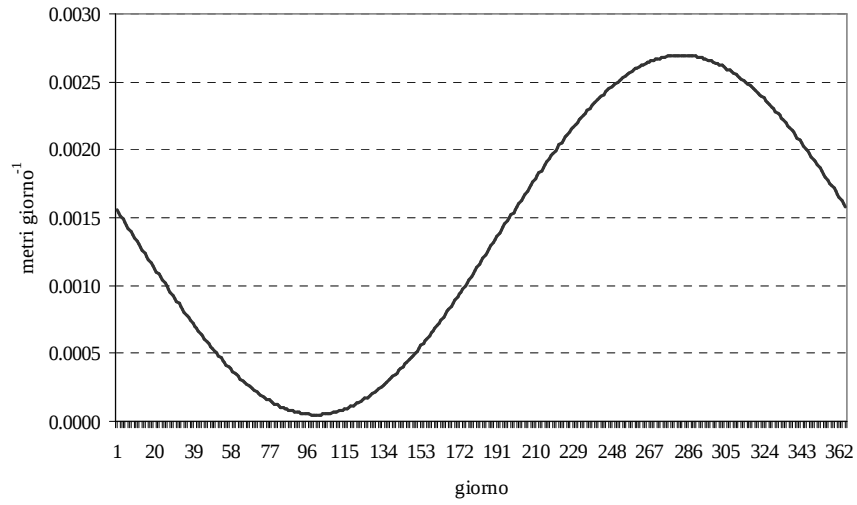


Fig. 19: Andamento dei tassi di accrescimento del tessuto bruno.

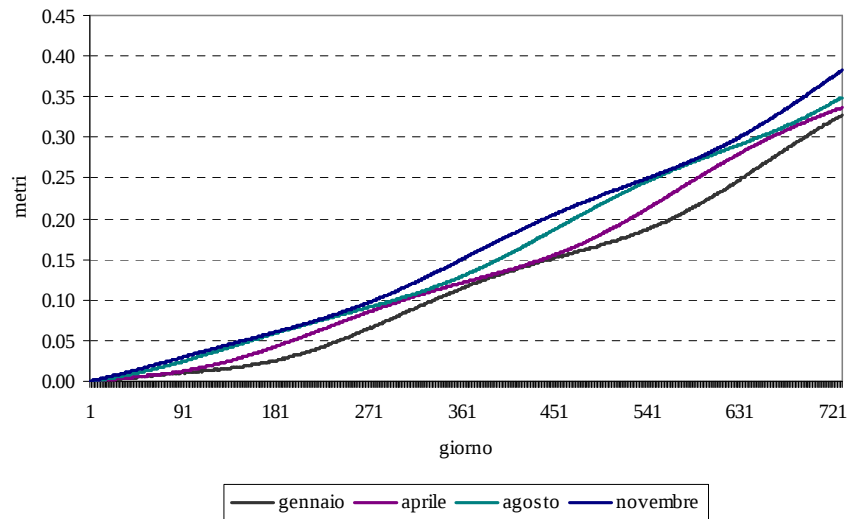


Fig. 20: Andamento dei valori di crescita del tessuto bruno.

L'accorciamento del tessuto bruno è stato sviluppato invece, considerando oltre all'età della foglia, il giorno dell'anno ($Ts = \text{tempo seriale}$) ed una componente stocastica di rottura, anche la lunghezza del tessuto bruno (Eq.9):

$$\text{lunghezza_}b = -acc_1 + acc_2 \times \sin(Ts + acc_3) + acc_4 \times \cos(Ts + acc_3) \quad (9)$$

dove $acc_1 = -67.5385$, $acc_2 = 42.8961$, $acc_3 = 42.0554$ ed $acc_4 = 15.7487$.

Come per la funzione precedente, la disponibilità di una enorme quantità di dati fenologici ha consentito di definire un'equazione empirica capace di descrivere gli andamenti della lunghezza del tessuto bruno in funzione del momento stagionale rimodulata in funzione dell'età della foglia (Fig. 21) (Eq.10):

$$\text{ACCORCIAMENTO_}B = \left[\frac{\text{lunghezza_}b + (EF)^2}{80000000} \right] + \text{rand}[0,0.001] \quad (10)$$

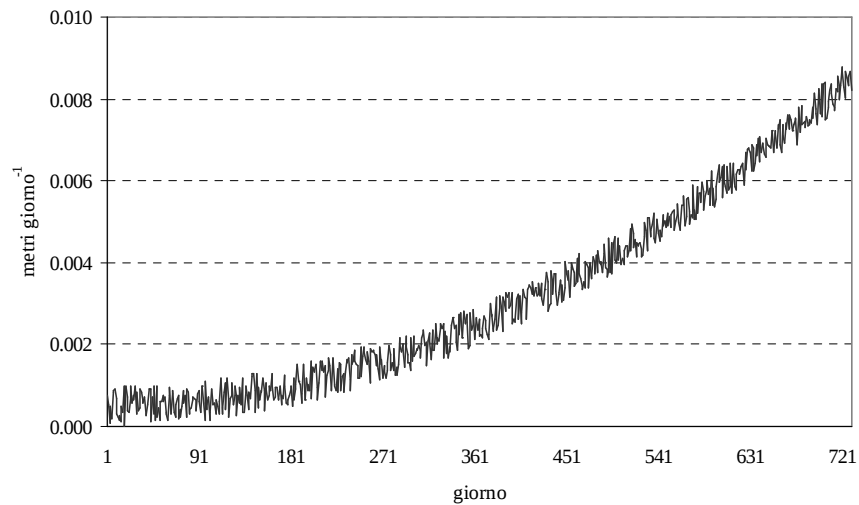


Fig. 21: Andamento dei valori di accorciamento del tessuto bruno.

Il rumore introdotto nelle due funzioni relative ai processi di crescita ed erosione del bruno è stato aggiunto in una fase successiva a quella in cui è stato fittato il modello empirico.

Per quanto le considerazioni fin qui riportate facciano riferimento ai processi di accrescimento di una singola ipotetica foglia, il modello implementato consente comunque, di integrare la dinamica di crescita delle foglie di *P. oceanica* in quella più ampia dell'intero

fascio. In particolare, quest'ultimo più che essere considerato come si fa convenzionalmente per praticità, una unità vegetativa caratterizzata da un numero finito di foglie (in media 7/8), è stato pensato come l'espressione di un *continuum* fogliare in cui costantemente nuove foglie appaiono e vecchie foglie cadono ciascuna con una dinamica di espansione ed erosione funzione di fattori stagionali, locali e casuali.

Per questo motivo è stato necessario formalizzare anche una componente del modello che tenesse conto della probabilità di appazione di una nuova foglia in funzione della comparsa di quella precedente e del momento stagionale. Sulla base di quanto riportato dalla letteratura storica (Thelin & Boudouresque 1983; Pergent, Pergent-Martini 1991, 1999, Buia et al., 1992) ed in relazione ad alcuni *databases* disponibili su lavori di marcatura mediante metodo di Zieman di alcune praterie laziali (S. Marinella, 2005-2007) e sarde (Palau, 1989-1991), è stata ricavata la formulazione matematica della probabilità di apparizione di una nuova foglia in funzione del momento stagionale (Eq. 11):

$$prob_foglia_successiva = \quad (11)$$

$$\left[\frac{30}{3 \times (((-r_1 \times \sin(Ts - r_3) + r_2 \times \cos(Ts + r_4) + (-r_1 \times \sin(Ts - r_3))^2 + r_2 \times \cos(Ts + r_4))^2 + r_5^{r_6})))} \right] + rand[-5,5]$$

dove $r_1 = 2.450$, $r_2 = 2.735$, $r_3 = 4.110$, $r_4 = 0.620$, $r_5 = 0.580$, $r_6 = 0.500$.

La probabilità di apparizione di una nuova foglia espressa poi come ritardo di comparsa rispetto alla foglia precedente è riportata nell'equazione che segue (Eq. 12):

$$RITARDO_FOGLIA_SUCCESSIVA = \quad (12)$$

$$30 + \left[\frac{(10 \times prob_foglia_successiva - 15.628) \times (90 - 20)}{(159.73 - 15.628)} \right]$$

L'andamento del ritardo nell'apparizione di una nuova foglia in funzione del periodo dell'anno è riportato in figura 22.

Va sottolineato che la fase di calibrazione del modello è stata affrontata mediante un procedimento euristico. La parametrizzazione è stata effettuata, infatti, mediante una ricerca per tentativi della soluzione ottimale scegliendo iterativamente soluzioni ammissibili.

Ne deriva che tutti i coefficienti utilizzati nelle equazioni sviluppate, non hanno alcun reale significato biologico, ma sono esclusivamente il risultato delle ottimizzazioni delle funzioni empiriche utilizzate per approssimare i processi analizzati, rispetto ai dati osservati.

Tali funzioni (es. $temp = f(data, prof)$), sono state comunque, formalizzate in maniera tale da tentare di avere nel codice tutto il necessario per la implementazione della simulazione senza bisogno di *files* esterni allo scopo di rendere il modello indipendente da una specifica base di dati. In pratica, le funzioni utilizzate presentano una formulazione che più che la meccanica dei processi di crescita delle foglie di *Posidonia*, cercano di tradurne la forma.

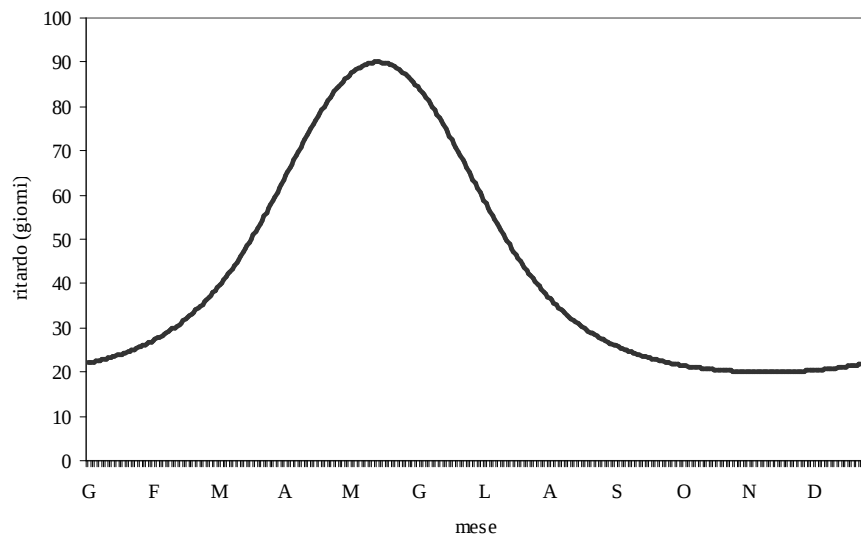


Fig. 22: Andamento dei valori del ritardo nell'apparizione di una nuova foglia.

2.2.2. Il linguaggio di programmazione

Per la formalizzazione di ciascuna delle componenti del modello è stato utilizzato come linguaggio di programmazione il *FreeBasic*, un ambiente *open source*, che mira ad essere compatibile con MS Qbasic. Facilmente disponibile come “*software libero*” e semplice nella sintassi, un progetto *FreeBasic* mette a disposizione su piattaforme DOS, Linux e Windows un compilatore per il dialetto BASIC la cui sintassi cerca di essere il più possibile aderente al BASIC originale, anche se qualche modifica è stata fatta per permettere il supporto di alcune *feature* di programmazione più moderne.

Il programma funziona da linea di comando DOS o mediante un IDE per *FreeBasic* (Fig 23) cioè un ambiente integrato di sviluppo (*Integrated Development Environment* - IDE), generalmente costituito da un editor di codice sorgente, un compilatore e/o un interprete, e solitamente un debugger e costituisce in pratica un *software* che aiuta i programmatori nello sviluppo del proprio programma.

In particolare, è stata utilizzata la versione 0.20b del FreeBasic mentre per l'ambiente IDE è si è fatto uso della versione IDE 0.4.6.

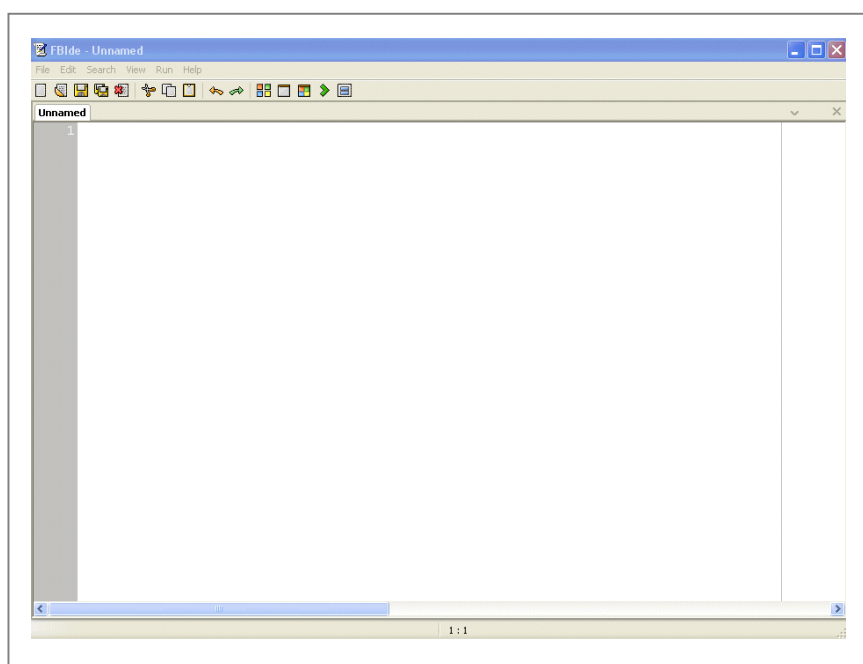


Fig. 23: Ambiente FBIDE di sviluppo del codice.

2.2.3. Lo sviluppo del codice

Allo scopo di facilitare la stesura del codice e migliorarne la comprensione e le potenzialità, ciascuna delle componenti del modello è stata sviluppata come un blocco indipendente mediante la creazione di altrettante funzioni.

L'uso di tali funzioni consente, infatti, di dividere il programma in sottoproblemi eseguibili e verificabili anche isolatamente, dare un nome pertinente a una sequenza di istruzioni per rendere il programma più semplice da leggere, semplificare sia l'iterazione che la ricorsione

delle relative procedure, avere la possibilità di riutilizzare o riallocare tali blocchi di codice in altri programmi o in nuove stesure dello stesso programma.

Nelle pagine che seguono si riporta il listato della struttura principale (Fig. 24) del codice del modello, di ciascuna delle singole componenti (Figg 25-31) nonché una breve descrizione delle istruzioni che vengono svolte.

La struttura principale

Nella struttura principale del codice vengono inizialmente dichiarate le singole funzioni richiamate dal programma (**CRESCITA_V** = crescita tessuto verde, **CRESCITA_B** = crescita tessuto bruno, **ACCORCIAMENTO_B** = accorciamento tessuto bruno, **RITARDO_FOGLIA_SUCCESSIVA** = apparizione nuova foglia nel fascio) nonché dimensionate le variabili e le costanti utilizzate.

Queste vengono fornite al programma mediante un file di configurazione con estensione “.cfg” modificabile dall’utente mediante i più comuni *editors* (notepad, wordpad).

I parametri di configurazione iniziale utilizzati sono: la variabile **date_0** introdotta per stabilire la data di inizio della simulazione, la lunghezza fogliare al tempo zero (**L_min**) approssimata alla lunghezza minima apprezzabile negli studi fenologici, il numero massimo di foglie simulabili (**leaves**), la durata in giorni della simulazione (**t_max**), il tempo minimo in giorni prima del quale il bruno può essere considerato assente (**tempo_0**), il tasso di accrescimento massimo giornaliero del tessuto verde (**K_max**), la profondità alla quale si ipotizza avvenga la simulazione (**depth**) ed il coefficiente di attenuazione funzione della trasparenza dell’acqua ed espresso come relazione inversa della profondità del disco Secchi (**depth_Secchi**). A questi parametri sono state aggiunte anche le costanti relative alle tre componenti che descrivono la crescita del tessuto verde e cioè rispettivamente irradianza, (**Iss**) temperatura, (**Tss**) ed età della foglia (**EFss**). Tali componenti sono state anch’esse sviluppate come funzioni indipendenti (**K_IRRADIANCE**, **K_TEMPERATURE** e **K_ETAFOGLIA**) e dichiarate nelle prime righe di programma.

Le istruzioni riportate nella struttura principale del codice definiscono per un determinato giorno dell’anno l’apparizione di una foglia di *Posidonia* i cui processi di crescita, modulati sulla base del momento stagionale, della data di apparizione, della comparsa di nuove foglie e dello sviluppo ed erosione del bruno, vengono seguiti fino al momento della sua caduta.

Nella porzione terminale del codice, viene gestita l'apparizione di una nuova foglia nel fascio ed infine, l'apertura di un file di *output* la cui estensione e nome possono essere definiti dell'utente.

In tale file, i risultati relativi alla lunghezza del tessuto verde e del tessuto bruno, prodotti durante l'esecuzione del programma per la totalità delle foglie simulate, sono riportati in colonne separate successive il cui numero di righe corrisponde al numero di giorni di simulazione.

```
#include "vbcompat.bi"

'DICHIARA LE FUNZIONI
declare function CRESCITA_V(tempo_seriale as integer, tempo_seriale_foglia as integer) as single
declare function K_IRRADIANCE (dy as integer, depth as single, depth_Secchi as single, Iss as single) as single
declare function K_TEMPERATURE (dy as integer, depth as single, Tss as single) as single
declare function K_ETAFOGLIA (tempo_seriale as integer, tempo_seriale_foglia as integer, EFss as single) as single
declare function CRESCITA_B(tempo_seriale as integer,tempo_seriale_foglia as integer) as single
declare function ACCORCIAMENTO_B(tempo_seriale as integer,tempo_seriale_foglia as integer,rango as integer) as single
declare function RITARDO_FOGLIA_SUCCESSIVA(eta_foglia_prec as integer) as integer

'DIMENSIONA ALCUNE DELLE VARIABILI E DELLE COSTANTI
randomize timer
dim shared as integer day_0,i,t_max,leaves,Ts
dim shared as string date_0, f, outfname
dim shared as integer tempo_0
dim shared as integer k, dy
dim shared as single L_min, depth, depth_Secchi, k_max, Iss, Tss, EFss, a_bruno, b_bruno

'DICHIARA I FILES DI INPUT ED OUTPUT ED APRE IL FILE DI CONFIGURAZIONE DEI PARAMETRI
input "- file dei parametri di base (.CFG)"; f

open f for input AS 1
input #1, date_0, L_min, leaves, t_max, tempo_0, depth, depth_Secchi, k_max, Iss, Tss, EFss
close #1

input "- output file name (Enter=foglie.out)";outfname
if outfname="" then outfname="foglie.out"

'DIMENSIONA ALCUNE DELLE VARIABILI E DELLE COSTANTI
dim shared as integer t(1 to leaves,1 to 2) 'tempo seriale foglia
dim shared as single Lv(1 to leaves,0 to t_max) 'lunghezza verde
dim shared as single Lb(1 to leaves,0 to t_max) 'lunghezza bruno

day_0 = DateValue( date_0 )
a_bruno = 1.016 'coefficiente rottura bruno
b_bruno = 0.9777 'coefficiente rottura bruno

'INIZIALIZZA LA SIMULAZIONE DEFINENDO IL TEMPO SERIALE (GIORNI DELLA SIMULAZIONE)
'ED IL TEMPO SERIALE DELLA FOGLIA (GIORNI DI PERMANENZA DELLA FOGLIA SUL FASCIO)
for k=1 to leaves
if k=1 then
t(k,1)=day_0
else
t(k,1)=t(k-1,1)+RITARDO_FOGLIA_SUCCESSIVA(t(k-1,1))
end if
```

```

T1s=t(k,1)
Lv(k,0)=L_min
Lb(k,0)=0

do
Ts=Ts+1

' DEFINISCE LA LUNGHEZZA DEL TESSUTO VERDE (Lv) E QUELLA DEL TESSUTO BRUNO (Lb)
Lv(k,Ts-t(k,1))=Lv(k,Ts-t(k,1)-1)+CRESCITA_V(Ts,t(k,1))-CRESCITA_B(Ts,t(k,1))

Lb(k,Ts-t(k,1))=Lb(k,Ts-t(k,1)-1)+CRESCITA_B(Ts,t(k,1))-ACCORCIAMENTO_B(Ts,t(k,1),k)

if Lb(k,Ts-t(k,1))>0.30 then
  if dy >=tempo0 and dy <= 228 then
    Lb(k,Ts-t(k,1)) = (((a_bruno)^dy)/150)+rnd()*0.005
  else
    if dy > 228 and dy <= 366 then
      Lb(k,Ts-t(k,1)) = (((b_bruno)^dy)*43)+rnd()*0.005
    end if
  end if
end if

if Lv(k,Ts-t(k,1))<0 then
  Lb(k,Ts-t(k,1))=-1
  t(k,2)=Ts
  exit do
end if
loop
next

' GESTISCE IL RITARDO NELL'APPARIZIONE DELLE NUOVE FOGLIE
dim as integer rit(1 to leaves)
dim as integer ttmp
rit(1)=0
ttmp=day_0
for i=2 to leaves
  rit(i)=ritardo_foglia_successiva(ttmp)
  ttmp=ttmp+rit(i)
next
for i=2 to leaves
  rit(i)=rit(i-1)+rit(i)
next
for i=1 to leaves
  print rit(i)
next

'APRE IL FILE DI OUTPUT E SCRIVE I RISULTATI DI Lv E Lb IN COLONNE SUCCESSIVE PER CIASCUNA
FOGLIA SIMULATA
open outfile for output as 1
for i=0 to tmax
  for k=1 to leaves-1
    if rit(k)<=i then
      write #1, Lv(k,i-rit(k)),Lb(k,i-rit(k)),
    else
      write #1, 0, 0,
    end if
  next
  if rit(k)<=i then
    write #1, Lv(k,i-rit(k)),Lb(k,i-rit(k))
  else
    write #1, 0, 0
  end if
next
close #1

```

Fig. 24: Struttura principale del programma

Le funzioni

Nelle figure che seguono sono riportate le porzioni di codice relative a ciascuna delle funzioni sviluppate nel modello.

