

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITA' DI BOLOGNA

FACOLTA' DI SCIENZE MATEMATICHE FISICHE E
NATURALI

CORSO DI LAUREA IN SCIENZE AMBIENTALI

***STUDIO DELLA VARIABILITA' SPAZIO
TEMPORALE DEI FLUSSI DI CARBONIO
NEL MAR ADRIATICO ATTRAVERSO
L'UTILIZZO DI MODELLI NUMERICI***

TESI DI LAUREA IN OCEANOGRAFIA E
METEOROLOGIA

Relatore:
Prof. ***Nadia Pinardi***

Correlatori:
Dr. Luca Polimene
Dr. Marco Zavatarelli
Dr. Alessandra Pugnetti

Presentata da:
Emanuela Fiori

INDICE

1.	INTRODUZIONE	
1.1	L'ECOSISTEMA DEL MAR ADRIATICO	pag. 3
1.2	MODELLI NUMERICI PER LO STUDIO DELL'ECOSISTEMA MARINO	pag. 9
2.	MATERIALI E METODI	
2.1	IL MODELLO NUMERICO	pag. 11
2.2	I DATI MAT	pag. 13
3.	OBIETTIVI	pag. 14
4.	RISULTATI	
4.1	VALIDAZIONE: CONFRONTO CON I DATI DI PRODUZIONE PRIMARIA	pag. 15
4.2	BUDGET DI CARBONIO NEI DIVERSI SOTTOBACINI DELL'ADRIATICO	pag. 22
4.2	BGE IN SEI DIFFERENTI STAZIONI COME INDICE DELLO STATO TROFICO	pag. 27
4.4	RELAZIONI TRA LA STRUTTURA DELLA COLONNA D'ACQUA E IL CICLO STAGIONALE DEL FITOPLANCTON	pag. 31
5.	CONCLUSIONI	pag. 38
	BIBLIOGRAFIA	pag. 39

1. INTRODUZIONE

1.1 L'ECOSISTEMA DEL MAR ADRIATICO

Il Mar Adriatico è un sotto-bacino semichiuso del Mar Mediterraneo. Si contraddistingue per la sua forma stretta e allungata con il suo asse maggiore in direzione Nord-Sud, per la sua estesa piattaforma continentale, per il suo ingente apporto fluviale e per la sua ubicazione nella parte settentrionale del Mediterraneo.

Le caratteristiche biochimiche dell'Adriatico sono delineate da alcuni fattori principali: l'apporto di sostanze organiche, inorganiche e nutritive dai fiumi, la forma semichiusa del bacino che limita gli scambi con il resto del Mediterraneo, la forte pressione antropica esercitata sulle aree costiere e le dinamiche degli ecosistemi in esso presenti.

Convenzionalmente il Mar Adriatico viene suddiviso, sulla base delle sue caratteristiche morfologiche (lungo il suo asse principale NO-SE), in tre sotto-bacini: l'Adriatico Settentrionale, Centrale e Meridionale (**fig. 1**).

Questa suddivisione identifica inoltre le caratteristiche fisiche e biologiche.

La regione Nord-Ovest è caratterizzata da una lunga piattaforma continentale, quindi da basse profondità (35m). Il fondale scende gradualmente lungo la piattaforma con un'inclinazione inferiore a un grado, fino ad arrivare al ciglio della scarpata continentale, identificabile con l'isobata dei 120m all'altezza di Pescara, la quale delimita il Bacino Settentrionale.

Il cambio di pendenza sulla scarpata continentale determina un aumento più repentino della profondità fino a raggiungere i 270m nella Sacca di Pomo che

segna il confine tra il Bacino Centrale e quello Meridionale. Quest'ultimo raggiunge i 1200m di profondità massima per poi risalire nuovamente avvicinandosi allo stretto di Otranto (780m).

Numerosi fiumi scaricano in entrambi i versanti un'ingente quantità di acqua dolce, stimabile con una portata media pari a circa 6000 m³/s. Gli scarichi fluviali sono particolarmente abbondanti nella zona Nord del bacino, dove condizionano sia la circolazione con i loro input, sia l'ecosistema introducendo grandi quantità di nutrienti. Gli apporti fluviali di acqua dolce e fredda fanno sì che l'Adriatico sia un bacino in diluizione.

L'alto Adriatico è sottoposto ad un ingente apporto di acque dolci dal fiume Po, che con il suo delta molto sviluppato caratterizza fortemente tutta la morfologia e l'idrodinamica della zona. Il Po condiziona inoltre la temperatura superficiale apportando acqua più fredda di qualche grado di quella in loco. La salinità varia da zero, alla bocca del fiume, fino a valori massimi attorno ai 38psu dovuti invece all'arrivo di masse d'acqua più salate da sud lungo la costa orientale.

Gran parte dell'intero apporto fluviale (28%) e dell'apporto di sedimenti dipende in maniera predominante dal Po e, in via subordinata dagli altri fiumi che sfociano nella zona come il Reno, l'Adige e il Brenta.

Sulla base di profili stagionali di temperatura e salinità e di diagrammi T-S. sono state identificate, in Adriatico, tre principali tipi di acque (Artegiani et al., 1997): acque superficiali, acque profonde e acque levantine Intermedie Modificate (Modified Levantine Intermediate Water, MLIW). Queste ultime sono le acque provenienti dal bacino levantino del Mediterraneo parzialmente mischiate con le acque locali.

Le MLIW non sono state osservate nelle climatologie del Nord Adriatico. Qui la colonna d'acqua è costituita da Acque Superficiali (NAdSW) fino a 20 m di profondità, fortemente influenzate dalle immissioni fluviali, e da Acque Profonde oltre i 20 m.

La colonna d'acqua dell'Adriatico Centrale presenta un diverso tipo di struttura stratificata: sono presenti le Acque Superficiali (MAdSW) fino a 50m di profondità, da 50 a 150m si trovano invece le Acque Levantine Intermedie Modificale e oltre i 150m, nelle depressioni di Pomo, le Acque Profonde.

Nell'Adriatico Meridionale si riscontrano fino a 50 m le Acque Superficiali (SAdSW), da 150 a 400 m di profondità le MLIW e oltre gli 800 m le Acque Profonde (SAdDW).

Il bacino è caratterizzato da diverse condizioni trofiche: la zona produttiva (eutrofica) dello Shallow Nord e la zona oligotrofica dell'Adriatico Centrale e dell'Adriatico Meridionale.

Lo Shallow Nord presenta un ciclo di produzione primaria che è notevolmente influenzato dalle immissioni fluviali di nutrienti, che possono dare luogo, nella zona circostante, a fenomeni di anossia con conseguente mortalità della fauna bentica.

L'Adriatico Centrale e Meridionale sono caratterizzati da una bassa produzione primaria, fatta eccezione per l'area costiera occidentale che presenta una ricca concentrazione di nutrienti dovuta alla corrente proveniente dal bacino settentrionale. Le acque in mare aperto mostrano invece caratteristiche oligotrofiche. La coesistenza di condizioni costiere eutrofiche e in mare aperto oligotrofiche, implica la presenza di un gradiente trofico Nord-Sud. Quest'ultimo dipende dalle interazioni tra processi biogeochimici, la circolazione e la struttura della colonna d'acqua del bacino.

Il limitato scambio di acque allo Stretto d'Otranto causa un aumento del tempo di resistenza dei nutrienti all'interno del bacino. Si è stimato che il completo ricambio di acqua avvenga in un periodo che va dai tre ai dieci anni (Mosetti, 1983), non facilitando l'ingresso di acque oligotrofiche dal Mar Mediterraneo.

Il fiume Po può essere quindi considerato il motore principale della dinamica dei nutrienti in Adriatico, i quali, una volta in mare sono sottoposti a processi di diversa natura che li trasportano attraverso diversi compartimenti.

A Nord del delta del Po le aree costiere sono dominate dalle immissioni di acque fredde dovute agli scarichi fluviali, mentre a Sud del Po, sia nell'Adriatico Centrale che Meridionale, la circolazione è dominata da un'intensa corrente, la Western Adriatic Coastal Current (WACC), che è guidata sia dal vento sia da input di acque fredde. La circolazione è inoltre caratterizzata da diversi giri ciclonici che producono una risalita (upwelling) di acqua dal loro centro.

Al centro del Bacino Settentrionale si origina una massa d'acqua profonda, chiamata Acqua Profonda del Nord Adriatico (Northern Adriatic Deep Water, NAdDW), che è la massa d'acqua profonda più densa che si forma nel Mediterraneo.

La NAdDW si muove verso Sud lungo la scarpata continentale del lato ovest dell'Adriatico, rimanendo confinata vicino al fondo: nell'Adriatico centrale si divide in due correnti, una entrante nella Fossa di Pomo, l'altra che prosegue verso il Bacino Meridionale, secondo sito di formazione di acque profonde.

Qui si forma infatti l'Acqua Profonda dell'Adriatico (Adriatic Deep Water, ADW) che poi fuoriesce dallo Stretto di Otranto durante l'estate. Questa vena di acqua profonda che fuoriesce dall'Adriatico contribuisce a determinarne il

tipo di circolazione verticale antiestuarina. Questo tipo di circolazione verticale corrisponde ad avere acque entranti superficiali e la fuoriuscita di quelle profonde.