La funzione **CRESCITA_V** (fig.25), prevede un incremento dei valori del tessuto verde con tassi modulati dalla luce, dalla temperatura, ma anche dal momento stagionale e dall'età della foglia. Quest'ultima (*EF*) è espressa nel codice come differenza tra la variabile *tempo_seriale* (*Ts* = giorno dell'anno espresso come numero seriale rispetto all'inizio della simulazione) con quella *tempo_seriale_foglia* (*t* = giorno dell'anno espresso come numero seriale rispetto all'apparizione della foglia nel fascio). La formulazione completa delle funzioni **K_IRRADIANCE**, **K_TEMPERATURE** e **K_ETAFOGLIA** richiamate in quella di crescita del tessuto verde è riportata rispettivamente in figura 26a, 26b e 26c, mentre per lo sviluppo matematico di tali funzioni si fa riferimento alle equazioni 2, 3 e 6.

```
'LA CRESCITA DEL TESSUTO VERDE E' ESPRESSA COME UNA FRAZIONE DEI MASSIMI TASSI DI CRESCITA
IN FUNZIONE DELLA LUCE (K_IRRADIANCE), DELLA TEMPERATURA (K_TEMPERATURE) E DELLA ETA'
DELLA FOGLIA (K_ETAFOGLIA)

function CRESCITA_V (tempo_seriale as integer, tempo_seriale_foglia as integer) as single
dy = DatePart( "y", tempo_seriale)
if dy = 366 then dy = 365
    CRESCITA_V = (K_max * K_IRRADIANCE (dy, depth, depth_Secchi, Iss) * K_TEMPERATURE (dy,
    depth, Tss)* K_ETAFOGLIA (tempo_seriale, tempo_seriale_foglia, EFss))*10
end if
end function
```

Fig. 25 Funzione CRESCITA_V.

```
'FUNZIONE K_IRRADIANCE = IRRADIANZA AL TEMPO "dy", ALLA PROFONDITA' "depth_" E TRASPARENZA
"depth_Secchi"

function K_IRRADIANCE (dy as integer, depth as single, depth_Secchi as single, Iss as
single) as single

    K_IRRADIANCE = (((100+((500-240*2.2*cos(2 * (Atn ( 1.0 ) * 4) * (dy+10)/365)))))*
exp(-1.7/depth_Secchi*depth)/((100+((500-240*2.2*cos(2 * (Atn ( 1.0 ) * 4) *
(dy+10)/365)))))*exp(-1.7/depth_Secchi*depth)+Iss)*1.25)

end function
```

```
'FUNZIONE K_ETAFOGLIA

function K_ETAFOGLIA (tempo_seriale as integer, tempo_seriale_foglia as integer, EFss as
single) as single

    K_ETAFOGLIA = (((-(tempo_seriale-tempo_seriale_foglia)-EFss)/(1/(tempo_seriale-
tempo_seriale_foglia)))-(-60225))/(10000-(-60225))

end function
```

```
'FUNZIONE K_TEMPERATURE = TEMPERATURA L TEMPO "dy", ALLA PROFONDITA' "depth_"

function K_TEMPERATURE (dy as integer, depth as single, Tss as single) as single

    K_TEMPERATURE = (((1/(1+exp(-(0.16 * cos (2 * (Atn ( 1.0 ) * 4) * (dy-1) / 365 - 3.11) -
    0.35)*depth+(6.22 * cos (2 * (Atn ( 1.0 ) * 4) * (dy-1) / 365 - 2.90) - 9)))))*(((5.1*
    cos (2* 3.1415* (dy-1)/365 + 2.56)))+(1.55 * cos(2*(Atn ( 1.0 ) * 4)*(dy-1)/182-
    1.41))) + 4)+((2.9* cos (2*3.1415*((dy-1)+20)/365+1.15))+16))-13)/((Tss-13) + (((1/(1+exp(-
    (0.16 * cos (2 * (Atn ( 1.0 ) * 4) * (dy-1) / 365 - 3.11) - 0.35)*depth+(6.22 * cos (2 *
    (Atn ( 1.0 ) * 4) * (dy-1) / 365 - 2.90) - 9)))))*(((5.1* cos (2* 3.1415* (dy-1)/365 +
    2.56)))+(1.55 * cos(2*(Atn ( 1.0 ) * 4)*(dy-1)/182-1.41))) + 4)+((2.9* cos (2*3.1415*((dy-
    1)+20)/365+1.15))+16))-13))) * 1.5

end function
```

Fig. 26: Funzioni K_IRRADIANCE, K_TEMPERATURE, K_ETAFOGLIA.

La formalizzazione dei processi di espansione ed erosione a carico del tessuto bruno è descritta invece, nelle figure 27 (CRESCITA_B) e 28 (ACCORCIAMENTO_B).

```
'FUNZIONE CRESCITA_B

function CRESCITA_B(tempo_seriale as integer,tempo_seriale_foglia as integer) as single

dim as single accrescimento_b (1 to 365), accrescimentocumulato_b (1 to 365)
dy = DatePart( "y", tempo_seriale)
if dy = 366 then dy = 365
if tempo_seriale-tempo_seriale_foglia <tempo0 then
    CRESCITA_B=0
else
    accrescimentocumulato_b(dy) = 0
    accrescimento_b(dy) = 0.1323*cos((dy/365*2*(atn(1)*4)) + 1.413478) + 0.137265
    accrescimentocumulato_b(dy) = accrescimentocumulato_b(dy-1) + accrescimento_b(dy)
    CRESCITA_B = ((sqr(((tempo_seriale-tempo_seriale_foglia)^2)/50000 *
    accrescimentocumulato_b(dy)))/100)+rnd()*0.001
end if

end function
```

Fig. 27: Funzione CRESCITA_B.

```
'FUNZIONE ACCORCIAMENTO_B

function ACCORCIAMENTO_B(tempo_seriale as integer,tempo_seriale_foglia as integer,rango as
integer) as single

dim as integer eta_foglia
dy = DatePart( "y", tempo_seriale)
if (tempo_seriale-tempo_seriale_foglia)<tempo0 then
    ACCORCIAMENTO_B=0
else
    ACCORCIAMENTO_B= ((-(-67.53846)+42.89614*sin((dy/365*2*(atn(1)*4))+42.05539)+(-
    15.74867)*cos((dy/365*2*(atn(1)*4))+ 42.05539)+(tempo_seriale-
    tempo_seriale_foglia)^2)/80000000)+rnd()*0.001
end if

end function
```

Fig. 28: Funzione ACCORCIAMENTO_B.

In particolare, l'incremento del tessuto bruno (**CRESCITA_B**) lungo il lembo fogliare, è stato definito a partire da un tempo iniziale (tempo_0) prima del quale il bruno è assente.

La valutazione del tempo medio in giorni, prima di cui le foglie non presentano fenomeni di imbrunimento è stata implementata mediante una analisi dei ranghi fogliari in cui era possibile riconoscere una condizione di senescenza. A partire da tale momento la crescita del bruno è stata formalizzata mediante un incremento del tipo di quello rappresentabile da una funzione potenza pur se modulato dai tassi di accrescimento in funzione del momento stagionale (equazioni 7 e 8) .

```
'FUNZIONE RITARDO FOGLIA SUCCESSIVA

function RITARDO_FOGLIA_SUCCESSIVA (t as integer)as integer
dim as integer tempo_seriale, prob_foglia_successiva ',dy
dim as single r1, r2, r3, r4, r5, r6, d, a
dy = DatePart( "y", tempo_seriale )
a= (dy/365*2*(atn(1)*4))
r1 = 2.450
r2 = 2.735
r3 = 4.110
r4 = 0.620
r5 = 0.580
r6 = 0.500

prob_foglia_successiva =(30/((3*(-r1*sin(a-r3)+r2*cos(a+r4)))+(-r1*sin(a-r3)^2+
r2*cos(a+r4)^2)+r5^r6)))+(rnd()*(5+5)-5)
RITARDO_FOGLIA_SUCCESSIVA =(30+ 10*(prob_foglia_successiva - 15.628) * (90 - 20)/ (159.734
-15.628))

end function
```

Fig. 29: Funzione **RITARDO_FOGLIA_SUCCESSIVA**.

Anche la riduzione del tessuto bruno (funzione **ACCORCIAMENTO_B**) è stata formalizzata con una equazione che ne esprimesse un aumento progressivo, pur se condizionata dalla sua data di apparizione e da una crescita minima iniziale (equazione 9). L'ultimo blocco di programma (Fig. 29) definisce infine, la funzione **RITARDO_FOGLIA_SUCCESSIVA** e stabilisce il ritardo (in giorni) con cui una nuova foglia appare all'interno del fascio in relazione alla comparsa della foglia che la precede.

L'output grafico

Allo scopo di visualizzare la dinamica di crescita formalizzata nel modello implementato, è stato sviluppato anche un codice ad *hoc* capace di restituire un *output* grafico della

simulazione dei processi di crescita delle foglie di *P. oceanica* ottenuta lungo il *continuum* fogliare di una serie di ciuffi virtuali (Fig. 30).

```
Screenres 800,600,24
window (0,0) - (100,2)
dim as integer i, j
dim as single lv,lb,lt
dim as string k

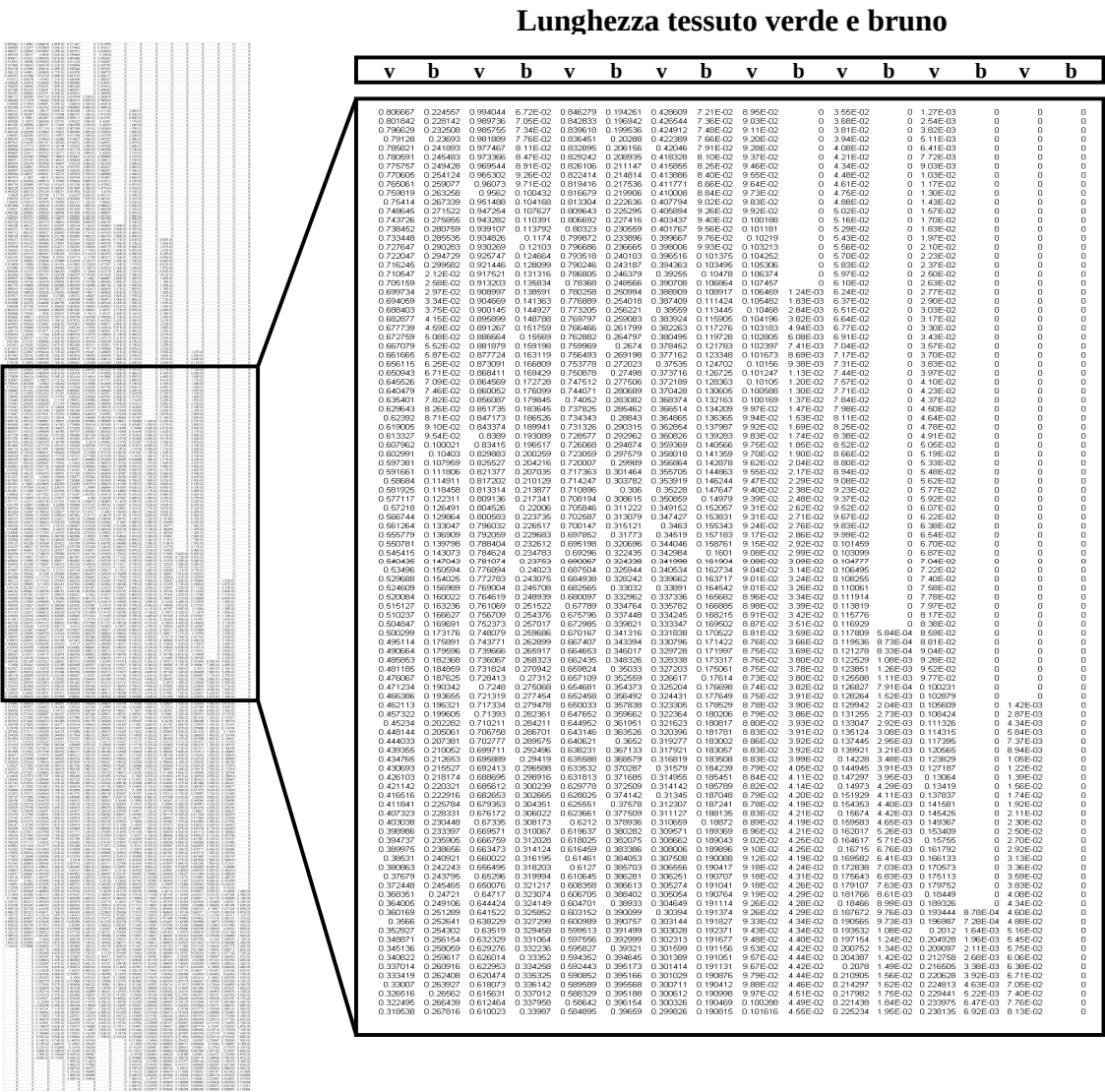
open "ciuffo.out" for input as #1
j=0
do
cls
locate 1,1
print "tempo ";j
lt=0
for i=1 to 24
input #1, lv
input #1, lb
line (i-.9,0)-(i-.1,lv),rgb(0,255,0),bf
line (i-.9,lv)-(i-.1,lv+lb),rgb(192,64,64),bf
lt=lt+lv+lb
next
if j>0 and lt=0 then
locate 1,1
print "**** Premi un tasto per uscire ****"
exit do
else
j=j+1
sleep 20
k=inkey
if k=" " then
sleep
elseif k="q" then
close 1
end
end if
end if
loop until eof(1)
close 1
sleep
end
```

Fig. 30: Codice per la realizzazione dell'output grafico della simulazione.

3. RISULTATI

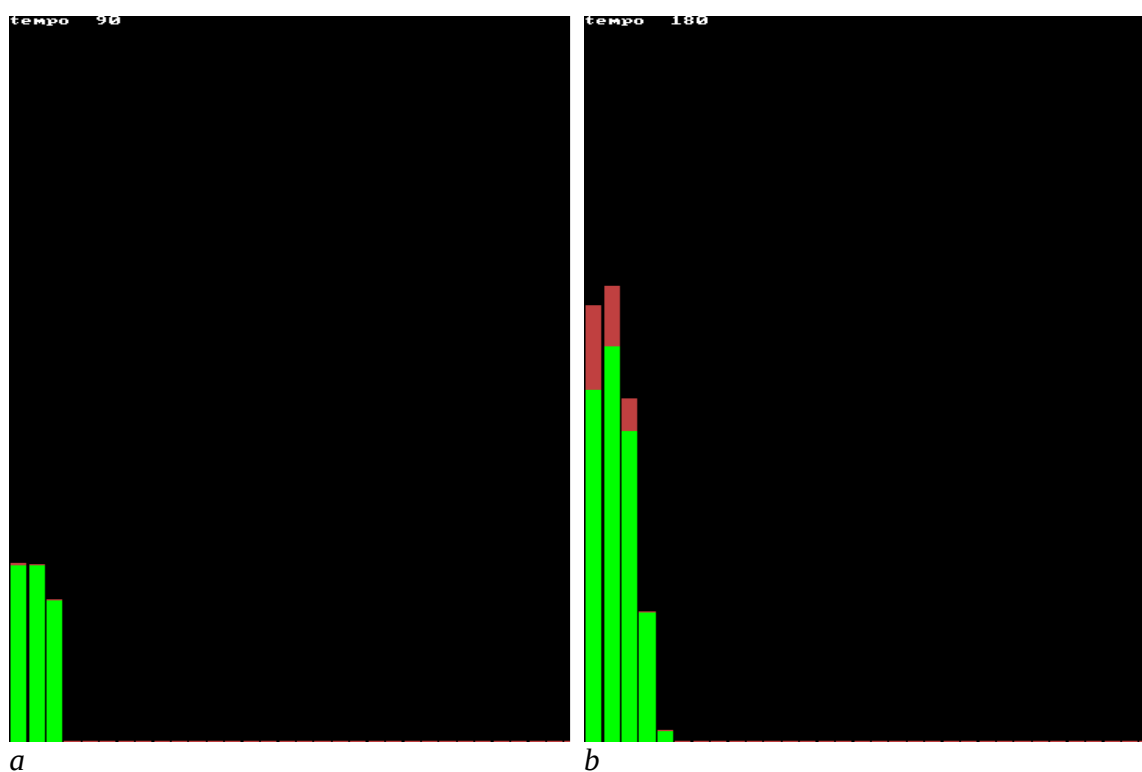
Il modello implementato restituisce sia un *output* numerico che un *output* grafico.

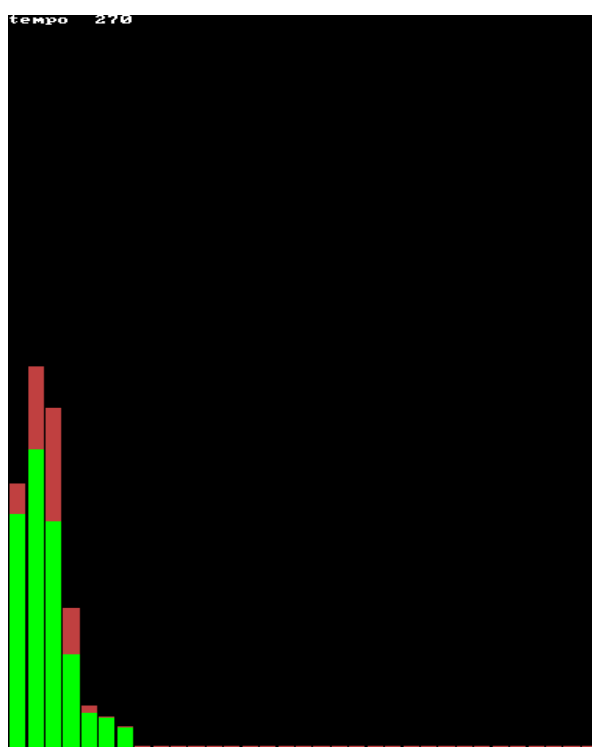
Nel primo caso, per ciascuna foglia simulata sono riportati i valori di lunghezza del tessuto verde e del tessuto bruno per ogni giorno della simulazione (Fig. 31).



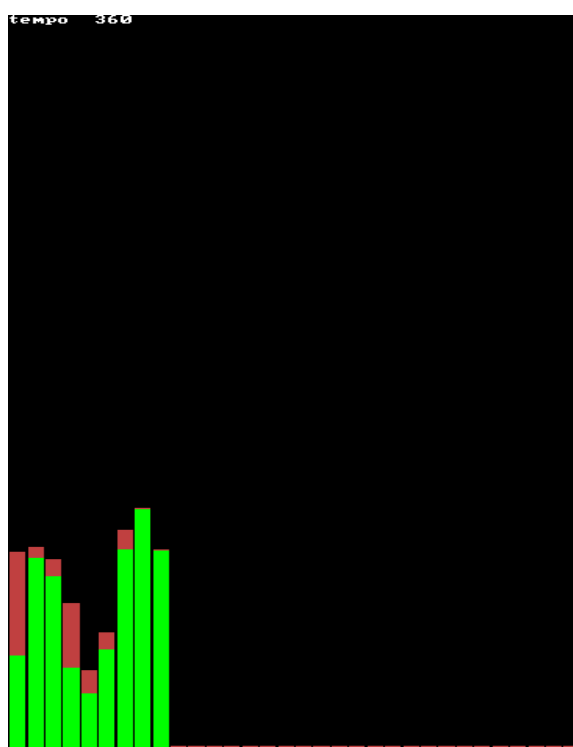
riporta, infatti, l'evoluzione della lunghezza del tessuto fogliare (verde per le colonne pari e bruno per le colonne dispari) di ciascuna delle foglie che via via comapiono nel fascio. Nel contempo, la n -ma riga fotografa la condizione del fascio simulato nell' n -mo giorno di simulazione. Nel fascio simulato non sono mai riportati gli elementi fogliari giovanili (valori di lunghezza inferiori a 0.5 cm) perché tali foglie non sono state incluse nella implementazione del modello, mentre il valore zero indica assenza di tessuto fogliare e cioè una condizione in cui la foglia non è ancora apparsa o è già caduta. Di conseguenza, il numero di foglie presenti nel fascio in ogni istante è pari alla metà del numero di elementi non nulli di ciascuna riga.

L'*output* grafico consente, invece, di visualizzare una successione di lamine fogliari organizzate in ciuffi virtuali con numero di foglie e lunghezze delle stesse (sia in termini di tessuto verde che di tessuto bruno) variabili in funzione del momento stagionale. Un *timer* tiene traccia dello scorrere del tempo in giorni, dall'inizio della simulazione. Un esempio dell'*output* grafico del modello è riportato, a fini esplicativi, nelle immagini che seguono (Fig. 32 a, b, c, d, e, f, g, h), dove la simulazione è stata arrestata circa ogni 100 giorni (3 mesi) per un periodo di due anni, fotografando l'evoluzione nel tempo di 31 foglie.

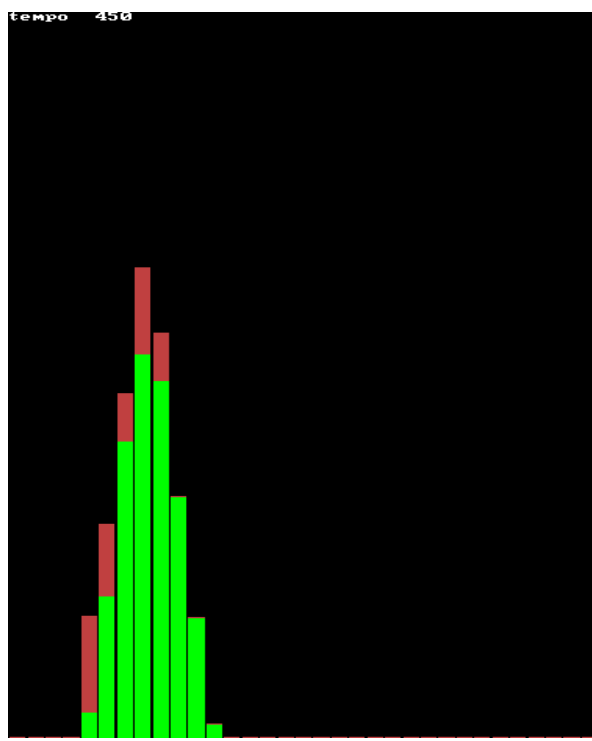




c



d



e



f

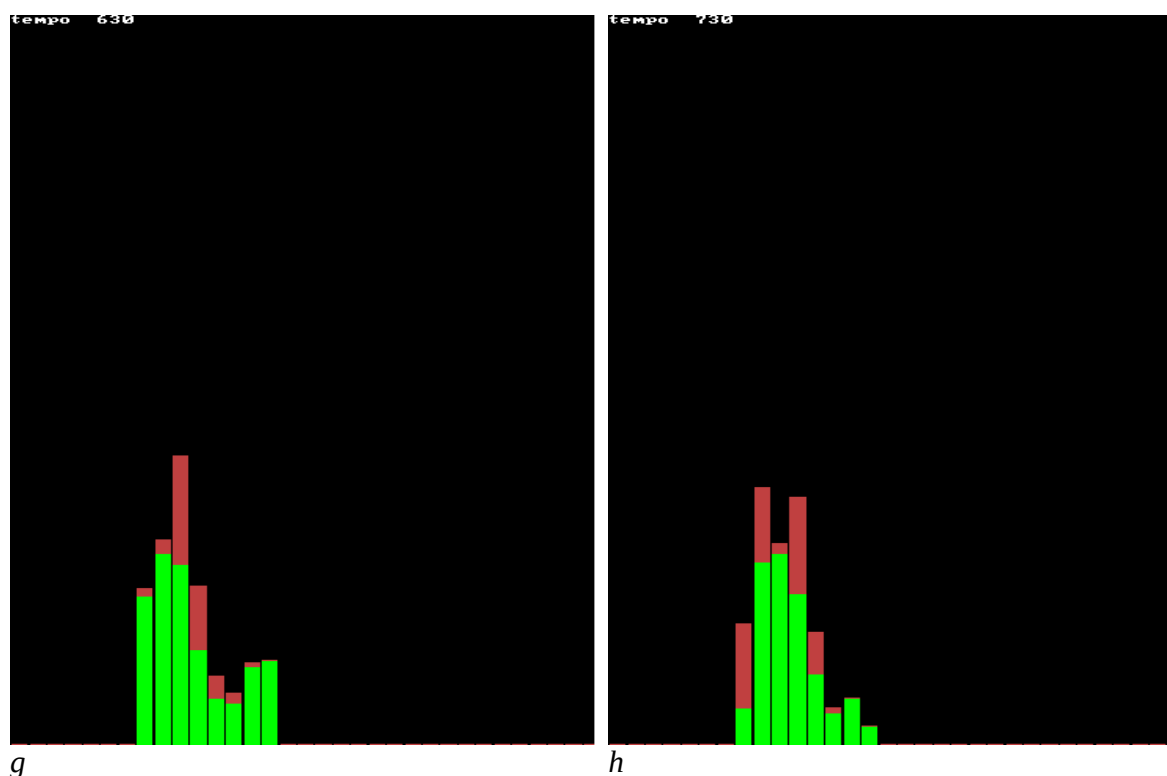


Fig. 32: Esempio di output grafico del modello.