La circolazione di tipo estuarino al contrario è favorita dall'accumulo di acque dolci di origine fluviale e dai venti, fattori che determinano la formazione della Corrente Occidentale dell'Adriatico (Western Adriatic Current, WAC). La WAC si muove lungo la costa occidentale in direzione Sud fino allo Stretto di Otranto rimanendo confinata sulla piattaforma continentale a basse profondità, ed è principalmente caratterizzata da acque relativamente fredde e poco salate.

Per compensare l'uscita di queste due masse d'acqua lungo il bordo Ovest del bacino, si ha dalla parte opposta l'ingresso di una corrente d'acqua più salata dal Mar Ionio, chiamata Corrente Orientale dell'Adriatico (Eastern Adriatic Current, EAC). Essa si sviluppa lungo la costa orientale in direzione Nord ed è composta da due masse d'acqua, una che si muove in superficie chiamata Acqua Superficiale dello Ionio (Ionian Surface Water, ISW) e una che fluisce a profondità intermedia (circa 200m), chiamata Acqua Levantina Intermedia Modificata (Modified Levantine Intermediate Water, MLIW).

Questa duplice circolazione termoalina è suscettibile alle variazioni climatiche su scala che interannuale e ad essa si vanno a sommare perturbazioni dovute al regime medio di venti.

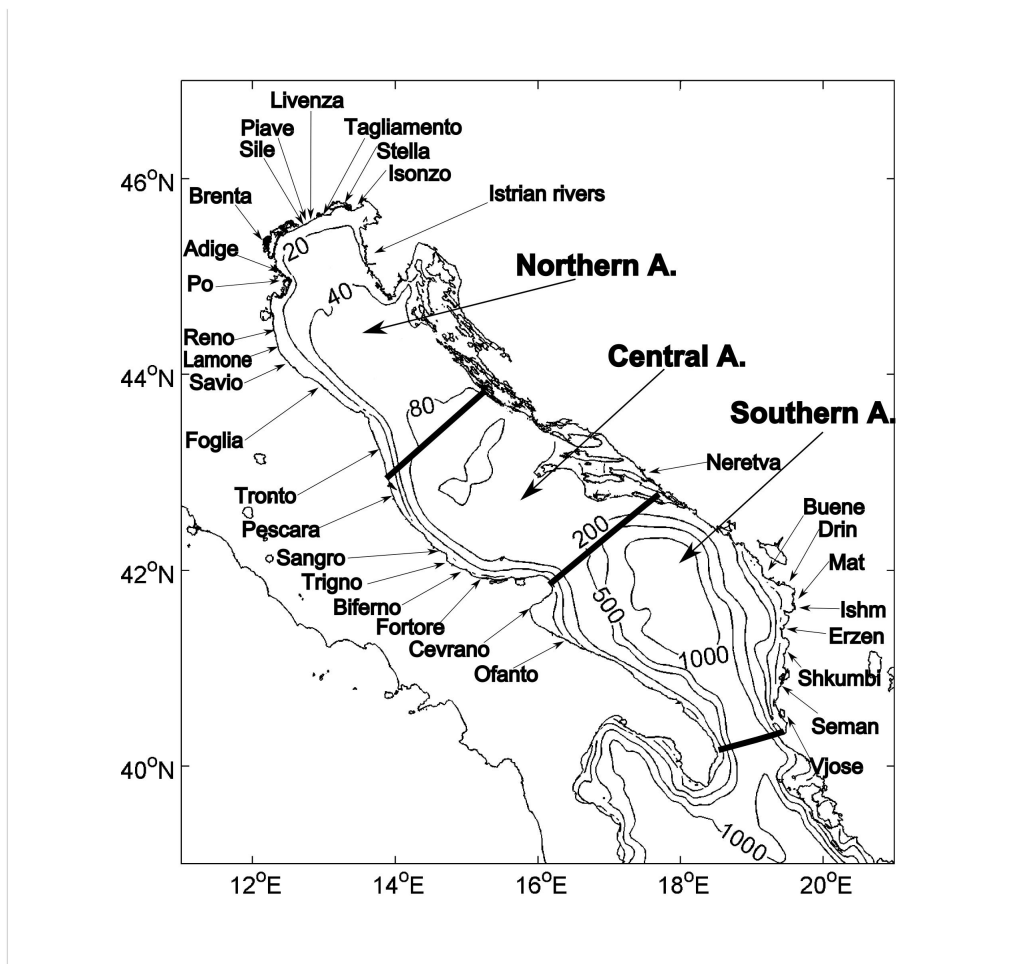


Fig. 1 Mar Adriatico con suddivisioni nei tre sottobacini e fiumi principali

1.2 MODELLI NUMERICI PER LO STUDIO DELL'ECOSISTEMA MARINO

Le prime simulazioni numeriche relative alla circolazione del Mar Adriatico risalgono all'inizio degli anni ottanta (Rizzoli e Hendershott, 1983). e si limitavano allo studio delle correnti nell'alto Adriatico. Si passò poi a modelli per il Mediterraneo e solo nell'ultimo decennio è stato considerato l'Adriatico nel suo complesso. Il primo modello della circolazione del Mediterraneo era a bassa risoluzione orizzontale e considerava una batimetria assai schematica (Pinardi e Navarra, 1993). Zavatarelli e Mellor nel 1995 usarono invece il Princeton Ocean Model (POM) per studiare la circolazione del Mediterraneo. Recentemente il POM è stato adattato al bacino Adriatico usando una griglia curvilinea con risoluzione spaziale variabile, 3Km a nord, fino a 12Km a sud nel Mar Ionio (Zavatarelli et al., 2001). Solamente negli anni novanta fu affiancato alla parte di circolazione un modello biogeochimico che permetteva di studiare la dinamica dell'ecosistema marino nella sua totalità.

Un primo esperimento di simulazione dell'ecosistema adriatico con un modello tridimensionale è stato effettuato da Zavatarelli et al. (2000), anche se in un contesto altamente idealizzato. Il modello biogeochimico usato è l'ERSEM (Baretta et al., 1995) che considera una rappresentazione a biomassa delle componenti organiche ed inorganiche della catena trofica marina. Recentemente è stata raffinata la parte biogeochimica del modello (Polimene et al., 2006a) e l'implementazione tridimensionale è divenuta più realistica considerando le reali caratteristiche morfologiche dell'Adriatico nonché gli apporti di acque dolci e di nutrienti dovuti agli input fluviali (Polimene et al., 2006b). I valori simulati di clorofilla e nutrienti sono stati