Le capacità previsionali del modello sono state testate mediante una serie di simulazioni condotte in differenti momenti stagionali ed a differenti quote batimetriche.

In particolare, per il confronto tra i dati osservati e i dati simulati dal modello, è stato scelto un *subset* di dati relativo alle praterie di *Posidonia oceanica* del litorale laziale compreso tra Civitavecchia e S. Marinella. Per questi siti, infatti, si disponeva, oltre che di numerose informazioni storiche, anche di dati fenologici più recenti, raccolti nell'ambito del già citato progetto di trapianto e monitoraggio partito nel 2004 e tuttora in corso.

Sono stati definiti, quindi, differenti scenari di simulazione in cui la scelta di alcuni parametri di configurazione di partenza è stata in parte condizionata dalla disponibilità del *set* di dati utilizzabile per la validazione. In particolare, sono stati presi in considerazione tre diversi momenti stagionali (inverno, primavera ed estate), due fasce batimetriche (10 e 20 metri) e due diversi valori del coefficiente di attenuazione ($k_z = 0.17 \text{ metri}^{-1}$ e $k_z = 0.34 \text{ metri}^{-1}$, pari rispettivamente ad un valore del disco Secchi di 10 e 5 metri). Questi ultimi sono stati scelti per rappresentare condizioni di trasparenza che normalmente si verificano lungo le coste tirreniche. Il valore del tasso di accrescimento massimale giornaliero utilizzato è stato

considerato, invece, come costante e pari a quello ricavato dalle indagini di accrescimento condotte nella prateria di S. Marinella ($K_{max} = 0.00235$ metri giorno⁻¹) mediante procedure di marcatura (metodo di Zieman, 1974). Nella tabella che segue (Tab. 3) si riportano i differenti scenari simulati.

simulazione	stagione	profondità (metri)	coefficiente attenuazione (metri ⁻¹)
scenario 1 - I	inverno	10	0.17
scenario 1 - P	primavera	10	0.17
scenario 1 - E	estate	10	0.17
scenario 2 - I	inverno	10	0.34
scenario 3 - E	estate	20	0.17

Tab. 3: Scenari simulati dal modello.

In base allo scenario simulato, le righe della matrice di output generata dal modello, sono state selezionate allo scopo di estrarre i fasci virtuali per un determinato periodo dell'anno da confrontare poi con i dati realmente osservati per lo stesso periodo stagionale e la stessa fascia batimentrica. Nelle tabelle 6-10 sono riportati i valori di lunghezza (centimetri) del tessuto verde e del tessuto bruno stimati dal modello e quelli derivati dai dati sperimentali (dataset di calibrazione e dataset di validazione), mentre nelle figure successive (Figg. 33, 35, 37, 39, 41) le stesse informazioni sono state visualizzate mediante grafici a barre rappresentativi dei fasci virtuali confrontati. Per verificare la concordanza tra i dati simulati e quelli osservati, la stessa informazione è stata rappresentata anche mediante scatter plots (Figg. 34, 36, 38, 42). Ciò ha consentito di valutare la dispersione dei dati intorno alla retta di pendenza unitaria e quindi eventuali sovrastime e sottostime del modello o trends della sua "performance" per particolari intervalli di valori della variabile analizzata (lunghezza foglia). Una valutazione della correlazione così rappresentata è riportata nella tabella 4 in cui sono stati riassunti per tutti gli scenari analizzati, i valori del coefficiente di correlazione di Pearson (r). Le capacità previsionali del modello implementato sono state analizzate, inoltre, mediante una stima dello scarto assoluto in centimetri i cui valori medi per scenario sono stati riportati in tabella 5.

		LUNGHEZZA			
<i>r</i>		verde		bruno	
		calibrazione	validazione	calibrazione	validazione
scenario 1	inverno	0.969		0.816	
scenario 1	primavera	0.898	0.887	0.260	0.265
scenario 1	estate	0.986	0.953	0.682	0.571
scenario 2	inverno	0.770	0.671	0.938	0.800
scenario 3	estate	0.911	0.895	0.621	0.310

Tab. 4: Valori del coefficiente di correlazione (*r*) per i differenti scenari di simulazione.

		LUNGHEZZA			
scarto assoluto medio		verde		bruno	
		calibrazione	validazione	calibrazione	validazione
scenario 1	inverno	6.125		1.071	
scenario 1	primavera	3.298	3.797	0.144	0.270
scenario 1	estate	8.044	12.503	1.619	3.119
scenario 2	inverno	5.736	6.440	0.683	1.101
scenario 3	estate	4.879	5.405	2.674	3.364

Tab. 5: Valori medi dello scarto assoluto in centimetri per i differenti scenari di simulazione.

Per tutti gli scenari analizzati il modello ha mostrato di simulare efficacemente le variazioni di crescita di una foglia di *P. oceanica* nel tempo, pur rivelando una maggiore efficienza nella valutazione previsionale del tessuto verde rispetto a quello bruno. La correlazione tra i dati osservati e quelli generati dal modello è risultata infatti, sempre positiva e significativa ad eccezione della simulazione del tessuto bruno in primavera (calibrazione e validazione) ed in estate (scenario 3, validazione).

La “performance” del modello è risultata ovviamente sempre migliore per i confronti con il *dataset* di calibrazione che con quello di validazione anche se con variazioni contenute. Le differenze, tra i due *dataset* (calibrazione e validazione), nei valori dello scarto assoluto medio non hanno, infatti, mai superato i 5 centimetri ed il valore massimo è stato registrato per lo scenario 1 in estate sia per il tessuto verde che per quello bruno.

Se si analizzano nel dettaglio le simulazioni, riguardo agli scenari invernali, va sottolineato che le condizioni di trasparenza che caratterizzano le coste del litorale laziale dove è insediata la prateria di Civitavecchia, si discostano significativamente da quelle che mediamente si possono registrare lungo le coste tirreniche.

In inverno, le abbondanti piogge ed il dilavamento di materiale terrigeno mediante gli apporti fluviali, aumentano notevolmente la torbidità dell'acqua tanto da giustificare un confronto tra i dati sperimentali registrati in questa zona, con quelli di una simulazione con un valore del coefficiente di attenuazione pari a 0.34 metri^{-1} e cioè di una profondità del disco Secchi non superiore a 5 metri (inverno - scenario 2; Tab. 6 e Figg. 33a, b, c).

rango	inverno							
	scenario 2				scenario 2			
	modello		calibrazione		modello		validazione	
	verde	bruno	verde	bruno	verde	bruno	verde	bruno
11	4.84	3.96	17.56	1.50	4.84	3.96	25.00	1.20
10	29.59	2.88	25.50	1.80	29.59	2.88	25.50	0.21
9	27.00	1.94	27.70	1.00	27.00	1.94	27.70	0.21
8	29.15	1.69	26.50	0.70	29.15	1.69	26.50	0.10
7	23.42	0.00	9.90	0.00	23.42	0.00	30.20	0.07
6	9.41	0.00	6.30	0.00	9.41	0.00	17.80	0.00
5	6.43	0.00	2.50	0.00	6.43	0.00	10.00	0.00
4	8.77	0.00	3.60	0.00	8.77	0.00	3.60	0.00

Tab. 6: Lunghezza tessuto verde e tessuto bruno (cm). Valori osservati e valori simulati.

Di contro per testare le capacità previsionali del modello per lo stesso momento stagionale, ma in condizioni di trasparenza prossime alla normalità per le restanti zone tirreniche (coefficiente di attenuazione pari a 0.17 metri^{-1} e profondità del disco Secchi di circa 10 metri) si è valutata anche la concordanza (pur se per il solo set di dati di calibrazione) delle stime simulate con quelle osservate in una prateria posizionata più a nord di quelle presenti tra S. Marinella e Civitavecchia e localizzata in prossimità dell'isola del Giglio (inverno - scenario 1; Tab. 7 e Figg. 35a, b).

I risultati ottenuti sono stati in entrambi in casi soddisfacenti (Figg. 34a, b e Fig 36) sia in termini di simulazione del tessuto verde che di quello bruno.

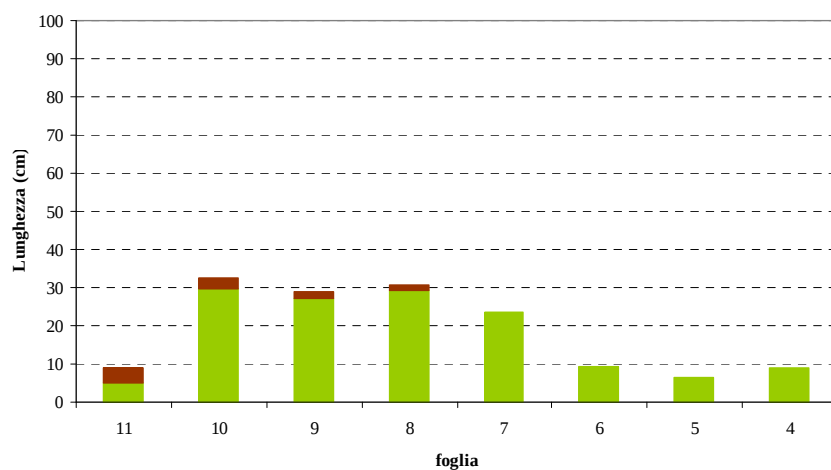


Fig. 33a: Istogramma delle lunghezze fogliari. Scenario 2- inverno (modello).

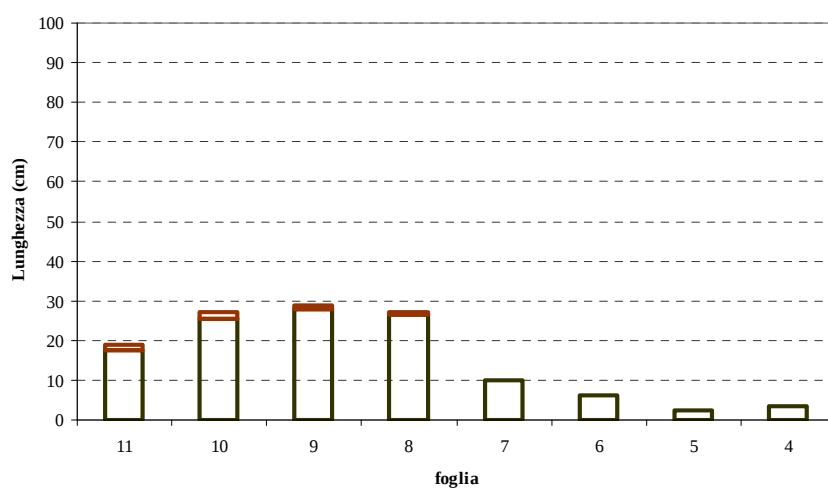


Fig. 33b: Istogramma delle lunghezze fogliari. Scenario 2 – inverno (dati calibrazione).

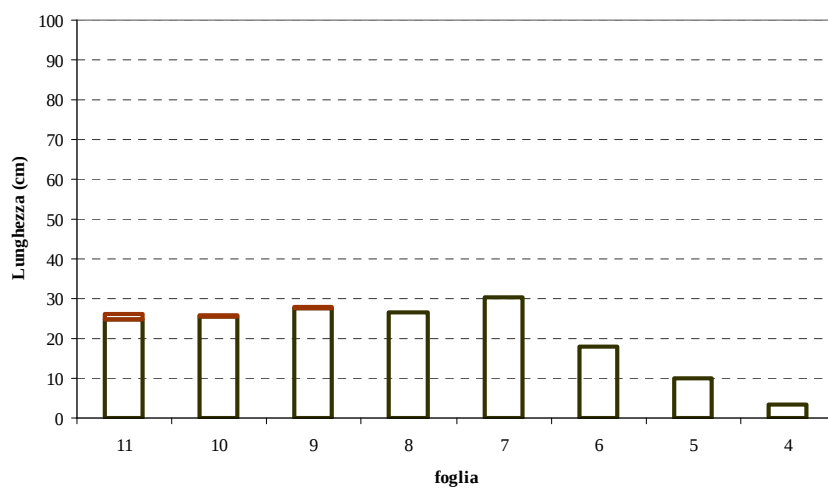


Fig. 33c: Istogramma delle lunghezze fogliari. Scenario 2 – inverno (dati validazione).

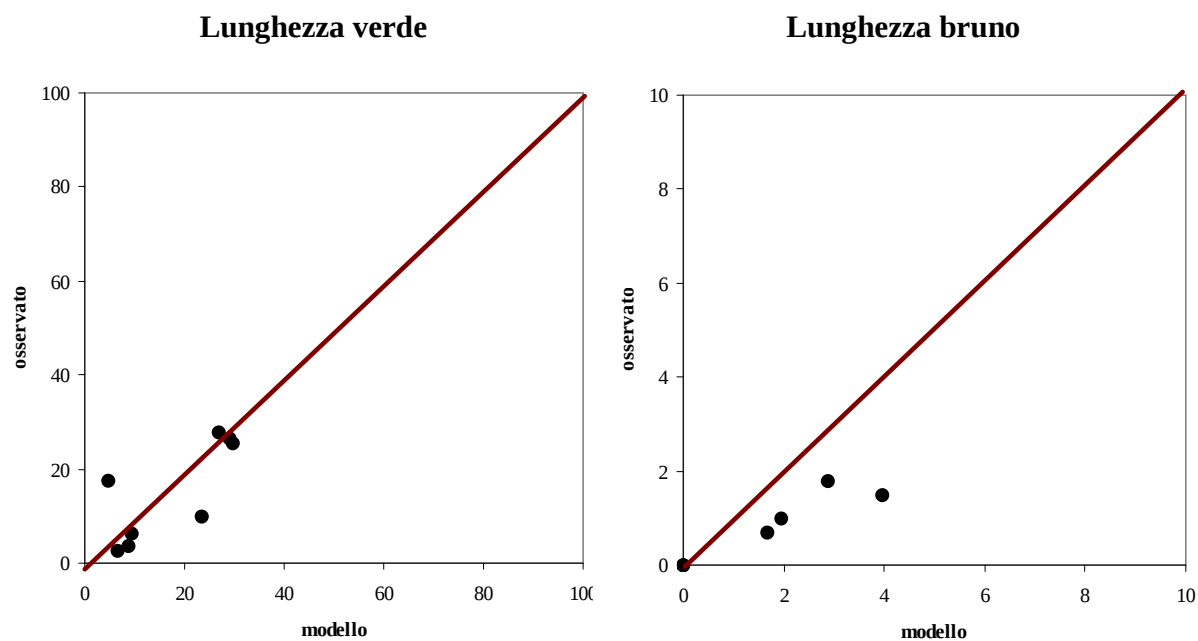


Fig. 34a: Lunghezza tessuto verde e tessuto bruno (cm). Valori osservati vs simulati. Scenario 2- inverno (calibrazione).

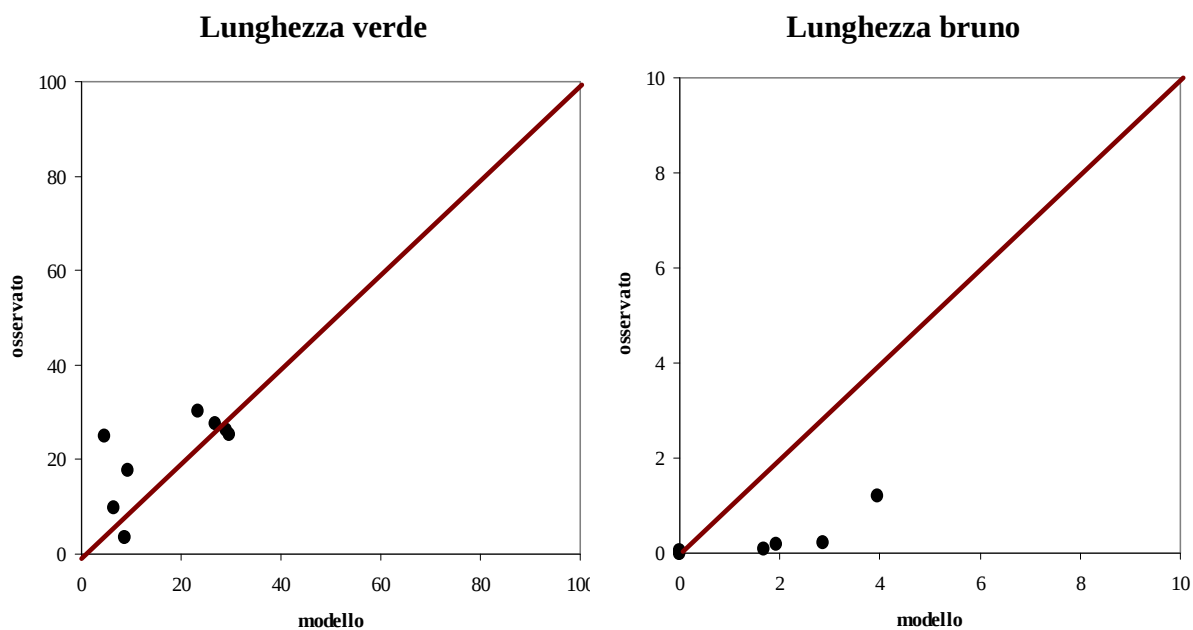


Fig. 34b: Lunghezza tessuto verde e tessuto bruno (cm). Valori osservati vs simulati. Scenario 2- inverno (validazione).

rango	inverno							
	scenario 1				scenario 1			
	modello		calibrazione		modello		validazione	
	verde	bruno	verde	bruno	verde	bruno	verde	bruno
11	18.20	2.92	29.22	1.56	-	-	-	-
10	57.94	3.09	61.50	3.53	-	-	-	-
9	57.86	3.03	68.70	0.57	-	-	-	-
8	44.27	7.36	41.02	3.10	-	-	-	-
7	17.76	0.00	9.70	0.05	-	-	-	-
6	9.31	0.00	3.50	0.00	-	-	-	-
5	8.54	0.00	3.50	0.00	-	-	-	-
4	1.83	0.00	3.24	0.00	-	-	-	-

Tab. 7: Lunghezza tessuto verde e tessuto bruno (cm). Valori osservati e valori simulati.

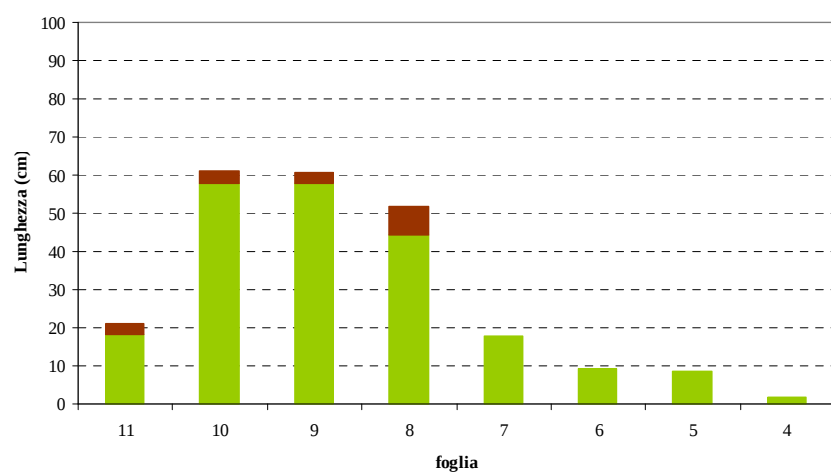


Fig. 35a: Istogramma delle lunghezze fogliari. Scenario 1 – inverno (modello).

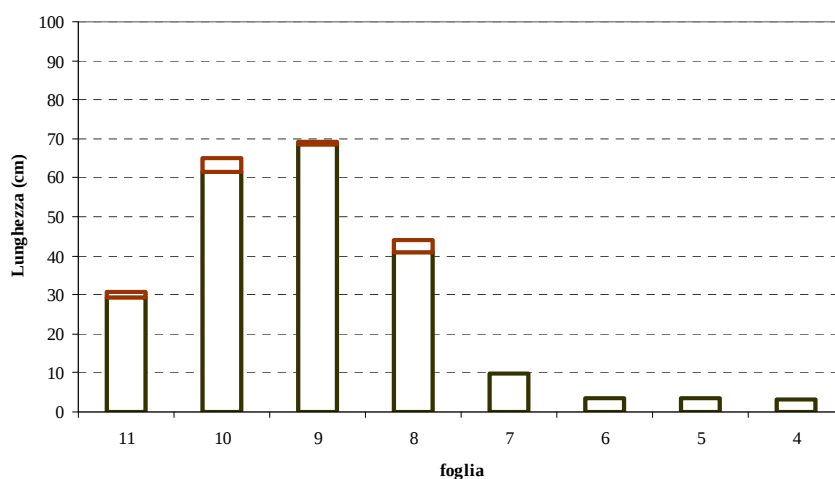


Fig. 35b: Istogramma delle lunghezze fogliari. Scenario 1 – inverno (dati calibrazione).