confrontati con osservazioni *in situ* e, per quel che riguarda la clorofilla-a, anche con dati stimati dal satellite (SeaWiFS) (**fig. 2**).

2. MATERIALI E METODI

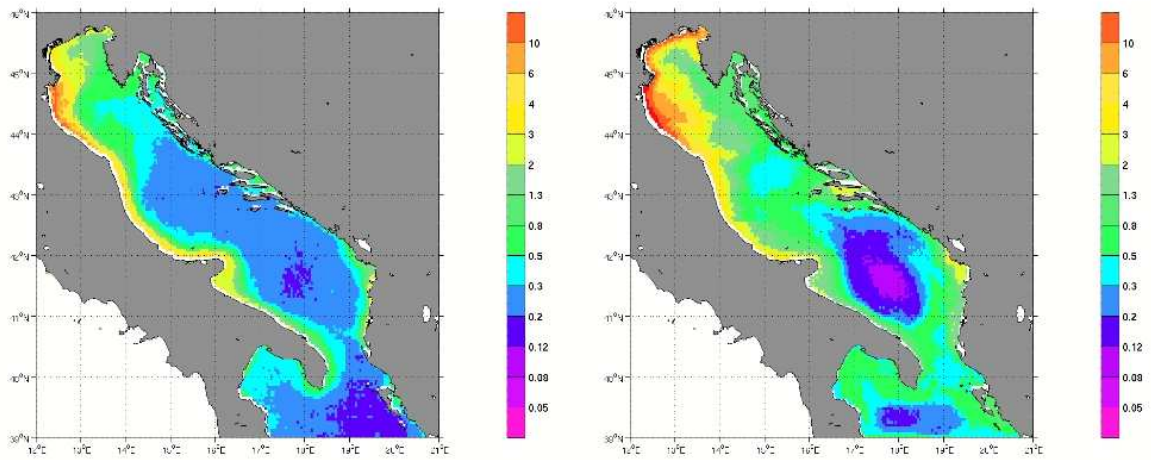
2.2 IL MODELLO NUMERICO

Nel presente studio viene utilizzato un modello idrodinamico a tre dimensioni che deriva dall'accoppiamento di un modello di circolazione POM con ERSEM, come descritto nel capitolo precedente. In particolare in questa tesi si sono usati i campi simulati nel lavoro di Polimene et al. (2006b). Questa implementazione del modello si è dimostrata in grado di descrivere le principali caratteristiche dell'ecosistema Adriatico su scala stagionale, mettendo in luce le complesse interazioni tra i processi fisici e biochimici che avvengono nel bacino.

Il dominio del modello comprende tutto il Mar Adriatico e si estende a Sud del Canale d'Otranto nel Mar Ionio. La risoluzione orizzontale è circa 5 km nel Nord Adriatico e quasi 10 km nello Ionio. La risoluzione verticale del modello non è uniforme e vengono utilizzati circa 21 livelli sigma (una coordinata definita come $\sigma = (z - \eta)/(H + \eta)$ dove η è la superficie libera e H è la profondità) .

La minima profondità del modello è 10 m, perciò non vengono analizzati i processi costieri che avvengono a profondità minori di questa. Il modello presenta una geometria realistica del bacino e realistiche immissioni fluviali.

Gennaio



Osservazione

Modello

Fig. 2. Esempio di risultato del modello di Polimene et al. (2006b) studiato in questa tesi: il campo di clorofilla è integrato sulla lunghezza di decadimento della luce e confrontato con l'osservazione che in questo caso è relativa alla stima della clorofilla del satellite SeaWiFS (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/SeaWiFS/>)

2.2 I DATI MAT

I dati di Produzione Primaria, utilizzati nel nostro studio per effettuare un confronto qualitativo e quantitativo con le simulazioni del modello, derivano dal progetto di monitoraggio e ricerca MAT (Formation Processes of Mucilage in the Adriatic and Tyrrhenian Sea) che è stato ideato con lo scopo di investigare le cause principali del fenomeno della mucillagine.

Nel progetto è stato considerato un grande numero di stazioni posizionate lungo tre transetti che attraversano il bacino Settentrionale dell'Adriatico dalla costa italiana a quella croata.

In ogni stazione sono stati studiati i profili verticali di temperatura, salinità e quantità di luce fotosinteticamente attiva (PAR) nel corso di tre anni dal giugno 1999 al giugno 2002.

Solamente in quattro stazioni (**B6, B13, C4, C12**) (**fig. 3**), che ci si aspettava essere caratterizzate da differenti condizioni trofiche e ideologiche, sono stati misurati i parametri di Produzione Primaria e Produzione Batterica con una frequenza da mensile a bimensile.

I campioni di acqua per l'analisi della Produzione Primaria sono stati analizzati mediante il metodo del C14.

La Produzione fitoplanctonica totale e la biomassa è stata ottenuta dall'integrazione dei dati collezionati a differenti profondità lungo la colonna d'acqua.

3. OBIETTIVI

Questo studio si pone l'obiettivo di evidenziare la variabilità spazio-temporale della struttura trofica dell'ecosistema adriatico attraverso lo studio della simulazione numerica prodotta da Polimene et al. (2006b). In particolare si analizzeranno i flussi di Carbonio (Produzione Primaria, Respirazione di Comunità, Respirazione Batterica, Produzione Batterica, Efficienza Batterica) e la biomassa fitoplanctonica.

I parametri sono stati analizzati su diverse scale di grandezza: nell'intero Adriatico, nei quattro sottobacini, in sei stazioni situate nel bacino Settentrionale e Meridionale.

I risultati ottenuti dallo studio di questi parametri nei sottobacini, sono stati messi a confronto con alcuni dati presenti in letteratura (La Ferla et al. (2006), Giani et al.(2001)).

E' stata inoltre analizzata la dipendenza del ciclo dei Produttori Primari dalla struttura della colonna d'acqua caratterizzandola con la profondità dello strato rimescolato e mettendola in correlazione con la profondità critica (profondità alla quale produzione e respirazione sono uguali), come indicato nel meccanismo di Sverdrup (Sverdrup H. (1953)) per spiegare le fioriture algali tardo-invernali.

4. RISULTATI

4.1 VALIDAZIONE: CONFRONTO CON I DATI DI PRODUZIONE PRIMARIA

Da **fig. 4** a **fig. 7** sono riportati i profili stagionali ottenuti mediante il confronto tra i dati di Total Production campionati in quattro stazioni (**B6 B13 C4 C12**) situate nel Nord Adriatico (**fig. 3**) e di Produzione Primaria Lorda (GPP Gross Primary Production) simulati dal modello per le medesime stazioni.

I dati campionati sono stati ottenuti con il metodo del C14 che consente una stima della Produzione Totale, approssimazione per difetto della Produzione Primaria Lorda.

Il modello, pur effettuando una sovrastima nei mesi primaverili ed estivi, riesce a riprodurre il trend stagionale di Produzione Primaria lungo la colonna d'acqua.

In particolare si osserva un buon accordo tra dati e modello nei mesi autunnali, dove la migliore approssimazione è stata effettuata nell'autunno della **stazione C4 (fig. 6)** e in inverno, dove è tuttavia presente una sovrastima del massimo superficiale (la **stazione B6 (fig. 5)** rappresenta invece il risultato migliore nei mesi invernali).

Per permettere un confronto quantitativo tra dati e modello riportiamo in **tabella 1** le medie annuali dei valori integrati sulla colonna d'acqua con le relative deviazioni standard nelle quattro stazioni.

Il confronto tra profili stagionali e medie annuali dimostra come l'accordo tra dati e modello sia soprattutto qualitativo, dato che, quantitativamente, il modello sovrastima sensibilmente le osservazioni..