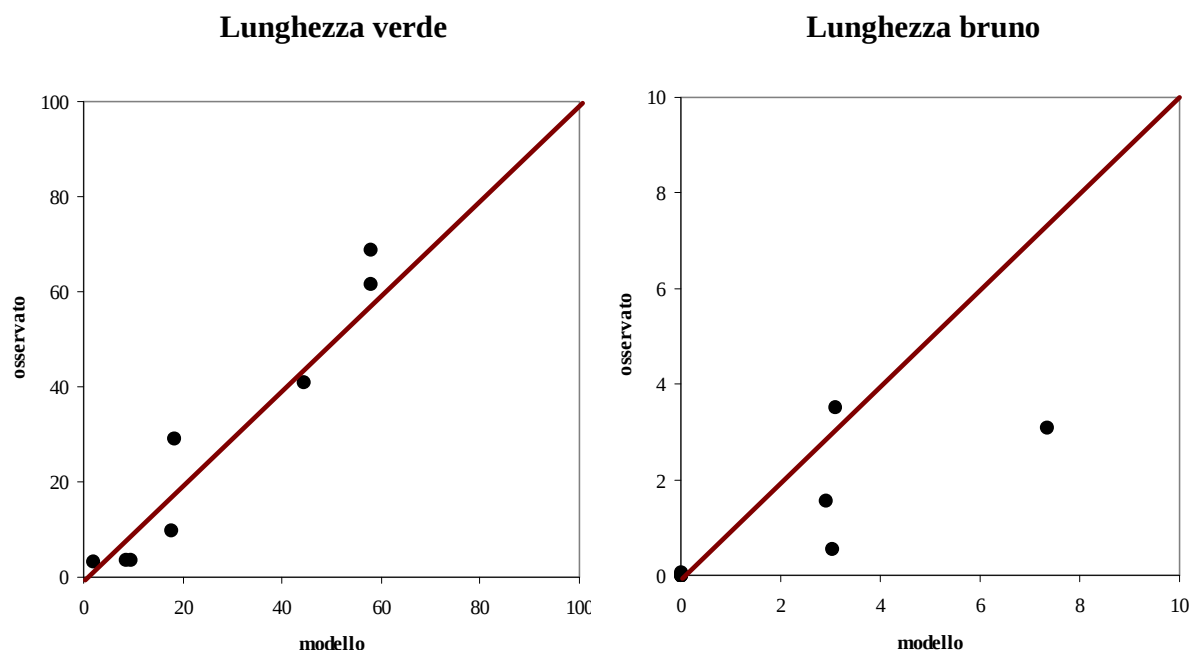


Fig. 36: Lunghezza tessuto verde e tessuto bruno (cm). Valori osservati vs simulati. Scenario 1- inverno (calibrazione).

Per quanto riguarda la componente verde, va sottolineato come il modello fitti meglio i dati relativi alla morfometria fogliare di una prateria soggetta a minore *stress* ambientale e ben più strutturata in termini fenologici quale è quella dell'isola del Giglio, (scenario 1) rispetto alla prateria di Civitavecchia (scenario 2).

In effetti, la simulazione effettuata per condizioni particolari di torbidità (scenario 2), pur se soddisfacente ($r = 0.770$ per la calibrazione e $r = 0.671$ per la validazione), è risultata meno efficiente rispetto all'altra simulazione invernale ($r = 0.969$ per la calibrazione).

Il modello mostrerebbe, quindi, una minore capacità nel simulare lunghezze fogliari fortemente variabili dovute a fattori casuali di riduzione del tessuto verde (rottura parziale o caduta totale delle foglie intermedie ed adulte) in conseguenza di particolari condizioni idrodinamiche registrate in questa zona costiera soprattutto negli ultimi anni (mareggiate più frequenti e di maggiore intensità).

In generale comunque, in inverno, il modello sottostima i valori della lunghezza delle foglie adulte, mentre tende a sovrastimare quelli delle foglie intermedie. Lo scarto assoluto medio è risultato comunque, sempre di poco superiore a 5 centimetri. Riguardo alla porzione senescente, invece, il modello pur simulando adeguatamente la crescita e la rottura del

tessuto bruno (valore minimo di $r = 0.800$), mostra una chiara tendenza a sovrastimarne i valori nelle foglie adulte (Figg. 34a, b; 36).

Ciò è particolarmente evidente per lo scenario 2 anche se, in entrambi i confronti delle simulazioni invernali, la media dello scarto assoluto è risultato di poco superiore o prossima ad 1 centimetro.

Anche le simulazioni reattive al periodo estivo (scenario 1 e 3 - estate) hanno fatto registrare per il confronto tra i fasci osservati e simulati, valori elevati di r (valore massimo = 0.986), ed uno scarto assoluto medio confrontabile, almeno per lo scenario 3, con i risultati invernali. Più elevati sono risultati, invece, i valori dello scarto assoluto per lo scenario 1 superando, nel caso del confronto con il *dataset* di validazione, anche i 10 centimetri. Malgrado ciò, le estensioni fogliari simulate, presentano valori nei *ranges* di quelli mediamente registrati in natura per foglie adulte ed intermedie dello stesso rango.

In questo momento stagionale le condizioni di crescita delle foglie adulte si presentano generalmente stabili ed a lento accrescimento, mentre quelle delle foglie intermedie mostrano semplicemente una transizione allo stadio adulto.

Questo stato di evidente stazionarietà sembrerebbe ben simulato per entrambe le fasce di profondità (Tab.8; Tab.9; Figg. 37a, b, c; Figg. 39a, b, c) tanto che, per quanto leggermente meno efficienti, nel caso della simulazione più profonda, i risultati dei confronti delle due simulazioni estive con i dati osservati possono considerarsi più che soddisfacenti e del tutto sovrapponibili.

rango	estate							
	scenario 1				scenario 1			
	modello		calibrazione		modello		validazione	
	verde	bruno	verde	bruno	verde	bruno	verde	bruno
12	2.84	0.01	6.40	3.50	2.84	0.01	23.80	9.04
11	14.75	6.11	17.50	4.97	14.75	6.11	25.80	11.32
10	67.14	2.70	77.70	5.72	67.14	2.70	72.80	7.34
9	94.80	7.18	98.10	4.54	94.80	7.18	81.67	6.33
8	109.66	1.86	106.00	3.31	109.66	1.86	93.73	6.15
7	94.28	0.00	102.00	1.96	94.28	0.00	99.37	3.87
6	69.29	1.45	88.70	0.62	69.29	1.45	93.63	1.34
5	44.96	0.00	52.40	0.05	44.96	0.00	54.00	0.06
4	3.00	0.00	17.00	0.00	3.00	0.00	10.33	0.00

Tab. 8: Lunghezza tessuto verde e tessuto bruno (cm). Valori osservati e valori simulati.

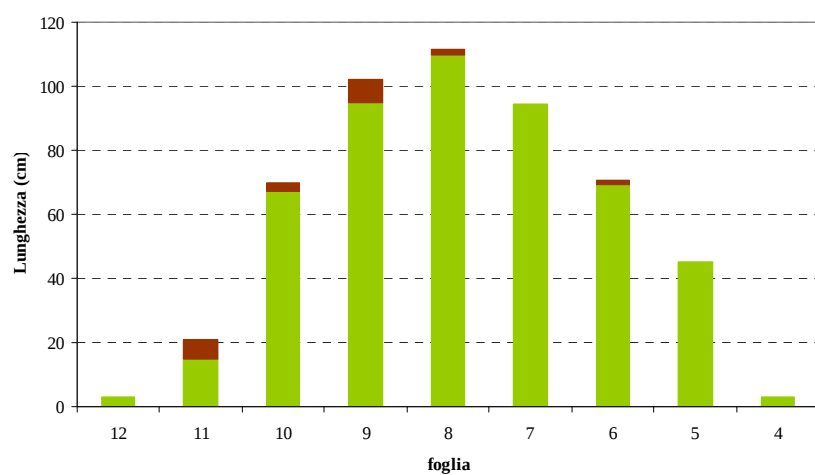


Fig. 37a: Istogramma delle lunghezze fogliari. Scenario 1 – estate (modello).

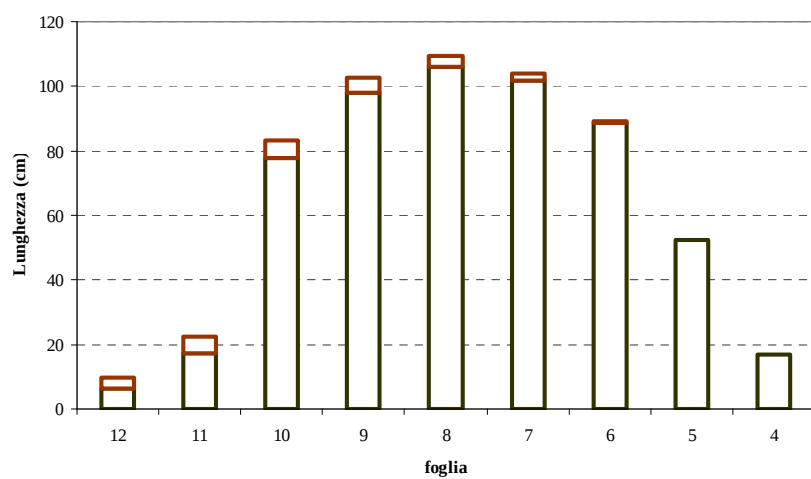


Fig. 37b: Istogramma delle lunghezze fogliari. Scenario 1 – estate (dati calibrazione).

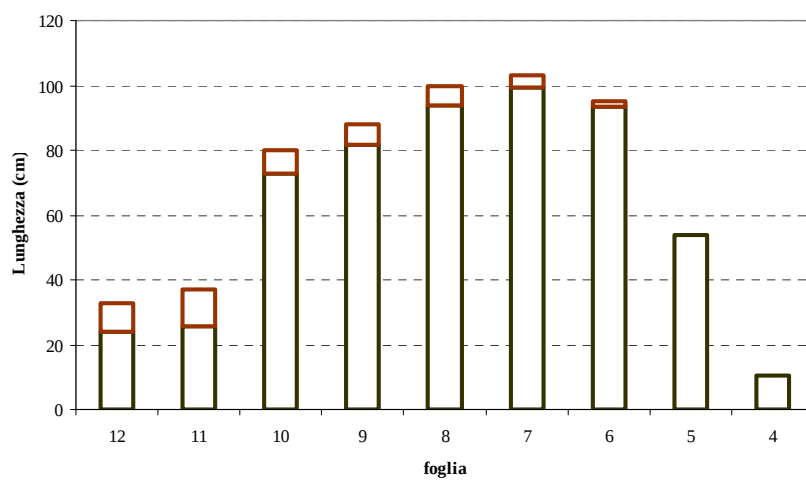


Fig. 37c: Istogramma delle lunghezze fogliari. Scenario 1 – estate (dati validazione).

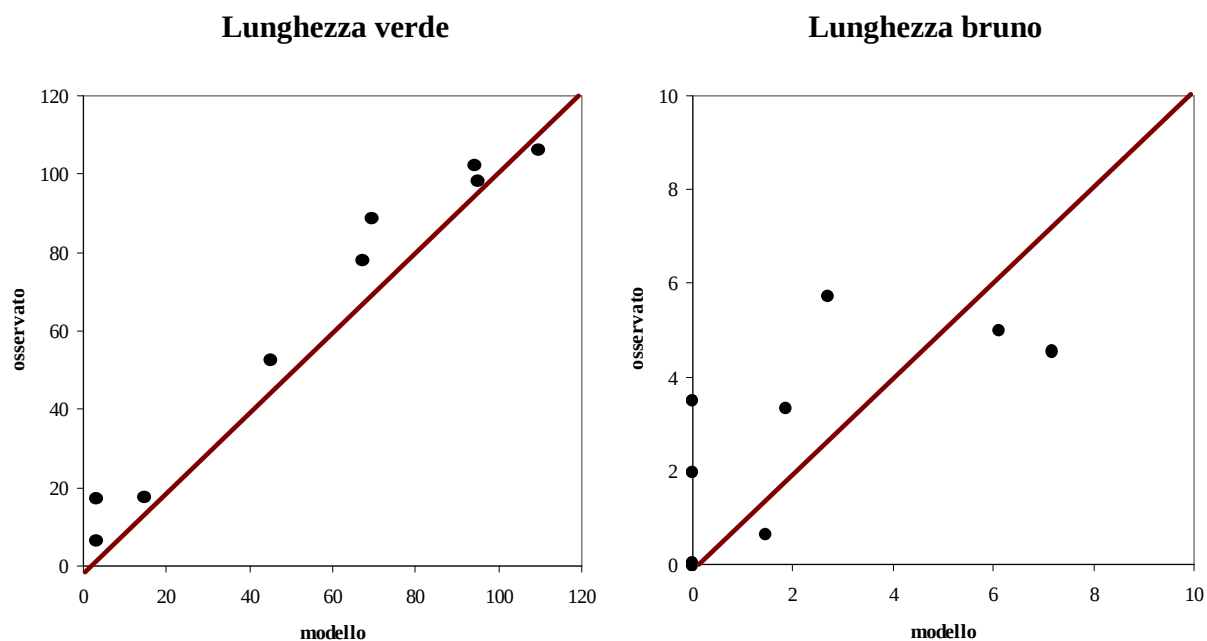


Fig. 38a: Lunghezza tessuto verde e tessuto bruno (cm). Valori osservati vs simulati. Scenario 1- estate (calibrazione).

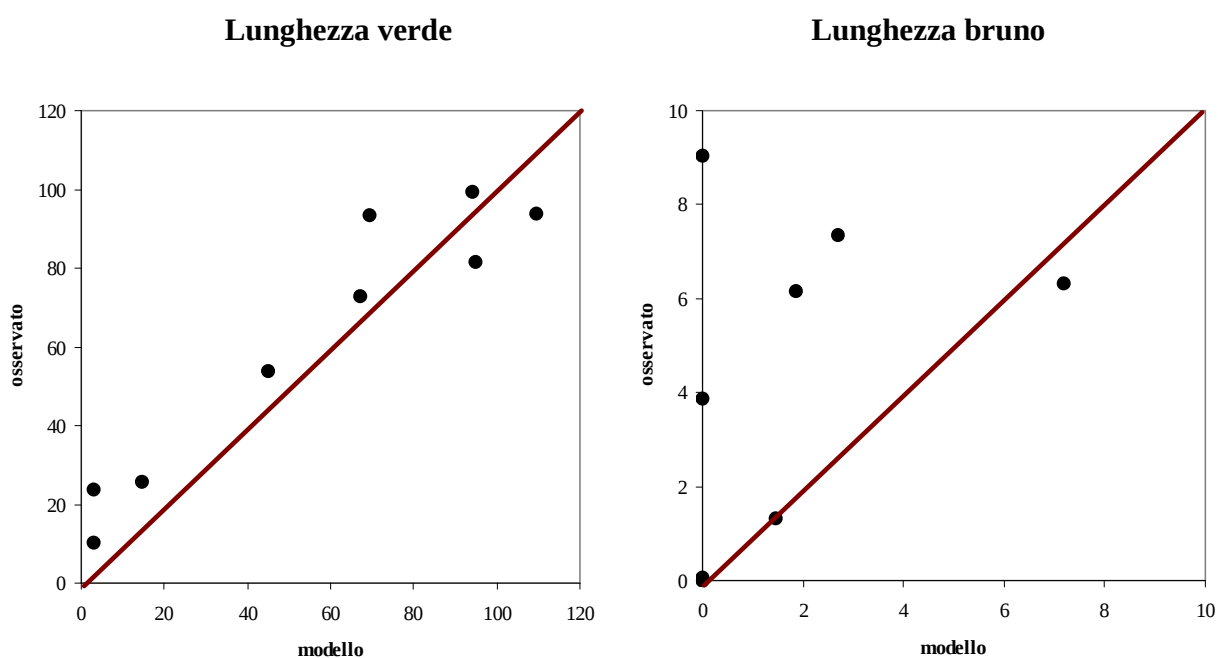


Fig. 38b: Lunghezza tessuto verde e tessuto bruno (cm). Valori osservati vs simulati. Scenario 1- estate (validazione).

estate								
scenario 3					scenario 3			
rango	modello		calibrazione		modello		validazione	
	verde	bruno	verde	bruno	verde	bruno	verde	bruno
12								
11	6.42	0.00	8.70	5.00	6.42	0.00	20.93	4.00
10	30.02	0.00	29.80	1.30	30.02	0.00	31.25	3.76
9	43.50	3.91	36.00	5.91	43.50	3.91	34.53	5.16
8	41.72	7.44	41.00	6.80	41.72	7.44	40.42	4.44
7	32.03	12.75	40.80	6.30	32.03	12.75	40.87	3.40
6	20.10	11.60	34.30	3.84	20.10	11.60	28.81	3.04
5	13.28	0.47	19.62	1.30	13.28	0.47	14.09	0.85
4	0.59	0.00	4.48	0.11	0.59	0.00	4.88	0.00

Tab. 9: Lunghezza tessuo verde e tessuto bruno (cm). Valori osservati e valori simulati.

Anche in questo caso, nella “*performance*” del modello si registra la tendenza ad una sottostima dei valori della componente fotosintetica che, in entrambi gli scenari, interessa soprattutto le prime foglie intermedie (rango 4-5) e le ultime foglie adulte (rango 11-12) (Figg 38a, b; Figg 40a, b).

In ogni caso, il modello dimostra di simulare correttamente le variazioni ed in particolare, la riduzione nei valori della lunghezza media delle foglie per fasci posti in condizioni di minore disponibilità di luce (scenario 3), riportando infatti, per la simulazione a maggiori profondità, lunghezze sia per le foglie adulte che intermedie mai superiori ai 60 cm, mentre per i fasci relativi alla simulazione più superficiale i valori simulati delle estensioni della lamina fogliare sono risultate prossime o superiori al metro (Buia et al., 1992).

In termini di tessuto bruno, il modello si è dimostrato meno efficiente rispetto agli scenari invernali con valori massimi del coefficiente di correlazione di poco superiori a 0.600.

Ciò può trovare spiegazione nel fatto che in inverno, i valori del tessuto bruno sono generalmente molto bassi o più spesso nulli intervenendo processi stocastici di rottura; l’80% delle foglie adulte ed intermedie con apice intero non mostra, infatti, segni di senescenza (dati storici).

Le migliori *performances* registrate in inverno, nella previsione della lunghezza del tessuto bruno, deriverebbero quindi più dalla capacità del modello di riportare adeguatamente le assenze della porzione bruna sulla foglia che di simularne le lunghezze.

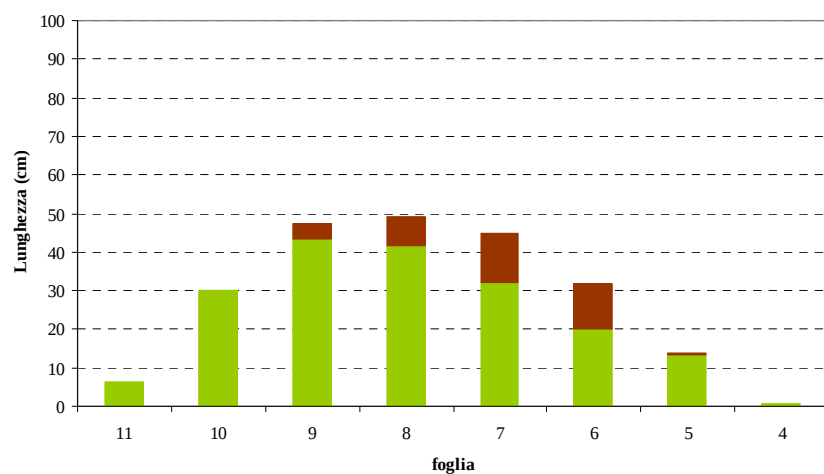


Fig. 39a: Istogramma delle lunghezze fogliari. Scenario 3 –estate (modello).

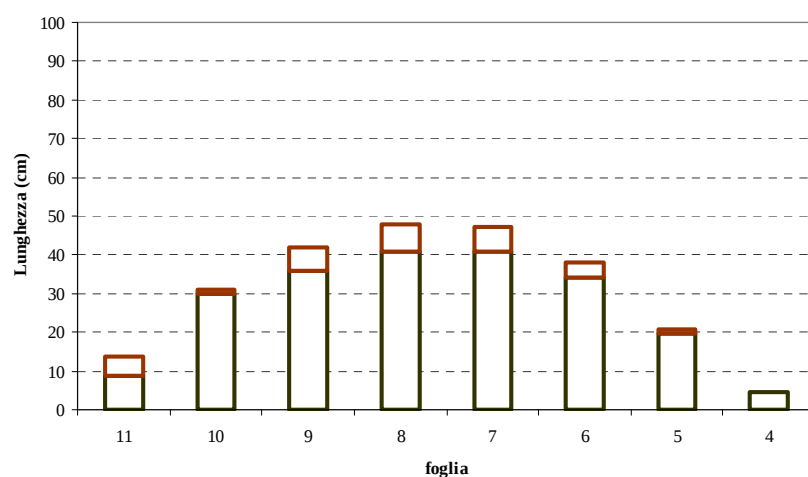


Fig. 39b: Istogramma delle lunghezze fogliari. Scenario 3 – estate (dati calibrazione).

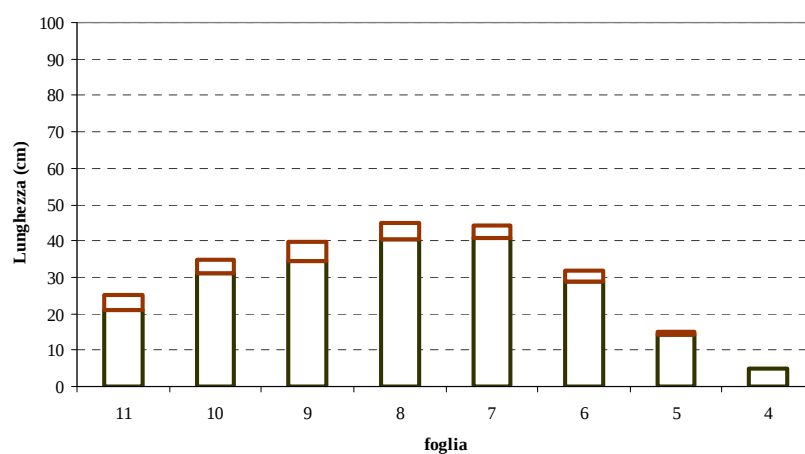


Fig. 39c: Istogramma delle lunghezze fogliari. Scenario 3 – estate (dati validazione).

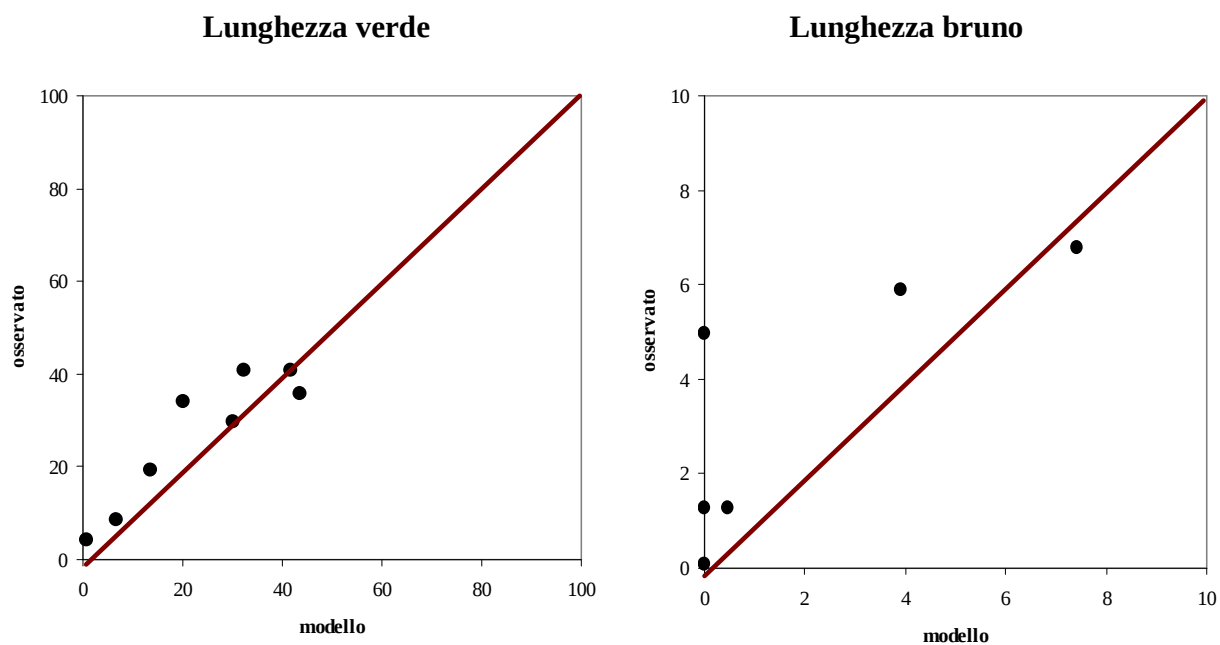


Fig. 40a: Lunghezza tessuto verde e tessuto bruno (cm). Valori osservati vs simulati. Scenario 3- estate (calibrazione).

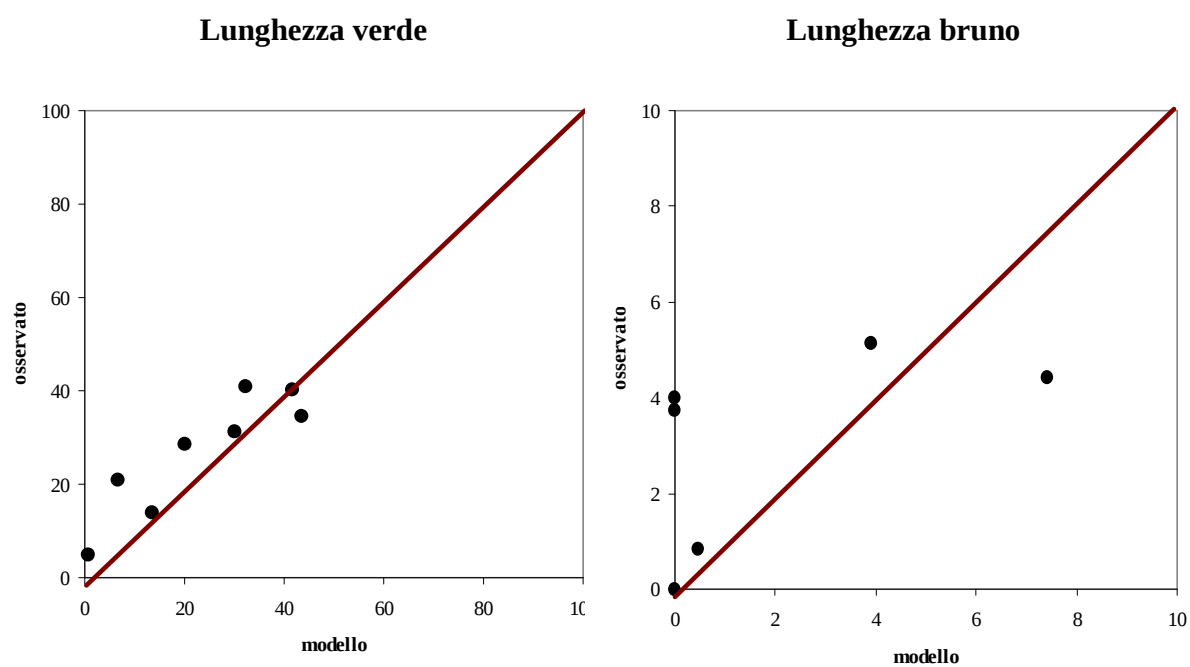


Fig. 40b: Lunghezza tessuto verde e tessuto bruno (cm). Valori osservati vs simulati. Scenario 3- estate (validazione).

Comunque, in estate, coerentemente con i risultati ottenuti per il tessuto verde, anche per la componente senescente della foglia, il modello tende a sottostimarne le lunghezze. I valori dello scarto assoluto sono risultati comunque, contenuti e più o meno in linea con quelli registrati per le altre simulazioni.

Il massimo valore dello scarto assoluto medio è risultato di poco superiore a 3 centimetri ed è stato registrato per lo scenario 3.

Infine, lo scenario primaverile (Tab. 10; Figg. 41a, b, c; Figg. 42a, b) rivela per il tessuto verde, una capacità previsionale del modello perfettamente confrontabile con quella delle altre simulazioni ed in particolare con quelle dello scenario 1 (inverno ed estate).

I valori del coefficiente di correlazione, per quanto leggermente più modesti rivelano comunque, una buona concordanza tra i dati osservati e quelli simulati confermata, peraltro, da valori dello scarto assoluto anche inferiori a quelli riportati per il periodo estivo.

rango	primavera							
	scenario 1				scenario 1			
	modello		calibrazione		modello		validazione	
	verde	bruno	verde	bruno	verde	bruno	verde	bruno
10	11.90	0.19	13.28	0.06	11.90	0.19	10.25	0.00
9	15.50	0.23	14.94	0.14	15.50	0.23	12.21	0.40
8	17.30	0.20	22.96	0.27	17.30	0.20	21.79	0.00
7	28.00	0.30	30.95	0.22	28.00	0.30	29.04	0.00
6	26.00	0.40	30.75	0.27	26.00	0.40	30.33	0.00
5	20.92	0.35	22.27	0.11	20.92	0.35	23.33	0.00
4	16.38	0.28	9.95	0.00	16.38	0.28	7.00	0.00

Tab. 10: Lunghezza tessuo verde e tessuto bruno (cm). Valori osservati e valori simulati.

Pure in questo caso, il modello tende a sottostimare la lunghezza della componente fogliare fotosintetizzante ma con valori di scarto, mai superiori a 5 cm.

Più bassa è risultata invece, la correlazione tra i dati osservati e simulati della porzione bruna della foglia.

Sia per i confronti con i dati di calibrazione che per quelli con i dati di validazione, i valori di r sono risultati, infatti, ben più bassi rispetto agli altri scenari (valore massimo = 0.265).

Nel caso del confronto con i dati di calibrazione i valori delle lunghezze del bruno si distribuiscono senza alcuna evidente relazione lineare, ma formano piuttosto una nube

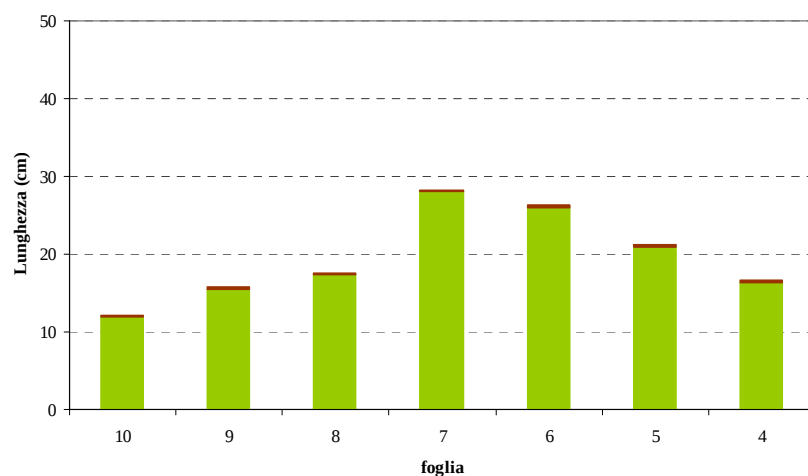


Fig. 41a: Istogramma delle lunghezze fogliari. Scenario 1 – primavera (modello).

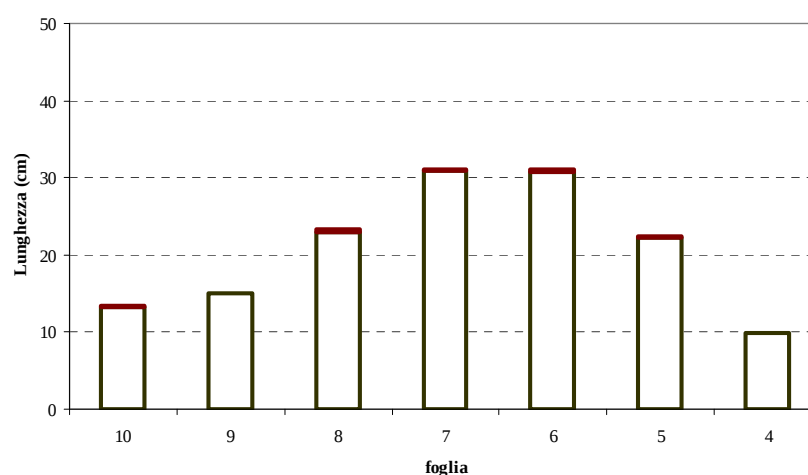


Fig. 41b: Istogramma delle lunghezze fogliari. Scenario 1 – primavera (dati calibrazione).

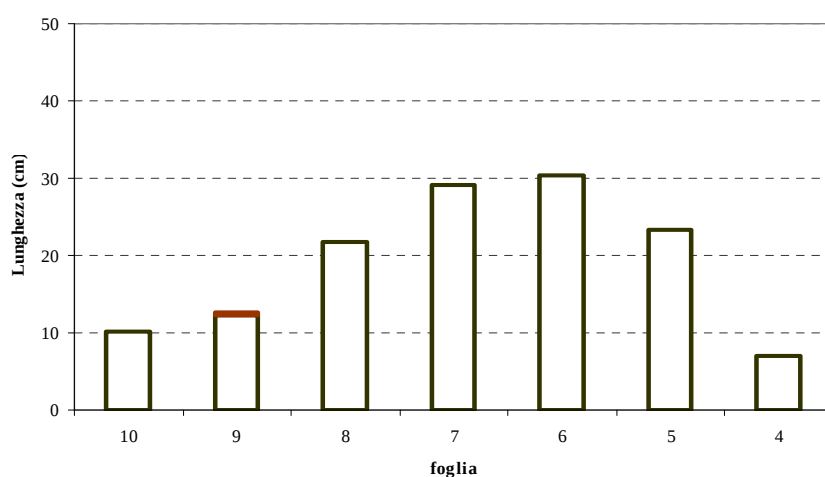


Fig. 41c: Istogramma delle lunghezze fogliari. Scenario 1 – primavera (dati validazione).

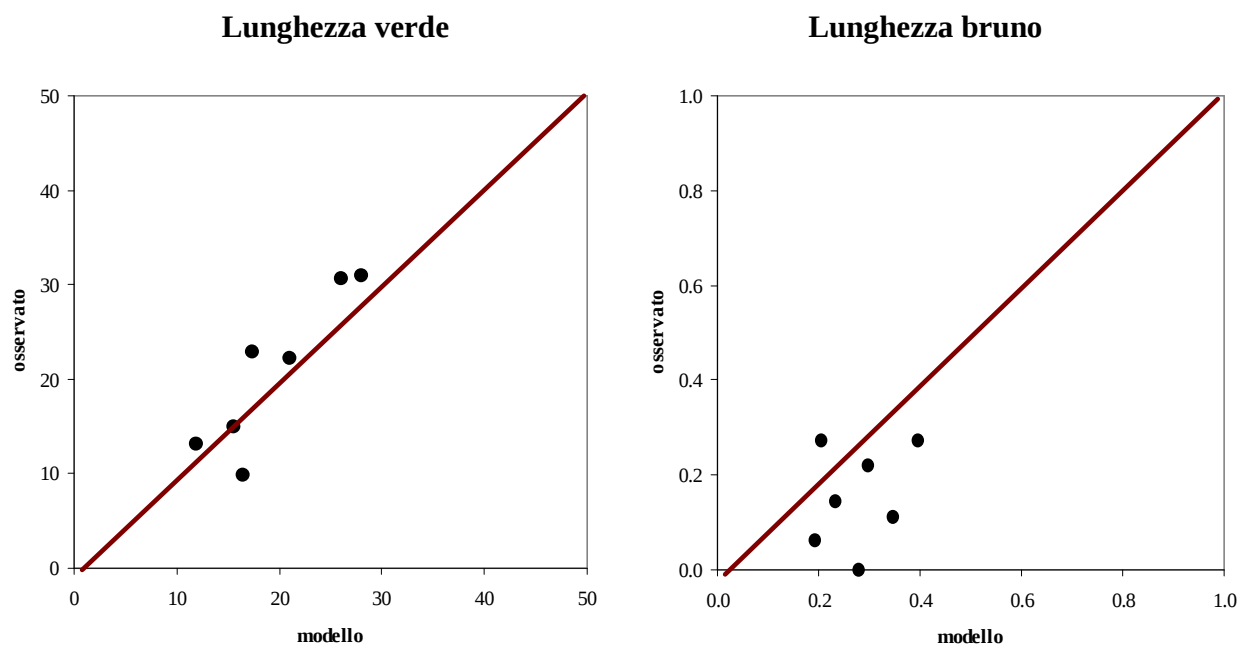


Fig. 42a: Lunghezza tessuto verde e tessuto bruno (cm). Valori osservati vs simulati. Scenario 1- primavera (calibrazione).

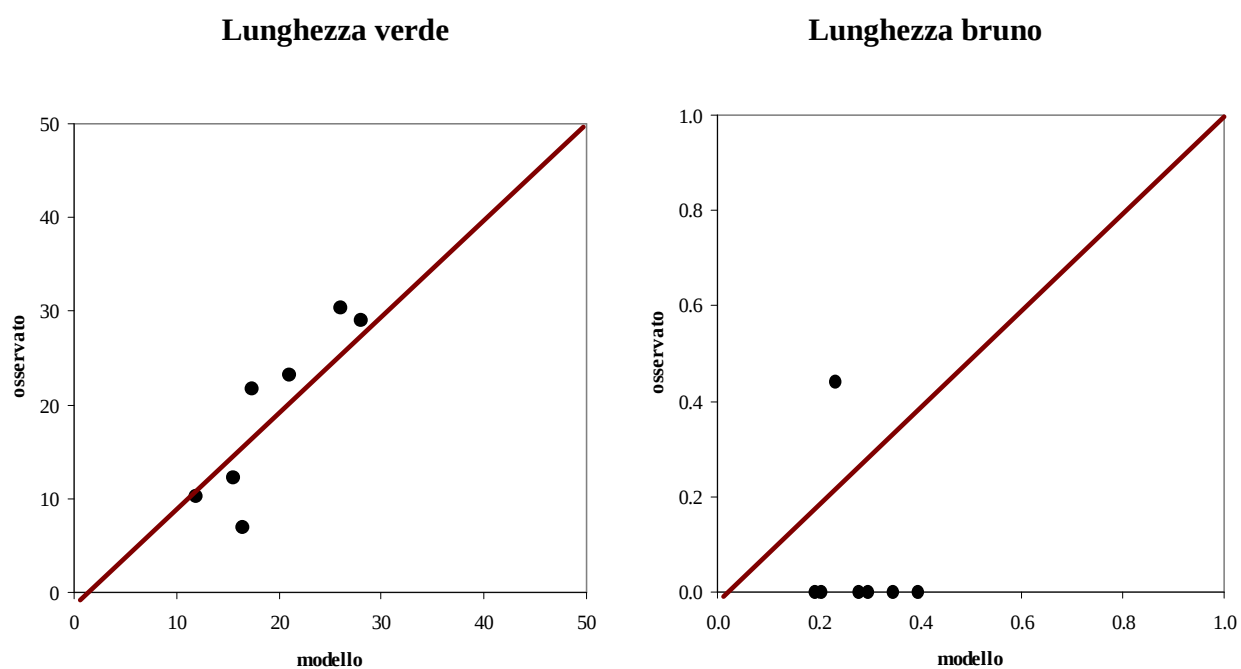


Fig. 42b: Lunghezza tessuto verde e tessuto bruno (cm). Valori osservati vs simulati. Scenario 1- primavera (validazione).

dispersa di punti con stime comprese tra un minimo di 0.00 cm (assenza di tessuto bruno) ed un massimo di 0.40 cm. Nel caso del confronto con i dati di validazione invece, il modello sembra non riuscire a simulare valori del tessuto bruno molto bassi. In primavera infatti, più che inverno, la porzione senescente costituisce una minima parte della lamina fogliare (Fig. 43), mentre la percentuale di casi di foglie adulte ed intermedie prive di tessute bruno non supera il 60%. La crescita delle foglie intermedie raggiunge il massimo, mentre le foglie adulte in cui era possibile riconoscere i processi di imbrunimento sono quasi del tutto cadute durante l'inverno tanto che in primavera la prateria risulta verde, lucente e completamente integra.

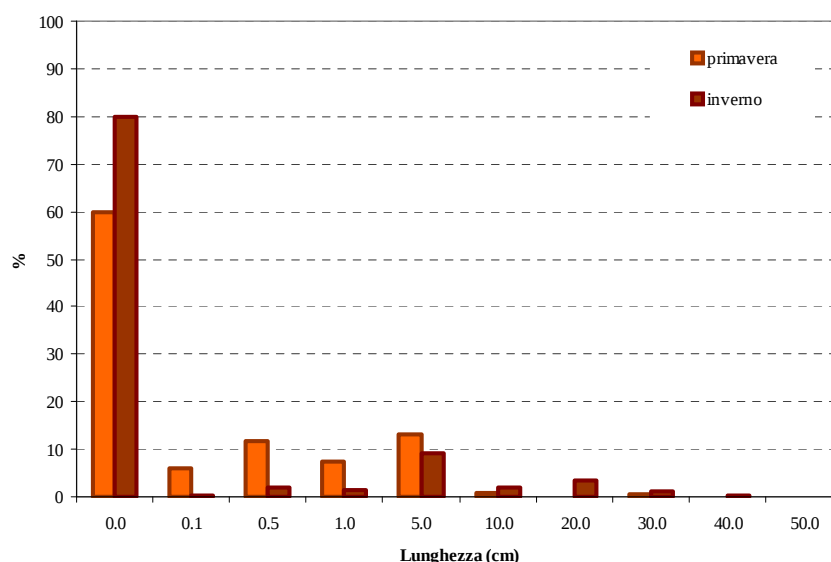


Fig. 43: Valori percentuali delle classi di lunghezza (cm) del tessuto bruno in primavera ed in inverno (database storico).

In definitiva, il modello sembra simulare adeguatamente le condizioni di senescenza dei lembi fogliari che si verificano in inverno ed anche estate mentre, non riesce a ben rappresentarle in primavera quando i valori del tessuto bruno sono generalmente più bassi.

Va comunque, sottolineato che i processi di erosione a carico del tessuto bruno sono estremamente complessi comprendendo oltre a fattori casuali di *stress* meccanico e di senescenza per decomposizione microbica, anche processi non trascurabili di *grazing* animale non implementati in questo modello.

Nel complesso, per quanto il modello fornisca risultati meno soddisfacenti nella simulazione della formazione del tessuto bruno rispetto a quello verde (Fig. 44), mostrando una minore capacità previsionale delle condizioni di senescenza delle lamine fogliari, le “performances” registrate per le varie simulazioni rivelano come esso sia comunque, uno strumento capace di riprodurre adeguatamente la forma dei fasci naturali di *Posidonia oceanica* sia nella distribuzione del numero di foglie che in quella delle lunghezze fogliari in differenti momenti stagionali.

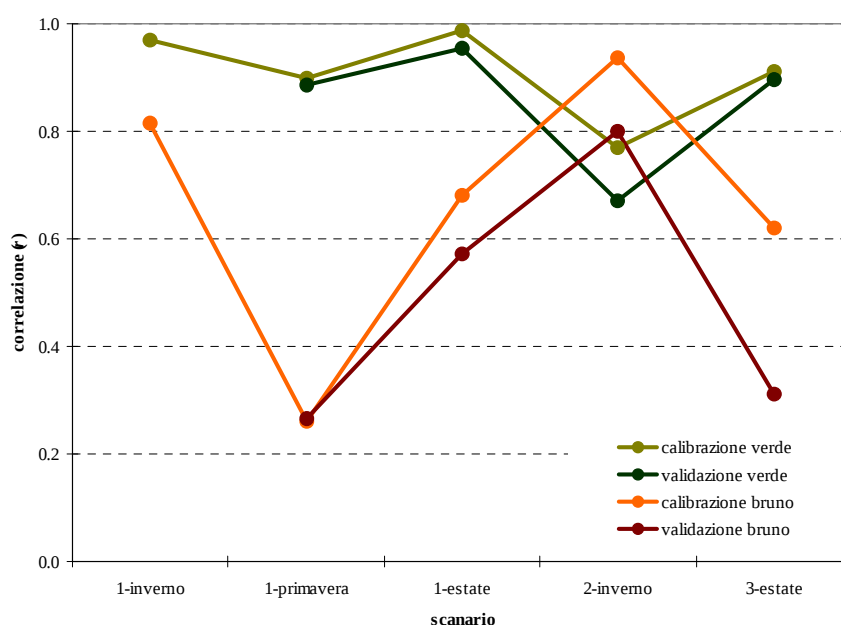


Fig. 44: Valori del coefficiente di correlazioni (r) dei confronti tra dato osservati e simulati per ciascuno scenario.

A conferma di ciò va sottolineata anche la forte correlazione ($r = 0.9125$) (Fig. 47) registrata nel confronto tra le variazioni dei valori della lunghezza delle foglie intermedie osservate in letteratura nel corso dell'anno (Buia et al., 1992) con quelle delle foglie simulate ed in particolare, con i valori massimi ottenuti dal modello per ciascuna prima foglia intermedia per ogni mese (Figg. 45-46). Come si può notare l'andamento delle lunghezze delle foglie intermedie per le due serie di dati è pressochè sovrapponibile soprattutto nel periodo estivo e tardo autunnale in cui le differenze tra i valori delle lunghezze non hanno mai superato mediamente i 5 centimetri (4.79 cm).