Le stagioni sono definite come segue:

- **inverno** Gennaio, Febbraio, Marzo
- **primavera** Aprile, Maggio, Giugno
- **estate** Luglio, Agosto, Settembre
- **autunno** Ottobre, Novembre, Dicembre

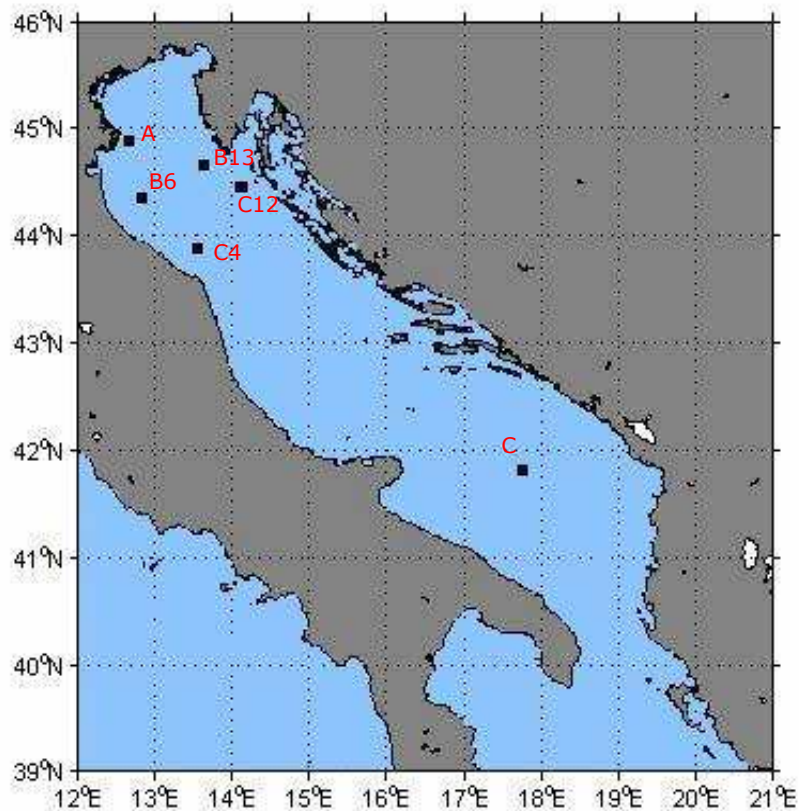


fig. 3 localizzazione delle sei stazioni analizzate nel presente studio

Stazione B6

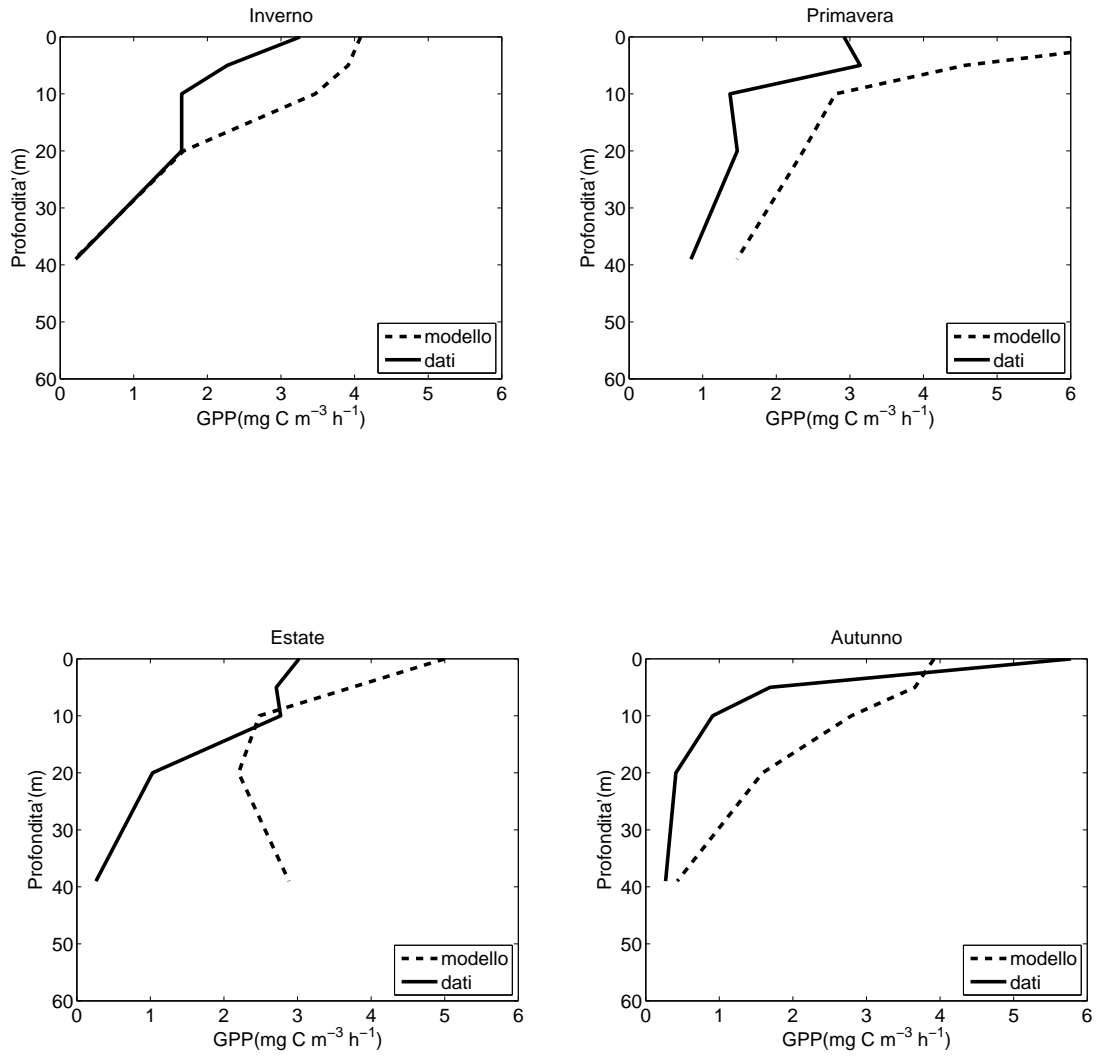


Fig. 4 Profili medi stagionali di Produzione primaria lorda (GPP) simulati dal modello e profili medi stagionali di Produzione primaria totale (TPP) misurati nel corso del progetto MAT per la **stazione B6**.