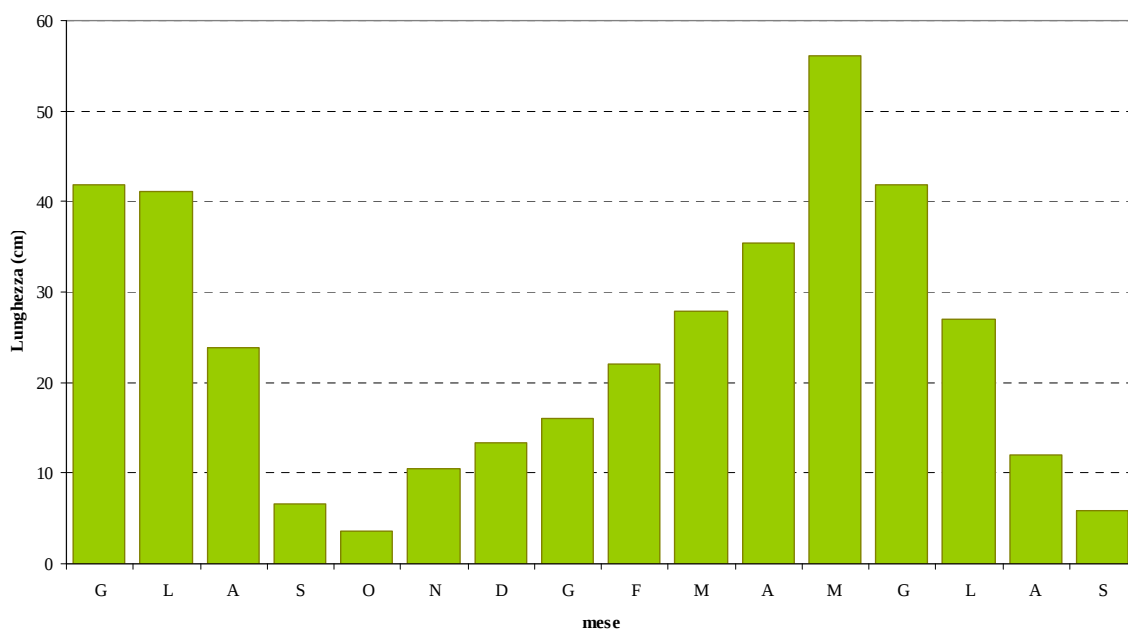


Fig. 45: Istogramma delle lunghezze fogliari della prima foglia intermedia (modello - scenario 1).

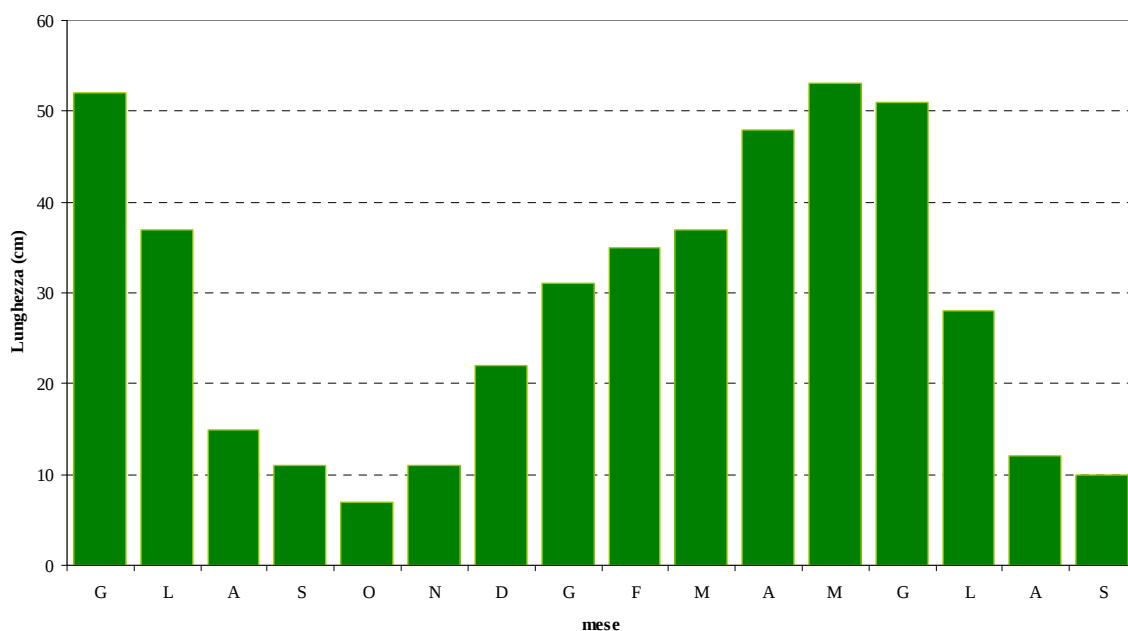


Fig. 46: Istogramma delle lunghezze fogliari delle foglie intermedie per profondità comprese tra 5 e 20 metri (Buia et al. 1992).

Meno concorde è risultata invece, la variazione nel periodo invernale e primaverile con valori medi di scarto tra le due serie di lunghezza delle foglie di poco superiori ai 12 centimetri (Fig. 48). In questo periodo infatti, ed in particolare in quello primaverile a conferma di quanto accennato nelle pagine precedenti, il modello per quanto efficiente, mostra una leggera tendenza a sottostimare le lunghezze fogliari.

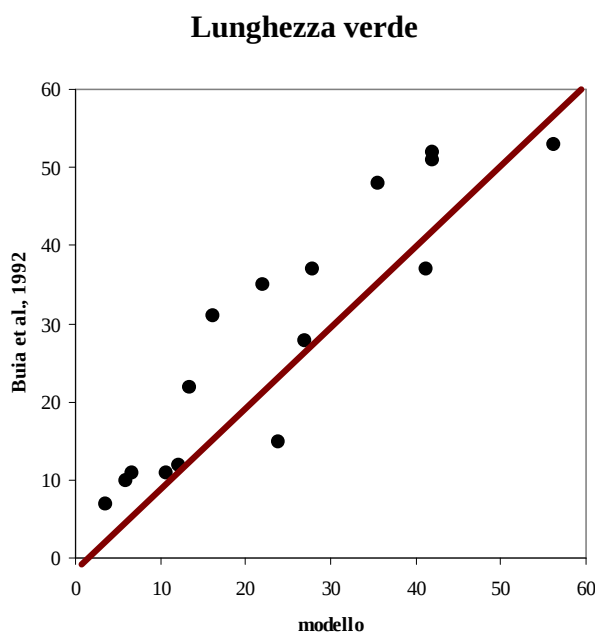


Fig. 47: Lunghezza foglie intermedie (cm). Valori osservati vs simulati.

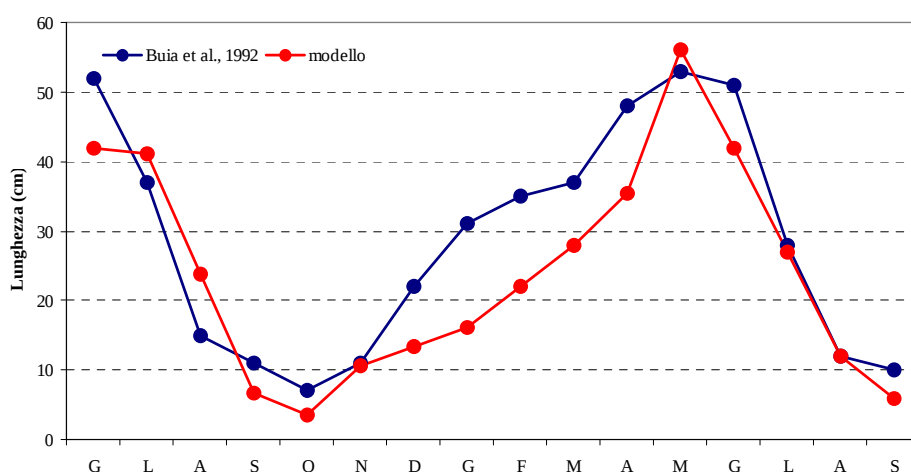


Fig. 48: Andamento stagionale della lunghezza delle foglie intemedie.

4. CONCLUSIONI

Il modello implementato in questo progetto è il risultato di uno studio integrato di approfondimento dell'informazione derivata da dati di campo e da altre applicazioni modellistiche sui processi di crescita delle foglie di *P. oceanica*.

Esso è stato sviluppato con l'obiettivo di ottenere uno strumento modellistico il più possibile semplice sia in termini di processi descritti che di parametri utilizzati e quindi rappresenta solo il punto di partenza, per quanto pienamente funzionante, della simulazione dei processi di crescita delle foglie di questa fanerogama sotto il controllo di fattori intrinseci (età della lamina fogliare) e di alcune forzanti ambientali (temperatura ed irradianza).

Il modello, allo stadio di implementazione restituito da questo progetto, può essere considerato come il primo modulo di un sistema più complesso e potenzialmente integrabile con la simulazione dei meccanismi di sviluppo e crescita delle altre componenti della pianta (rizomi ed eventualmente radici). Avendo, infatti, modellizzato la dinamica e l'evoluzione nel tempo non solo dei processi di crescita di una singola foglia, ma anche quelle dell'insieme fogliare (cioè del fascio) cui essa appartiene, è ipotizzabile la possibilità di realizzare una nuova componente del modello che simuli lo sviluppo della porzione di rizoma soggiacente, da integrare poi con le dinamiche di crescita, propagazione e dicotomizzazione che caratterizzano la complessa architettura dell'apparato ipogeo sotto particolari vincoli ambientali (disponibilità di luce, tipologia del substrato, densità fogliare).

D'altro canto non è escluso che, sia allo stato attuale di realizzazione che nella potenziale forma integrata (foglie, rizomi e radici), questo modello possa essere applicato anche ad altre fanerogame marine mediterranee, ovviamente previa rimodulazione dei suoi parametri sulla base delle diverse caratteristiche fisiologiche di queste ultime rispetto alla *Posidonia*.

Al momento, il modello è stato sviluppato per consentire all'utente di simulare in condizioni di irradianza, torbidità e profondità date, le variazioni giornaliere di crescita delle foglie di *P. oceanica*. A questo fine ogni simulazione utilizza un valore fisso e sito-specifico per i tassi di accrescimento massimo giornaliero.

Fra i possibili sviluppi nella direzione dell'allargamento della base di variabili predittive, si ipotizza l'inserimento delle coordinate geografiche, sotto l'ipotesi che esse integrino efficacemente un insieme di informazioni non semplici o economiche da considerare

singularmente in maniera esplicita (ad esempio, ciò riguarda le variabili legate alle condizioni climatiche).

I risultati ottenuti dal confronto con i dati disponibili per la validazione rivelano che l'approccio modellistico implementato fornisce una rappresentazione ragionevole del ciclo stagionale di crescita delle foglie di *Posidonia oceanica*, riproducendo adeguatamente la forma dei fasci naturali sia nella distribuzione del numero delle foglie che in quella delle lunghezze fogliari.

Malgrado ciò, la *performance* meno soddisfacente registrata nella simulazione del tessuto bruno impone un miglioramento della fase di calibrazione e di ottimizzazione dei parametri del modello per questa componente, soprattutto in ragione della sua forte variabilità.

D'altra parte, è evidente che la parametrizzazione di un modello come quello realizzato nell'ambito di questo studio, è un processo che non si esaurisce mai, poichè sarà sempre possibile definire un insieme dei valori dei parametri capace di fornire, per un determinato scenario, una simulazione più accurata di quella ottenibile con i valori di base dei parametri del modello.

Un miglioramento della parametrizzazione è dunque sicuramente uno degli obiettivi prioritari da perseguire in uno sviluppo prossimo futuro, anche mediante la realizzazione di una strategia di calibrazione basata su metodi di ottimizzazione efficienti, come ad esempio gli algoritmi genetici (GA).

In particolare, questa soluzione sembra promettente in uno scenario come quello della modellizzazione dell'espansione e dell'erosione dei tessuti fogliari (di quello verde, ma soprattutto di quello bruno) di *P. oceanica*, in cui tutti i processi rilevanti sono estremamente complessi e poco conosciuti nella loro dinamica.

D'altro canto, l'ottimizzazione della scelta dei parametri del modello e la possibilità di riparametrizzare facilmente il modello stesso, sono elementi essenziali per la sua efficace applicazione in siti diversi, che rimane però comunque, subordinata all'acquisizione di nuovi dati di campo.

Pur con i margini di ulteriore sviluppo di cui si è fatto cenno, il modello presentato può essere considerato un valido strumento per la stima di un descrittore critico dello stato di vitalità delle piante di *Posidonia* come la lunghezza fogliare, la cui valutazione, soprattutto ai

fini del calcolo della produzione primaria espressa delle praterie, viene comunemente ottenuta con metodi più o meno speditivi, ma raramente soddisfacenti.

In quest'ottica, questo modello può rappresentare un valido elemento di supporto nei casi in cui occorra uno strumento:

- previsionale, ad esempio nel caso di studi sulle caratteristiche morfo-funzionali delle praterie di *Posidonia* e della previsione di possibili cambiamenti nella loro struttura;
- decisionale, come nei casi in cui si debbano svolgere studi preliminari ad attività di restauro ambientale (es. attraverso attività di riforestazione).

In definitiva, il risultato di questo progetto si configura come un prodotto modellistico aperto che potrà essere ulteriormente ottimizzato e migliorato nelle sue potenzialità, e che potrà essere applicato utilmente sia nell'ambito della ricerca di base, sia in quello della ricerca applicata, come, ad esempio, a supporto delle politiche della gestione integrata della fascia costiera.

5. BIBLIOGRAFIA

ARATA P. & DIVACCO G., 1989. Importanza delle praterie di *Posidonia oceanica* nel sistema marino costiero e degli interventi per la loro salvaguardia. *Acqua & Aria*, 5: 555-571.

ASAEDA T., VAN BON T., 1997. Modelling the effects of macrophytes on algal blooming in eutrophic shallow lakes. *Ecol. Modell.*, 104: 261-287.

BACH H. K., 1993. A dynamic model describing the seasonal variations in growth and the distribution of eelgrass (*Zostera marina* L.). I. Model theory. *Ecol. Model.*, 65: 31-50.

BACH, H.K., JENSEN, K., LYNGBY, J.J., 1997. Management of marine construction works using ecological modelling. *Estuarine Coastal Shelf Sci.* 44 (Suppl. A), 3 –14.

BANKS J., CARSON J.S., 1984. *Discrete-Event System Simulation*, Prentice Hall, 1984

BAY D., 1984. A field study of the growth dynamics and productivity of *Posidonia oceanica* (L.) Delile in Calvi Bay. Corsica. *Aquat Bot.*, 20: 43-64.

BELLAN-SANTINI D., LACAZE J. C., POIZAT C., 1994. Les biocénoses marines et littorales de Méditerranée, synthèse, menaces et perspectives. Muséum National d'Histoire Naturelle publ., Paris: 1-246.

BEST E. P. H., AND JACOBS, F. H. H., 1990. Potential and actual production of submerged aquatic angiosperms common in temperate regions. *Proceedings, 8th Symposium on Aquatic Weeds*, 39-47.

BEST E. P. H., BUZZELLI C. P., BARTELL S. M., WETZEL R. L., BOYD W. A., DOYLE R. D. CAMPBELL K. R., 2001. Modeling submersed macrophyte growth in relation to underwater light climate: modeling approaches and application potential. *Hydrobiologia*. 444: 43–70.

BEST, E. P. H., AND BOYD, W. A., 2003. A simulation model for growth of the submersed aquatic macrophyte sago pondweed (*Potamogeton pectinatus* L.) (Technical report in preparation), U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.

BIBER P. D. HARWELL M. A., CROPPER W. P. JR., 2004. Modeling the dynamics of three functional groups of macroalgae in tropical seagrass habitats. *Ecological Modelling*, 175: 25–54.

BOCCI, M., COFFARO, G., BENDORICCHIO, G., 1997. Modelling biomass and nutrient dynamics in eelgrass (*Zostera marina* L.): application to the lagoon of Venice (Italy) and Oresund (Denmark). *Ecol. Model.*, 102: 67–80.

BORUM J., DUARTE C.M., KRAUSE-JENSEN D. AND GREVE T.M., 2004. European seagrasses: an introduction to monitoring and management, 1-87.

BOUDOURESQUE C. F., MEINESZ A., 1982. Découverte de l'hervier de Posidonie. Cahier Parc National Port-Cross, 4: 1-79.

BRIGOLIN D., PASTRES R., SFRISO A., CURIEL D., 2003. Identificazione di un modello di dinamica di popolazione di *Cymodocea nodosa* (Ucria) in laguna di Venezia. Convegno XIV CONGRESSO NAZIONALE S.IT.E., Siena, 4-8 OTTOBRE, SIENA, pp. 37.

BUIA M.C., ZUPO V., & MAZZELLA L., 1992. Prymay production and growth dynamics in *Posidonia oceanica*. P.S.Z.N.I. Marine Ecology, 13: 2-16.

BUIA M.C. & MAZZELLA L. 2000. Diversity in seagrass ecosystems: biological descriptors at different temporal scales. Biol. Mar. Medit., 7(2): 203 – 206.

BULTHUIS D.A., 1987. Effects of temperature on photosynthesis and growth of seagrasses. Aquat. Bot., 27: 27-40.

CALADO G., DUARTE P., 2000. Modelling growth of *Ruppia cirrhosa* . Aquat. Bot., 68: 29-44.

CAYE G., 1980. Sur la morphogénèse et le cycle végétatif de *Posidonia oceanica* (L.) Delile. Thèse Doctorat 3ème cycle, Univ. Aix-Marseille II, 1-121.

CARR G.M., DUTHIE H.C., TAYLOR W.D., 1997. Models of aquatic plant productivity: a review of the factors that influence growth. Aquat. Bot., 59: 195-215.

CERRANO C., PONTI M., SILVESTRI S., 2004. Guida alla biologia marina del Mediterraneo. Ananke srl (TO), 319 pp.

CHIMENZ C., TARAMELLI E., CIRONI R., CONTESSINI A., GRAVINA F., MAGGIONE R., MAJ R.L.C., MOTTA M.G., SOMASCHINI A., 1989. Studies on animal populations of leaves and rhizomes of *Posidonia oceanica* (L.) Delile on the rocky bottom of Torvaldaliga (Italy) International Workshop *Posidonia oceanica* Beds, Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac et Olivier J. edit., GIS Posidonie publ., 2: 145-155.

COFFARO, G., SFRISO, A., 1997. Simulation model of *Ulva rigida* growth in shallow water of the Lagoon of Venice. Ecol. Model., 102: 55-66.

COSTES E., LICHOU J., AUDUBERT A., JAY M., GUEDON Y., DE REFFYE P., 1993. Modelling of growth of apricot cultivars under various conditions. Acta Horticulturae, 349: 247-252.

CROUZET A., 1981. Mise en évidence de variations cycliques dans les écailles de rhizomes de *Posidonia oceanica* (Potamogetonaceae). Trav. sci. Parc nation. Port-Cros, 7: 129-135.

DABADIE P., DE REFFYE P., DINOUEARD, P. 1991. Modelling bamboo growth and architecture: *Phyllostachys viridi-glaucescens* Rivière A. and C. J. Am. Bamboo Soc., 8 (1-2): 65–79.

DENNISON W. C., ALBERTE R. S., 1896. Photoadaptation and growth of *Zostera marina* L. (eelgrass) transplant along a depth gradient. J. Exp. Mar. Bio. Ecol., 98: 265-282.

de REFFYE P., EDELIN C., JAEGER M., 1989. Computer simuliert Pflanzenwachstum: Die grüne Zeitmaschine. Bild der Wissenschaft, 8: 46–52.

DREW E.A., 1979. Physiological aspects of primary production in seagrasses. Aquat. Bot., 7: 139-150.

ELKALAY K., SKLIRIS N., FRANGOULIS C., GOFFART A., GOBERT S., LEPOINT G., HECQ J.H., 2000. A model describing the *P. oceanica* growth. Biol. Mar. Medit., 7(2): 47-50.

ELKALAY K., FRANGOULIS C., SKLIRIS N., GOFFART A., GOBERT S., LEPOINT G., HECQ J.H., 2003. A model of the seasonal dynamics of biomass and production of the seagrass *Posidonia oceanica* in the Bay of Calvi (Northwestern Mediterranean). Ecol. Model., 167: 1-18.

FERNÁNDEZ-TORQUEMADA Y., SÁNCHEZ-LIZASO J.L., 2005. Effects of salinity on leaf growth and survival of the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica* (L.) Delile. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 320: 57–63.

FONG P., HARWELL M. A., 1994. Modeling seagrass communities in tropical and subtropical bays and estuaries: A mathematical model synthesis of current hypotheses. Bulletin of Marine Science, 54: 757–781.

FONG P., JACOBSON M. E., MESCHER M. C., LIRMAN D., HARWELL M. C., 1997. Investigating the management potential of a seagrass model through sensitivity analysis and experiments. Ecological Applications, 7: 300–315.

FRESI E., CINELLI F., MAZZELLA L., DE ROSA S., RIGILLO TRONCONE M., SAGGIOMO V., 1979. Dati sull'ecologia dell'ecosistema *Posidonia oceanica* (L.) Del. intorno l'isola d'Ischia. Atti Convegno Scientifico Nazionale (Roma 5-6-7 Marzo 1979) 1, 145-155.

GAMBI M.C., BUIA M.C., CASOLA E., SCARDI M., 1989. Estimates of water movement in *Posidonia oceanica* beds: a first approach. In: Boudouresque, C.F., Meinesz A., Fresi E., Gravez V. edits. International workshop on *Posidonia* beds. GIS Posidonie publ., Fr., 2: 101-112.

GIRAUD G., 1979. Sur une methode de mesure et de comptage des structures foliaires de *Posidonia oceanica* (Linnaeus) Delile. Bull. Mus. Hist. nat. Marseille, 39: 33-39.

- GRENIER C., 1860. Recherches sur le *Posidonia caulini*. KENIG. Bull. Soc. Bot., 7 (5-6): 362-367.
- HARLIN, M.M., THORNE-MILLER, B., 1981. Nutrient enrichment of seagrass beds in a Rhode Island coastal lagoon. Mar. Biol., 65: 221-229.
- HOOTSMANS M. J. M., 1994. A growth analysis model for *Potamogeton pectinatus* L. In: Van Vierssen, W., Hootsmans, M.J.M., Vermaat, J.E. (Eds.), Lake Veluwe, a Macrophyte-dominated System under Eutrophication Stress. Kluwer, Dordrecht, 250-286.
- HOOTSMANS M. J. M., 1999. Modelling *Potamogeton pectinatus* : for better or for worse. Hydrobiologia, 415: 7 -11.
- LEE, K.-S., DUNTON, K.H., 1996. Production and carbon reserve dynamics of the seagrass *Thalassia testudinum* in Corpus Christi Bay, Texas, USA. Mar. Ecol. Prog. Ser., 143: 201-210.
- LAWRENCE J.M., BOUDOURESQUE C.F., MAGGIORE F., 1989. Proximate constituents biomass, and energy in *Posidonia oceanica* (Potamogetonaceae). P.S.Z.N.I: Marine Ecology, 10: 263-270.
- MADDEN, C.J., KEMP, W.M., 1996. Ecosystem model of an estuarine submersed plant community, calibration and simulation of eutrophication responses. Estuaries, 19 (2B): 457-474.
- MOLENAAR H., BARTHELEMY D., DE REFFYE P., MEINESZ A., MIALET I. 2000. Modelling architecture and growth patterns of *Posidonia oceanica*. Aquatic Botany, 66: 85-99.
- MOLINIER R., 1960. Observations sur les Phanérogames marines méditerranéennes. Rapp. P.V. Réun. Commiss. internation. Explor. sci. Médit., 15 (2): 165-170.
- MOLINIER R. & PICARD J., 1952. Recherches sur les herbiers de Phanérogames marines du littoral méditerranéen français. Ann. Inst. océanogr., 27(3): 157-234.
- MOLINIER R. & ZEVACO C., 1961. Observations sur la croissance des feuilles de Posidonies (*Posidonia oceanica* Delile). C.R. Acad. Sci. Paris, 252, 1650-1652.
- MOLINIER R. & ZEVACO C., 1962. Etudes écologiques et biocénétiques dans la baie du Brusc (Var). Fascicule 3 : étude statistique et physiologique de la croissance des feuilles de Posidonies (*Posidonia oceanica* Delile). Bull. Inst. océanogr. Monaco, 1234: 1- 46.
- MOSTAFA H.M. 2000. Distribution of different faunal groups associated to *Posidonia oceanica* along a depth gradient at El-Agami (Alexandria, Egypt): Ploychaetes. Biol. Mar. Medit., 7(2): 259 – 263.

ODUM E.P., 1983: Basi di ecologia. CBS College Publishing. 544 pp.

OLESEN B., SAND-JENSEN K., 1993. Seasonal acclimatation of eelgrass *Zostera marina* growth to light. Mar. Ecol. Program., Ser., 94: 91-99.

ORTH R.J., 1977. Effect of nutrient environment on growth of the eelgrass *Zostera marina* in the Chesapeake Bay, Virginia, USA. Mar. Biol., 44: 187–194.

OTT J.A., 1979. Persistence of a seasonal growth rhythm in *Posidonia oceanica* (L.) Delile under constant conditions of temperature and illumination. Mar. Biol. Lett., 1: 99-104.

OTT J.A., 1980. Growth and production in *Posidonia oceanica* (L.) Delile. Mar. Ecol. P.S.Z.N.I., 1: 47-64.

PANAYOTIDIS P. & GIRAUD G., 1981. Sur un cycle de renouvellement des feuilles de *Posidonia oceanica* (Linnaeus) Delile dans le golfe de Marseille. Vie Milieu, 31(2): 129-136.

PÉRÈS J.M., PICARD J., 1964. Nouveau manuel de bionomie benthique de la mer Méditerranée. Rec. Trav. Stat. mar. Endoume, 31(47): 3-137.

PEREZ M., ROMERO J., 1992. Photosynthetic response to light and temperature of the seagrass *Cymodocea nodosa* and the prediction of its seasonality. Aquat. Bot., 43:51-62.

PERGENT G., BOUDOURESQUE C.F., CROUZET A., 1982. Mise en évidence de variations cycliques dans les écailles de *Posidonia oceanica*. Lab. Ecol. Benthos, Fac. Sci. Marseille-Luminy et Parc National Port-Cros édit., 1-193.

PERGENT G., ROMERO J., PERGENT-MARTINI C., MATEO M.A., BOUDOURESQUE C.F., 1994. Primary production, stocks and fluxes in the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica*. Mar. Ecol. Progr. Ser., 106: 139-146.

PERGENT G., DJELLOULI A., HAMZA A.A., ETTAYEB K.S., EL MANSOURI A.A., TALHA F.M., HAMZA M.A., PERGENT-MARTINI C., PLATINI F., 2002a. Characterization of the benthic vegetation in the Farwà lagoon (Libya). J. Coastal Conservation, 8: 119-126.

PERGENT G., PERGENT-MARTINI C., 1991. Leaf renewal cycle and primary production of *Posidonia oceanica* in the bay of Lacco Ameno (Ischia, Italy) using lepidochronological analysis. Aquat. Bot., 42: 49-66.

PERGENT G., PERGENT-MARTINI C., 1999. Mercury levels and fluxes in *Posidonia oceanica* meadows. Environ. Poll., 106: 33-37.

PERGENT G., PERGENT-MARTINI C., 2000. Mission d'étude en Libye. Etude des formations végétales de la lagune de Frawà. Centre d'Activités Régionales pour les Aires Spécialement Protégées et Université de Corse publ., 1-48 + Ann.

PERGENT G., ZAOUALI J., 1992. Analyse phénologique et lépidochronologique de *Posidonia oceanica* dans une lagune hyperhaline du Sud tunisien. Rapp. P.V. Réunion. Commiss. internation. Explor. sci. Médit., 33: 48.

PERGENT-MARTINI C., RICO-RAIMONDINO V., PERGENT G., 1994. Primary production of *Posidonia oceanica* in the Mediterranean basin. Mar. Biol., 120: 9-15.

PHILLIPS R.C., MCMILLAN, C., BRIDGES, K.W., 1983. Phenology of eelgrass, *Zostera marina* L., along latitudinal gradients in North America. Aquat. Bot., 15: 145–156.

PIRC H. 1985a. Seasonal aspects of photosynthesis in *Posidonia oceanica*: influence of depth, temperature and light intensity. Aquatic Botany, 26: 203–212.

PIRC H. 1985b Growth dynamics in *Posidonia oceanica* (L.) Delile. P.S.Z.N.I. Marine Ecology, 6: 141–165.

PIRC H., 1989. Seasonal changes in soluble carbohydrates, starch, and energy content in Mediterranean seagrasses. P.S.Z.N.I.: Marine Ecology, 10: 97-105.

PIRC H., WOLLENWEBER B., 1988. Seasonal changes in nitrogen, free amino acids, and C/N ratio in Mediterranean seagrasses. P.S.Z.N.I.: Marine Ecology, 9: 167-179.

PLUS M., CHAPELLE A., MENESGUEN A., DESLOUS-PAOLI J. M., AUBY I., 2003. Modelling seasonal dynamics of biomasses and nitrogen contents in a seagrass meadow (*Zostera noltii* Hornem.): application to the Thau lagoon (French Mediterranean coast)

SCHEFFER, M., BAKEMA, A.H., WORTELBOER, F.G., 1993. MEGAPLANT - a simulation model of the dynamics of submerged plants. Aquat. Bot., 45: 341-356.

SETCHELL W.A., 1929. Morphological and phenological notes on *Zostera marina* L. Univ. Calif. Publ. Bot., 14: 389–452.

SHORT F.T., 1980. A simulation model of seagrass production system. In Phillips, R.C., McRoy, C.P. (Eds.), Handbook of Seagrass Biology: An Ecosystem Perspective. Garland STPM Press, New York, 275-295.

TEIXEIRA DA SILVA E., ASMUS M. L., 2001. A dynamic simulation model of the widgeon grass *Ruppia maritima* and its epiphytes in the estuary of the Patos lagoon, RS, Brazil. Ecological modelling, 137 (2-3): 161-179.

THÉLIN I., BOUDOURESQUE C.F., 1983. Longévité des feuilles de *Posidonia oceanica* dans un herbier de la baie de Port-Cros (Var, France). Rapp. P.V. Réunion. Commiss. internation. Explor. sci. Médit. 28(3): 115-116.

THELIN I., BOUDOURESQUE C.F., 1985. *Posidonia oceanica* flowering and fruiting recent data from an international inquiry. *Posidonia Newsletter*, 1(1): 5-14.

TUTIN T.G., 1942. *Zostera*. *J. Ecol.*, 30: 217–266.

VAN DIJK G.M., JANSE J.H., 1993. Modeling resource allocation in *Potamogeton pectinatus* L. *J. Aquat. Plant Manage.*, 31: 128-134.

VERHAGEN J. H. G., NIENHUIS P. H., 1983. A simulation model of production, seasonal changes in biomass and distribution of eelgrass (*Zostera marina*) in Lake Grevelingen. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 10: 187-195.

VERLAQUE M., NEDELEC H., 1983. Note preliminaire sur les relations biotiques *Paracentrotus lividus* (LMK) et herbier de Posidonies. *Rapp. Comm. Int. Mer Médit.*, 20 (3): 157-158.

WETZEL, R.L., NECKLES, H.A., 1986. A model of *Zostera marina* L. photosynthesis and growth: simulated physical-chemical variables and biological interactions. *Aquat. Bot.*, 26: 307–323.

WETZEL R. L., NECKLES H. A., 1987. A model of *Zostera marina* L. photosynthesis and growth simulated effects of selected physical_/chemical variables and biological interactions. *Aquat. Bot.*, 26: 307-324.

ZHAROVA, N., SFRISO, A., VOINOV, A., PAVONI, B., 2001. A simulation model for the annual fluctuation of *Zostera marina* in the Venice lagoon. *Aquatic Botany*, 70: 135-150.

ZIEMAN J. C., 1974. Methods for the study of the growth and production of turtle grass, *Thalassia testudinum* Konig. *Aquaculture*, 4: 139-143.

ZIMMERMAN, R.C., SMITH, R.D., ALBERTE, R.S., 1987. Is growth of eelgrass nitrogen limited? A numerical simulation of the effect of light and nitrogen on the growth dynamics of *Zostera marina*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 41: 167–176.

ZIMMERMAN R.C., CABELLO-PASINI A., ALBERTE R.S., 1994. Modeling daily production of aquatic macrophytes from irradiance measurements: a comparative analysis. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 114: 185–196.

ZUPO V., BUIA M.C., MAZZELLA L., 1997. A production model for *Posidonia oceanica* based on temperature. *Estuarine Coastal Shelf Sci.*, 44: 483-492.

6. ALLEGATI

6.1. *A Machine Learning Approach To Seagrass Density Modeling*

Title:	<i>A Machine Learning Approach To Seagrass Density Modeling</i>
Authors & affiliations:	Paola Di Dato (1), Enrico Casola (2), Francesco Di Nuzzo (2), Pasquale Lanera (2), Nino Plastina (2), Luigi M. Valiante (2), Daniele Vinci (2), Eugenio Fresi (3) and Michele Scardi (3) (1) University of Tuscia, Viterbo, Italy (2) Bioservice s.c.r.l., Naples, Italy (3) 'Tor Vergata' University of Rome, Rome, Italy
Abstract: (Your abstract <u>must</u> use Normal style and <u>must</u> fit in this space. Your abstract should be no longer than 300 words. This space will 'expand' over 2 pages as you add text/diagrams into it.)	Seagrass beds play a very important role in marine coastal waters, because they are very productive ecosystems, which enhance species and habitat diversity, providing nursery and foraging areas for many organisms. They also act as coastal defences, stabilizing sediments and dissipating wave energy. Unfortunately, seagrasses are sensitive to disturbance and slow to recover, and the regression seagrass beds that has been observed during the last decades is therefore a cause of much concern. In this scenario, modelling seagrass density may help in evaluating the health status of seagrass beds and in planning, when possible, restoration. Dynamic models are theoretically interesting, but they are almost impossible to validate because changes in the structure of seagrass beds are very slow. Empirical models that estimate density on the basis of a set of predictive independent variables, on the contrary, can be developed from steady state observations. They cannot forecast seagrass bed dynamics, but they can assess the expected status of a seagrass stand on the basis of data about its physical environment, thus providing reference information that is very helpful in coastal ecosystem management. Modeling seagrass density, even empirically, is not a trivial task, because of its intrinsic difficulty and because predictive information is only available as a complex mix of quantitative, ordinal, binary and nominal variables that cannot be easily exploited by GLM, GAM and other statistical methods. On the contrary, Machine Learning techniques, including neural networks and classification trees, are more effective in exploiting such heterogeneous information. A case study based on a large set of <i>Posidonia oceanica</i> records (about 700) will be presented and different seagrass modelling strategies based on Machine Learning methods will be discussed in the light of the role they might play in the evaluation of ecosystem quality as well as in conservation and restoration activities.

A Machine Learning Approach To Seagrass Density Modeling

Di Dato P., Casola E., Di Nuzzo F., Lanera P., Plastina N., Valiante L.M., Vinci D., Fresi E., and Scardi M.

Introduction

Preservation, protection and improvement of the environmental quality, including conservation of natural habitats are an objective of general interest pursued by the European Community (see Council Directive 92/43/EEC).

The Mediterranean Sea boasts a very rich biodiversity, with a total of 10,000 to 12,000 recorded marine species and new species are still being recorded. Along the coastal zones of this sea, special attention has been paid to the endemic seagrass *Posidonia oceanica* (L.) Delile.

In Italy the *Posidonia oceanica* was listed as a protected species at the end of the 90's. As consequence of their biological and ecological importance, as well as their vulnerability to the increased human impact, the *Posidonia* meadows received attention in the European Environment Agency's 2006 Report (Priority Issues in the Mediterranean Environment).

Depending on water clarity, *Posidonia oceanica* lives between the surface and 30-40 metres depth in a narrow coastal strip, normally on beds of soft sediment.

This plant is a large, long-living but very slow-growing seagrass. Its shoots, which are able to live for at least 30 years, are produced at a slow rate from rhizomes which grow horizontally by only 1 to 6 centimeters each year. Over centuries the rhizomes form "mattes" which rise up into reefs that help to trap sediment and mediate the motion of waves, clarifying the water and protecting beaches from erosion. Dead leaves are shed in the autumn and can be found washed up on beaches.

Along the coast, *Posidonia oceanica* forms vast underwater meadows and plays a major ecological and economic role, providing strong primary production, spawning ground and nursery, breeding habitats and home for many species (in particular for fish that are of economic value), fixing the sediments and controlling the equilibrium of sandy shorelines.

Its meadows currently show alarming signs of degradation that has become generalized around much of the Mediterranean coastline.

Studies over the past 10 years measuring *Posidonia oceanica* cover and shoot density along the coasts have shown an overall decline.

This regression which has certainly been accelerated in recent decades, may be explained by either pollution (resulting in greater water turbidity and hence diminished plant vitality), encroachment by coastal development installations (harbours, sea walls, etc), trawler-fishing, fish-farming and pleasure-boat anchoring.

For the Mediterranean there are no proper measures to afford real protection of the *Posidonia oceanica* meadow. Mooring and trawling continue in an uncontrolled fashion and the areas of meadow that are included in protected areas remain modest in size.

For these reasons, over the last few years, research has been ongoing to understand the role of *Posidonia oceanica* within the ecosystem in order to:

- ☐ monitor disturbances
- ☐ assess ecological status
- ☐ detect ecological changes
- ☐ forecast alterations

In this scenario, the shoot density of *Posidonia oceanica* is used as synthetic descriptor of ecological status of this seagrass by the majority of European laboratories (88%).

Its study provides important information on the vitality and the growth dynamics of *Posidonia* meadows, also revealing human impact on the environment.

Density is useful in evaluating the health status of *Posidonia oceanica* meadows and, where possible, planning restoration by means of transplanting techniques in order to recover *P. oceanica* beds reduced or destroyed by human activity.

It is easy to implement in situ, its technical application is simple and cheap, and provides reliable results.

These results are expressed in square meters and generally interpreted by means of two scales: the scale of Giraud (1977) and the scale of Pergent et al. (1995).

According to the density values, the scale of Giraud allows the definition of different kind of meadows although it does not integrate the role of depth (Table 1).

Meadows	N° shoot/m²	Kind	Description
Type 1	> 700	very dense beds	meadows on “matte” and with prevailing vertical rhizomes
Type 2	400 - 700	dense beds	meadow expression of degeneration or increasing and with prevailing vertical rhizomes
Type 3	300 - 400	sparse beds	meadow expression of degeneration or dynamic equilibrium placed on any kind of substrate
Type 4	150 - 300	very sparse beds	meadows in regression or settlement with many dead shoots without leaves and horizontal rhizomes
Type 5	50 - 150	semi or half-beds	meadows in regression mainly distinctive of the deep limit

Table 1. Giraud classification.

Conversely the Pergent scale takes into account the change in the density values according to the depth and other related environmental conditions (e.g. turbidity, light, kind of substrate). In this case density is classified in abnormal density (DA), normal density (DN) and sub-normal density (lower - DSI or upper - DSS) (Table 2).

Depth	Abnormal density (DA)	Sub-normal density (DSI or DSS)	Normal density (DN)
1	< 822	822-934	> 934
5	< 413	413-525	> 525
10	< 237	237-573	> 573
15	< 134	134-246	> 246
20	< 61	61-173	> 173
25	< 4	4-116	> 116
30	-	< 70	> 70
35	-	< 31	> 31
40	-	-	> 1

Table 2. Pergent classification.

In this study we have tried to model the *Posidonia oceanica* meadow density on the basis of certain environmental variables using empirical approaches.

In particular, starting from a very large data set (964 records) from different Italian meadows, we compared the performance of seagrass modeling strategies based both on Machine Learning methods (Classification Tree, Neural Networks, Case-Based Reasoning, Regression Tree,) and statistical approaches (Multiple Regression and General Additive Models).

The focus was to define the best tool for evaluating the expected status of the *Posidonia* seagrass stand on the basis of physical, environmental predictors and to provide useful information about coastal ecosystem quality, management, conservation and restoration.

Materials and methods

Sampling site and data set

The sampling sites (30) were placed along the Tyrrhenian coasts, the southern Adriatic coasts and around the island of Sicily and Sardinia. Overall, we obtained a data base with 964 patterns, 18 predictive independent variables (input) and 1 response or dependent variable (output) (Table3).

At each sampling site, the absolute density values (output) were obtained by scuba diving survey defining, using a rope, a circular area of 20 meters around each station, placing five 0.4 size squares randomly inside this area whatever the depth or season, and counting the

mean number of shoots in each square. The sampling error computed for various Mediterranean meadows ranged from 50 to 100 shoots/m², but were however less than other ecological measures (LAI, coefficient A, substrate covering).

The predictive variables instead, were derived from maps or from geographical information system, or others measured in the field (Table 3);

environmental variables	latitude (decimal degrees) longitude (decimal degrees) depth (m) gradient (%) concordance to prevailing winds (0-1) exposure to prevailing winds (0-1) concordance exposure (0, 1) shape of isobaths: concave (0, 1) shape of isobaths: linear (0, 1) shape of isobaths: convex (0, 1) bathimetric homogeneity (1-8 runs) coastal "aperture" (1-8) substrate typology: sand (0,1) substrate typology: rock (0,1) substrate typology: "matte" (0,1) disturbance: anchorage (0,1) disturbance: pollution (0,1) disturbance: sewage/rivers (0,1)
response variable	absolute density (shoots/m ²)

Table 3. Variables used to perform the Classification Tree

The 964 patterns were divided into 2 subsets: training (723 records) and test (241 records). In order to obtain a more homogeneous distribution of the available records, each subset was organized using a stratification criterion according to its geographical coordinate (longitude and latitude) and the depth. We used the same training and testing subsets and the same stratification criterion for each procedure.

Seagrass modeling strategies

Classification Tree (CT)

We started performing a Classification Tree because it is a powerful approach with a high level of accuracy in many of applications also compared to other classification methods. Moreover, it provides easy interpretation and implementation.

In order to obtain a homogeneous distribution of the records with the same number of shoots/m² in each subset (training set and testing set), the response variable has been coded into 5 classes defined with this subjective criterion:

- ☐ Class 1: >500 shoots/m²
- ☐ Class 2: 500-400 shoots/m²
- ☐ Class 3 : 400-300 shoots/m²
- ☐ Class 4 : 300-200 shoots/m²
- ☐ Class 5 : < 200 shoots/m²

Using the SPSS 13.0 Package, the model was performed using the CRT (*Classification and Regression Tree*) growing method that splits the data into segments as homogeneous as possible with respect to the dependent variable.

As tree-growing limits we selected a maximum tree depth of 5 (the default for a CRT), while the minimum number of cases in parent and child nodes was 80 and 20 respectively.

For the validation criteria we used a “Split-Sample Validation method” that generates the model using a training sample and tests its performance on a hold-out sample (test subset of 241 records).

All the other seagrass modeling strategies were performed only on 6 predictors. Indeed, excluding the binary predictor “input waters” we only selected the independent variables with a normalized order of importance in the Classification Tree, greater than 30% (Table 4).

environmental variables	depth (m) longitude (decimal degrees) latitude (decimal degrees) concordance to prevailing wind (0-1) exposure to prevailing wind (0-1) gradient (%)
response variable	absolute density (shoots/m2)

Table 4. Predictors used to perform all remaining modeling strategies

Neural Networks (ANNs)

The training subset (723 records) was divided into a data set for training (482) and one for validation (241). In this way we obtained a division of available records into three subsets: training (50% of the records), validation (25% of records) and test (25% of records). All variables (independent and dependent) were normalized into the [0,1] interval. Absolute density of analyzed meadows was modeled using a feed-forward multilayer perceptron.

The number of hidden nodes providing the best performance was defined after empirical tests and the ANN structure providing the best results was 6-12-1 with 6-12-1 nodes respectively in the input, hidden and output layers.

The validation subset was used to compute the mean square error (MSE) of the ANN after each epoch, while the test set was used to test the performance of the ANN after completion of the training procedure.

The learning procedure was performed over 100.000 epochs.

To prevent overtraining, only a random subset of the training data set (241 patterns) was submitted to the ANN at each epoch. The white noise added to weights and to ANN input at each epoch was respectively (0.05) and (0.10).

A sigmoid activation function was used in all the nodes of the hidden and output layers of the ANN.

In order to adjust the weights during the training procedures we used the error back propagation algorithm with early stopping based on validation set mean square error (MSE).

The learning rate and the momentum were constant and set respectively at 0.90 and 0.10.

After the training phases the ANN outputs that were continuous were converted to the original data before the normalization.

Case Based Reasoning (CBR)

The Case Based reasoning (CBR) is a recent approach to problem solving and learning that has received a lot of attention over the last few years. It has grown from a rather specific and isolated research area into a field of widespread interest.

Originating in the US, its basic idea and underlying theories have spread to other continents, and we are now within a period of highly active research in case-based reasoning in Europe too.

The CBR is fundamentally different from other major AI approaches.

Instead of relying solely on general knowledge of a problem domain, or making associations along generalized relationships between problem descriptors and conclusions, it is able to utilize the specific knowledge of previously experienced and concrete problem situations (cases).

A new problem is solved by finding a similar past case, and reusing it in the new problem situation. A second important difference is that CBR is an approach to incremental, sustained learning; each time that a problem has been solved, a new experience is retained, making it immediately available for future problems.

In our application the predicted values were obtained as the average value of the three closest cases in the “*case base*”. The distance between cases was computed using Manhattan metrics and normalized data.

Regression Tree (RT)

The Regression Tree may be considered as a variant of decision trees. It is built through a process known as binary recursive partitioning and is designed to approximate real-valued functions instead of being used for classification tasks. As for other regression-type problems, it is used to predict the values of a continuous variable from one or more continuous and/or categorical predictor variables.

We implemented this procedure using the STATISTICA 6.0 Package on the training data set (723 patterns).

As far as the the right-sized tree is concerned, we used the STATISTICA “Stopping Options” default that defines a procedure of pruning on variance with a minimum number of 96 split selections before the start of the pruning.

In order to access the accuracy and size of the tree, an independent test set (the same considered for the other procedures) was used to build the tree.

Multiple Regression (MR)

For this procedure we used the Multiple Linear Regression module of STATISTICA 6.0 Package that performs a least-squares multiple linear regression. In particular, an intercept model was evaluated.

Density (shoot/m²) =

$$I + (b_1 * LAT) + (b_2 * LONG) + (b_3 * DEPTH) + (b_4 * GRAD) + (b_5 * CONC_W) + (b_6 * EXP_W)$$

where:

I = intercept

LAT = latitude

LONG = longitude

DEPTH = depth

GRAD = gradient

CONC_W = concordance to prevailing winds

EXP_W = exposure to prevailing winds

Generalized Additive Models (GAM)

Unlike in the general linear model (of which multiple regression is a special case) in GAM the distribution of the dependent or response variable can be (explicitly) non-normal, and does not need to be continuous, (e.g., it can be binomial).

The predictor variables are "connected" to the dependent variable via a link function.

We performed this model strategy on the training data set (723 patterns) using the default algorithm of SPSS 13.0 Package for unconstrained models (Levenberg-Marquardt), with a “Sum of squared residuals” as loss function.

The best results were obtained using a a third-degree polynomial for latitude, gradient, concordance and exposure to winds, and a power function for depth and longitude:

Density (shoot/m²) =

$$(b_1 + b_2(LAT) + b_3(LAT)^2 + b_4(LAT)^3) + (b_5(LONG)^{-b_6}) + (b_7(DEPTH)^{-b_8}) + (b_9 + b_{10}(GRAD) + b_{11}(GRA)^2 + b_{12}(GRAD)^3) + (b_{13} + b_{14}(CONC_W) + b_{15}(CONC_W)^2 + b_{16}(CONC_W)^3) + (b_{17} + b_{18}(EXP_W) + b_{19}(EXP_W)^2 + b_{20}(EXP_W)^3)$$

Results

Classification Tree (CT): Test results

The tree obtained presents 17 nodes and 9 terminal nodes (Fig. 1).

The number of records that match correctly overall was 108/241 (44.8%).

This percentage is explained for about the 50% (56/108) by the class 4 which also proved to be the class with the greatest value of “CCI” (80%).

On the other hand, for the class 2 the numbers of records that correctly matched was less than 1% (Table 5).

Among the remaining 133 (241-108) cases, 103 matched the previous or next class, while only 30 cases (30/241 = 12.4%) predicted different classes.

The tree's predictive accuracy (risk), equal to the proportion of incorrectly classified cases, was 0.552.

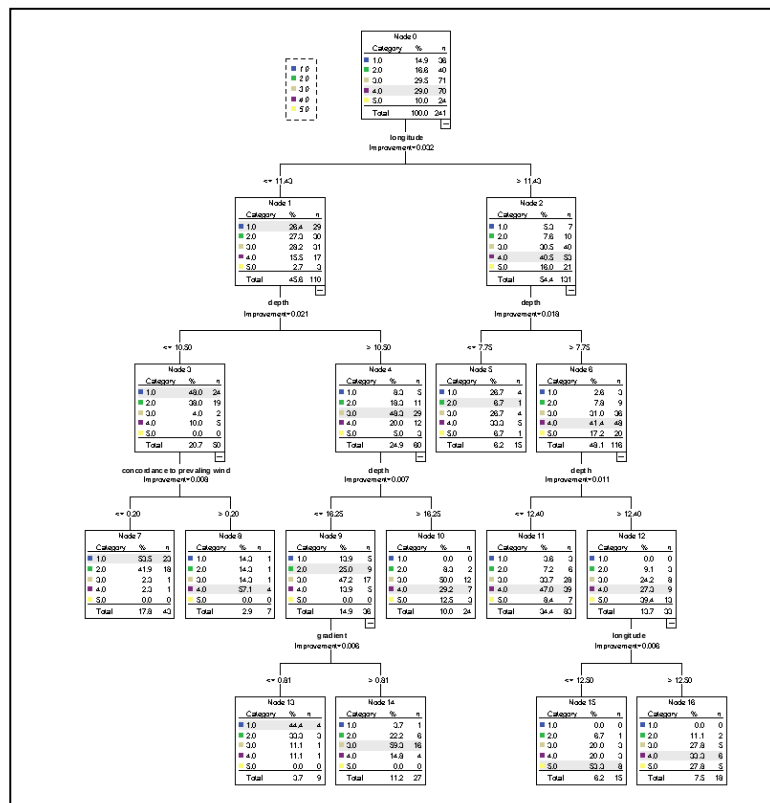


Fig. 1. Classification Tree

The independent variable with the highest order of importance to the model was depth (Fig. 2).

Results were not very satisfying and this approach does not seem to solve the complexity of the problem considered.

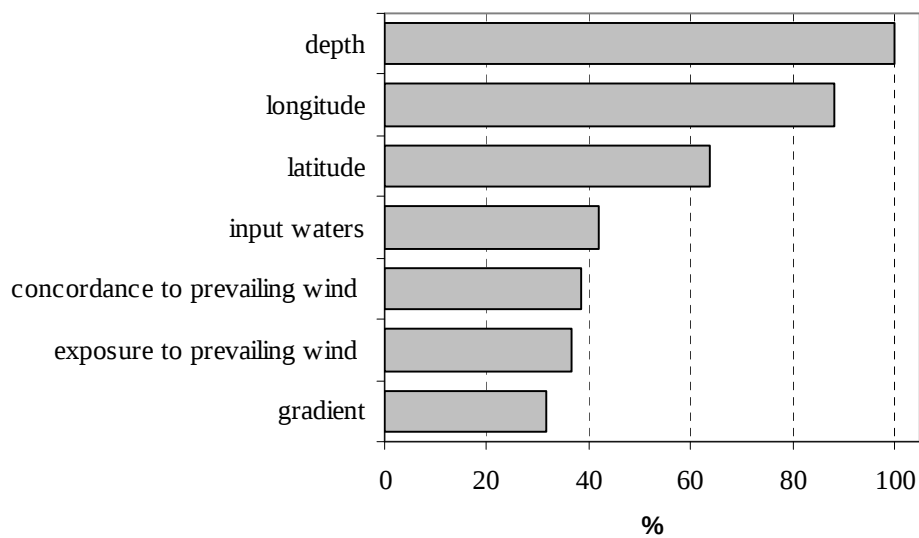


Fig. 2. Classification Tree. Independent variable histogram

	Test subset					
	Predicted					
Observed	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4	Class 5	CCI
Class 1	27	4	1	4	0	75.0%
Class 2	21	1	6	11	1	2.5%
Class 3	2	4	16	46	3	22.5%
Class 4	2	5	4	56	3	80.0%
Class 5	0	1	0	15	8	33.3%
Overall percentage	21.6%	6.2%	11.2%	54.8%	6.2%	44.8%

Table 5. Classification results on test subset

The results obtained for all the other seagrass modeling strategies are summarized in Table 7 reporting the MSE (Mean Square Error) and the mean value of absolute error for each approach. The scatter plots of observed and predicted values and the correlation results (R values) are shown in Figure 4 and Table 8 respectively.

Neural Networks (ANNs): Test results

The results are reported in terms of average of absolute error, MSE (Table 7) and r correlation coefficient (Table 8). MSE and mean value of absolute error were respectively 10006 and ± 76 shoots/m² whereas the scatter plot (Fig. 4) of test subset showed a clear correlation between predicted (ANN outputs) and observed density values.

However it is also evident that the model tends to overestimate density values lower than 300 shoots/m² (Fig.3).

As shown in Fig. 3 the performance of the model improves with the depth.

Indeed the amplitude of the absolute error interval is wider for shallow sampling sites, while it decreases for sites that are deeper than 15 meters.

This is probably due to the wider set of environmental conditions present in shallow sampling sites.

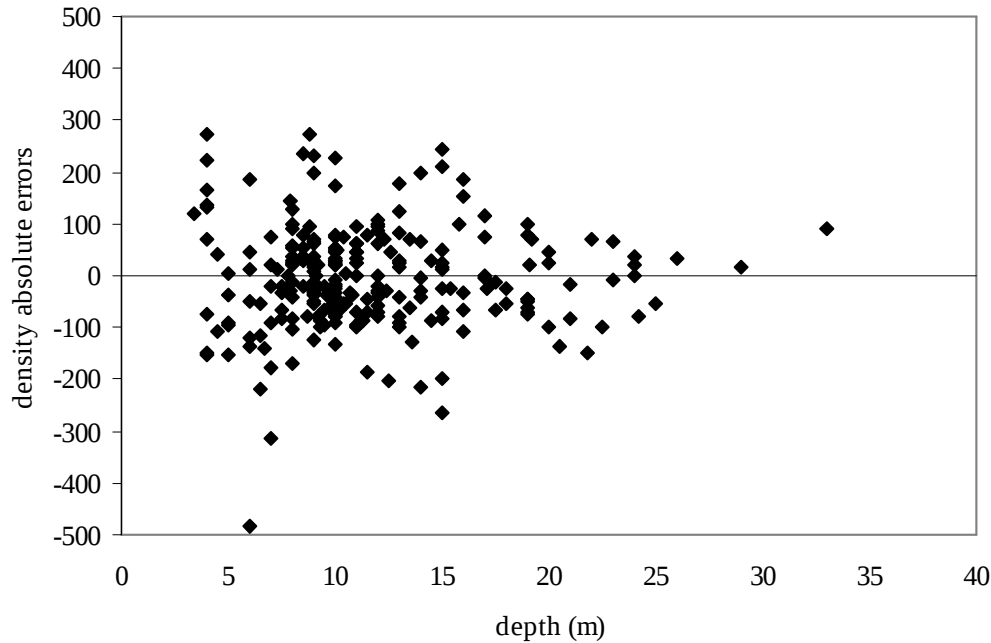


Fig. 3. Density absolute errors versus depth

Although if satisfying, the ANNs results have been compared to other strategies based both on learning through experience (Case-Based Reasoning), and on linear and non-linear regression approaches (Regression Tree, Multiple Regression and Generalized Additive Models).

Case-Based Reasoning (CBR): Test results

The results obtained with the CBR approach were very similar to ANNs outputs, though slightly better. The mean value of absolute error was ± 75 shoots/m², while the MSE resulted equal to 10895 (Table 7).

Also in this case there was an evident correlation in the scatter plot of predicted *versus* observed values of density, but the lower values (0-300 shoots/m²) showed a less important overestimation which proved to better predicted by model (Table 8 and Fig. 4).

Regression Tree: Test results

The performance of all linear and non linear regression models has been always worse than that of methods based on learning through experience (Table 8 and Fig. 4).

In the case of the Regression Tree the mean value of absolute error was ± 85 shoots/m², while the MSE was 13860 (Table 7). Any clear correlation resulted from the scatter plot between observed and predicted density values.

The split conditions of tree structure and the results of terminal node are reported in Table 6.

		Depth	Latitude	Longitude	Gradient	Exposure to prevailing wind		
Terminal Node	Size of node	AND					Node Mean	
4	84	≤ 7.75	≤ 42.37				432.905	
5	49	≤ 7.75	≥ 42.37				544.000	
10	92	> 7.75 ≤ 15.10		≤ 11.43 ≤ 10.05			383.556	
11	60	> 7.75 ≤ 15.10		≤ 11.43 > 10.05			460.000	
12	15	> 7.75 > 15.10		≤ 11.43		≤ 0.20	197.400	
13	86	> 7.75 > 15.10		≤ 11.43		> 0.20	332.174	
20	40	> 7.75 ≤ 13.10	≤ 42.03	> 11.43 ≤ 12.51	≤ 1.050		231.975	
21	76	> 7.75 ≤ 13.10	> 42.03	> 11.43 ≤ 12.51	≤ 1.050		267.776	
19	9	> 7.75 ≤ 13.10		> 11.43 > 12.51	≤ 1.050		385.444	
17	35	> 7.75 > 13.10		> 11.43	≤ 1.050		201.314	
24	13	> 7.75 ≤ 13.10	≤ 41.01	> 11.43	> 1.050		456.538	
26	46	> 7.75 ≤ 13.10	> 41.01 ≤ 42.03	> 11.43	> 1.050		277.913	
27	72	> 7.75 ≤ 13.10	> 41.01 > 42.03	> 11.43	> 1.050		324.361	
23	46	> 7.75 > 13.10		> 11.43	> 1.050		265.673	

Table 6. Regression Tree results: split conditions and terminal node results.

As we can also see in this case, the most important splitters are represented by geographic coordinate and depth (as in Classification Tree).

In any case as we can see from this slide the results obtained using this approach were worse than the NN and CBR.

Multiple Regression: Test results

The worst results obtained with regression methods were those derived using the Multiple Regression strategy.

Although the amplitude of absolute error around the zero value was similar to other performed strategies, the mean value of absolute error was of ± 96 shoots/m², while the MSE was 15534 (Table 7).

In this case too, there was no correlation between observed and predicted data (Table 8 and Fig. 4).

The estimate coefficients of parameters model are reported in the equation:

Density (shoot/m²) =

$$616.0880 + (0.8461 * LAT) + (-18.5180 * LONG) + (-9.3491 * DEPTH) + (5.3428 * GRAD) \\ + (73.4388 * CONC_W) + (-7.6693 * EXP_W)$$

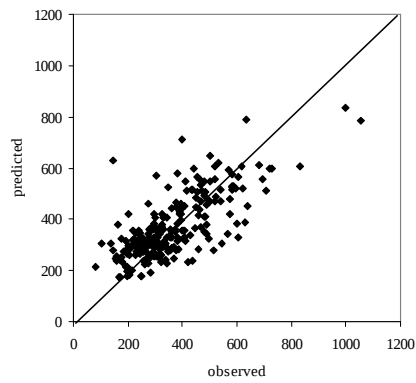
Generalized Additive Models: Test results

As in the case of linear regression models, the GAM performance was not very satisfying either, and the results in terms of mean value of absolute error (± 88 shoots/m²) and the MSE (13568) were comparables to the Regression Tree and Multiple regression strategies (Table 7 and Fig. 4).

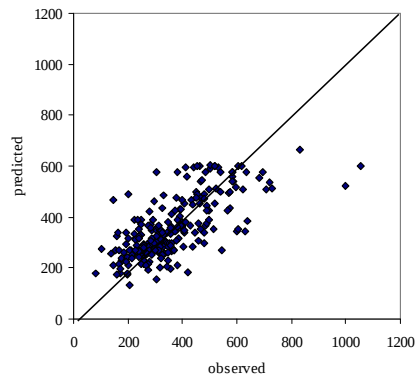
The estimate coefficients of parameters of the model are reported in the equation:

Density (Shoot/m²) =

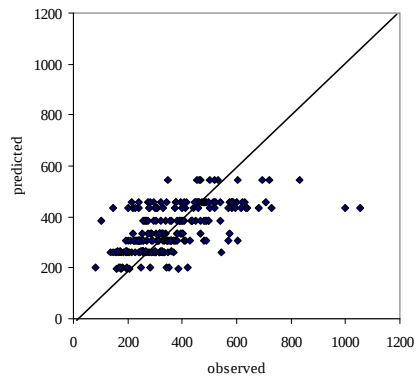
$$(-806.869 + (368.674 * LAT) + (-19.192 * LAT^2) + (0.236 * LAT^3)) + (1847.661 * LONG^{-0.206}) + \\ (1905.869 * DEPTH^{0.093}) + (-868.469 + (22.87 * GRAD) + (-1.883 * GRAD^2) + \\ (0.044 * GRAD^3)) + (1000.809 + (-286.974 * CONC_W) + (249.827 * CONC_W^2) + \\ (133.416 * CONC_W^3)) + (-831.346 + (145.763 * EXP_W) + (-39.226 * EXP_W^2) + (- \\ 23.156 * EXP_W^3))$$



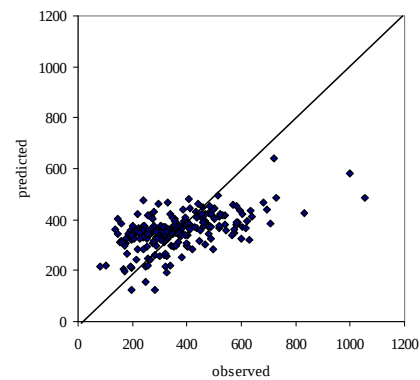
Neural Networks (NN)



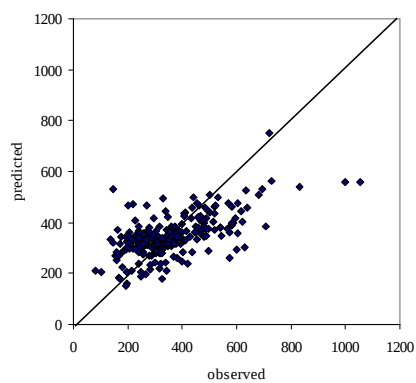
Case-Based Reasoning (CBR)



Regression Tree



Multiple Regression



Generalized Additive Models (GAM)

Fig 4. Scatter plots of observed versus predicted results for each performed modeling strategy

TEST SET	MSE	Absolute error (shoots/ m ²)
<i>Neural Networks (ANNs)</i>	10006	±76
<i>Case-Based Reasoning (CBR)</i>	10895	±75
<i>Regression Tree</i>	13860	±85
<i>Multiple Regression</i>	15534	±96
<i>General Additive Model (GAM)</i>	13568	±88

Table 7: Modeling strategies results

For each approach we compared observed versus predicted values as well as the predicted values of the different strategies (Table 8).

In all cases the correlation coefficient proved to be significant ($p < 0.05$), but in confirmation of the previous results the worst correlation values were obtained using Multiple Regression. Only in comparison to the GAM strategy, the Multiple Regression approach showed a correlation value that was comparable to the better significant results ($r = 0.85$). The best correlation was produced by two methods based on learning through experience (NN vs CBR; $r = 0.89$).

	Observed	NN	CBR	RT	MR	GAM
Observed						
NN	0.74					
CBR	0.70	0.89				
RT	0.61	0.72	0.72			
MR	0.54	0.59	0.52	0.52		
GAM	0.62	0.76	0.66	0.64	0.85	

Table 8. Correlation matrix.

To compare the performances of different modeling approaches we also carried out a box and whisker plot of absolute error (Fig. 5).

Although not very evident, the amplitude of interval between the 5% and 95% percentile, was however, wider for regression methods (RT, MR, GAM) than for Neural Networks and Case Based Reasoning.

These differences are more evident in Figure 6, where this interval is reported as an absolute value.

Indeed, if we compare the MSE value produced by each applied approach it is evident that the two best results are those of NN and CBR, while RT and GAM are very similar. The worst result was obtained using the MR.

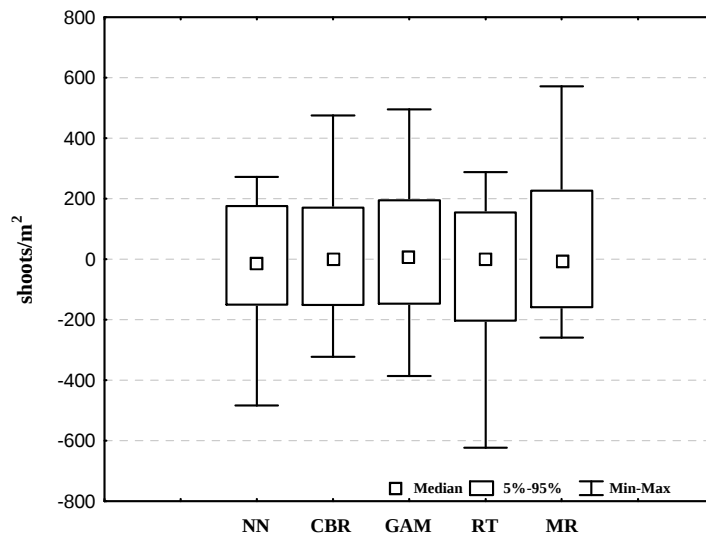


Fig. 5. Box and whisker plot of absolute error.

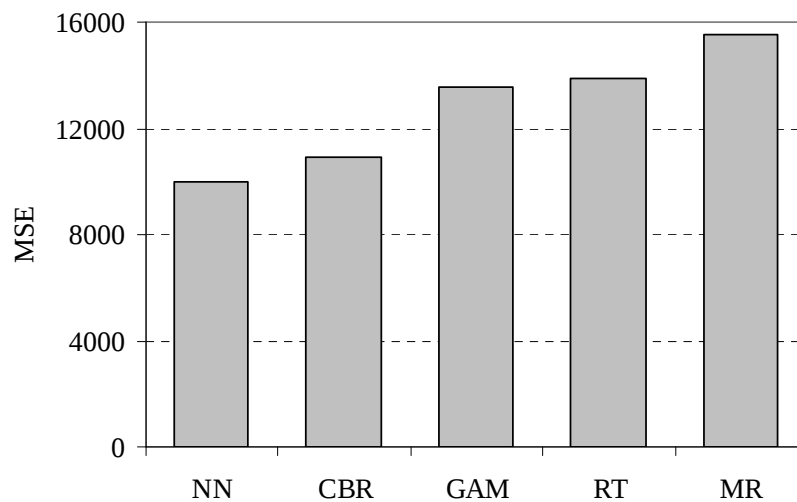


Fig. 6. MSE comparisons results

Conclusion

In *Posidonia oceanica* studies, the absolute density (number of shoots for m²) is widely considered to be a useful tool for monitoring disturbances and man-made pressures and detecting ecological changes and forecast alterations.

Despite being scale-dependent and affected by sampling errors that depend on sampling effort, density estimates are less influenced than other measures (e.g. LAI, coefficient A, substrate covering).

In this study, different modeling strategies (machine learning methods and statistical approaches) have been used to:

- model the absolute density of *Posidonia oceanica* meadows and assess their current ecological status for management objectives (e.g. if the predicted absolute density values are higher than those observed, the meadow could be in a critical ecological condition. On the contrary, if the predicted values are lower than those observed, it could express a likely positive opinion regarding its ecological status);
- compare some modeling methods on the basis of a real (and very complex) ecological problem;
- define the power of some data mining approaches as interpretational and predictive tools in the ecological field.

The influence of response variable sampling errors on the performance of the model is still an open problem, but our results showed that the average of density absolute error resulted comparable to the computed sampling standard error independently of the modeling applied approach.

In all cases the results obtained from machine learning approaches were satisfying and in comparison, were better than the statistical methods used. Indeed, machine learning approaches always outperformed statistical methods.

The machine learning model strategies developed in this work, (ANNs and CBR), are more promising than other methods and will be applied in future *Posidonia oceanica* density modelling.

They can be considered as the first step towards optimized modeling solutions in the knowledge of the ecological status of *Posidonia oceanica*.