Stazione B13

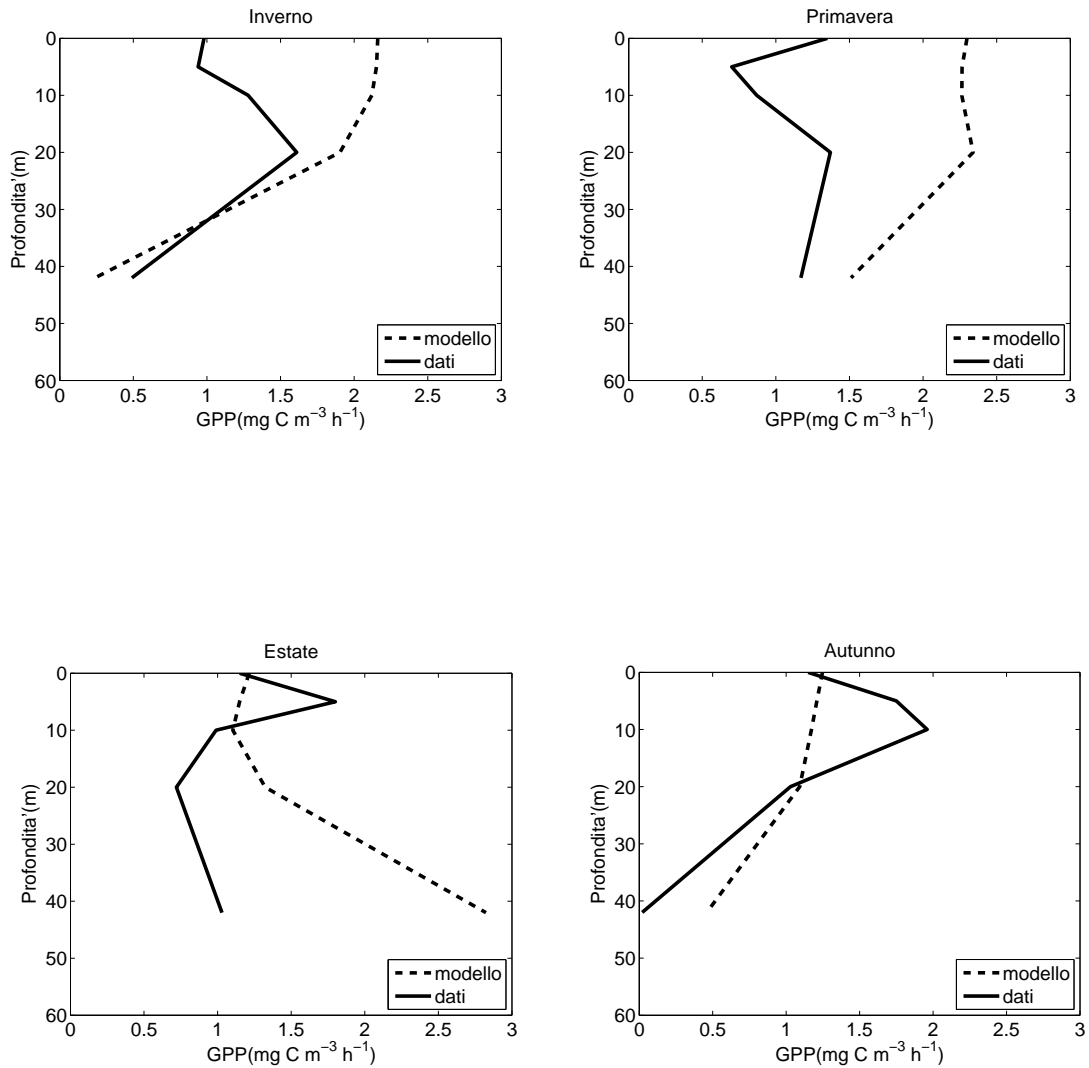


Fig. 5 Profili medi stagionali di Produzione primaria lorda (GPP) simulati dal modello e profili medi stagionali di Produzione primaria totale (TPP) misurati nel corso del progetto MAT per la **stazione B13**.

Stazione C4

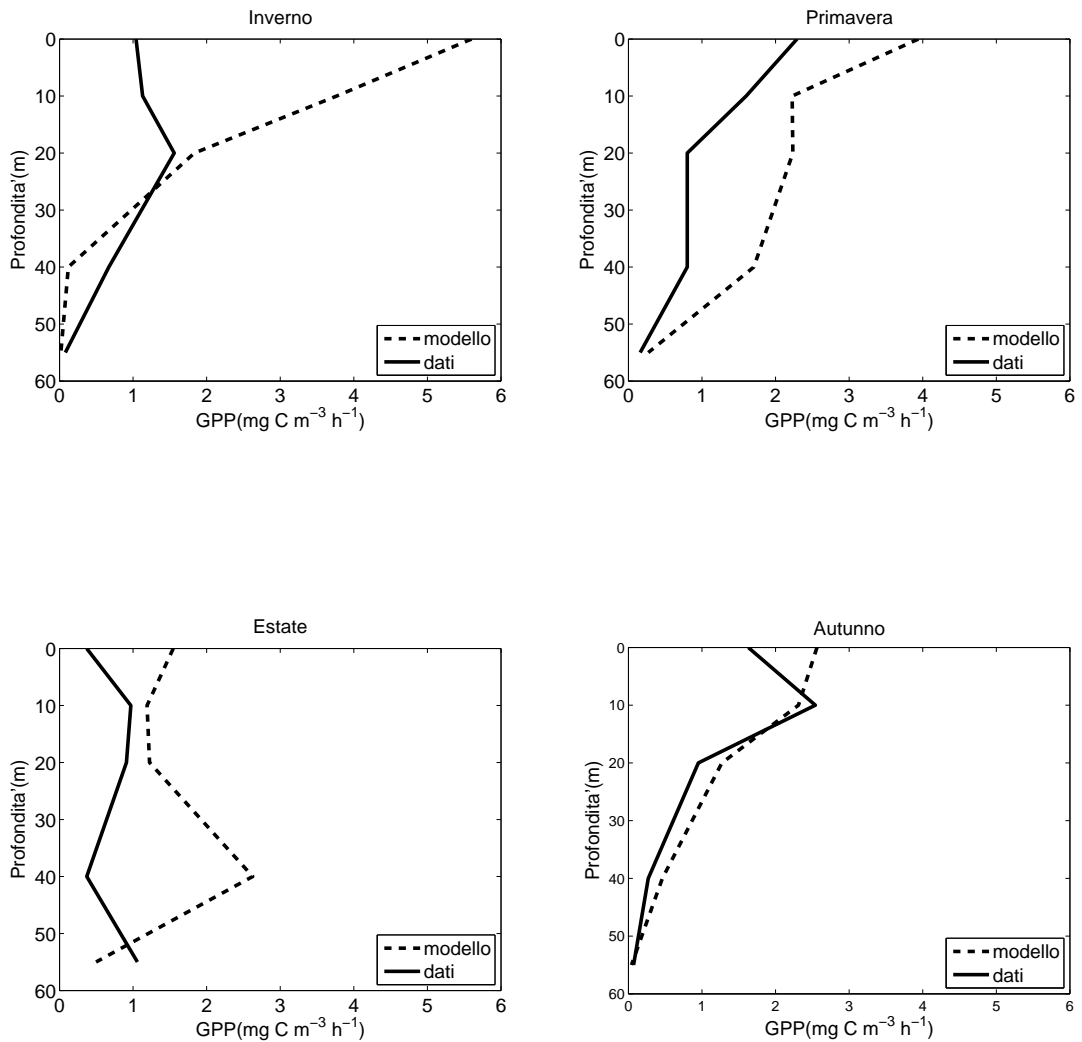


Fig. 6 Profili medi stagionali di Produzione primaria lorda (GPP) simulati dal modello e profili medi stagionali di Produzione primaria totale (TPP) misurati nel corso del progetto MAT per la **stazione C4**.

Stazione C12

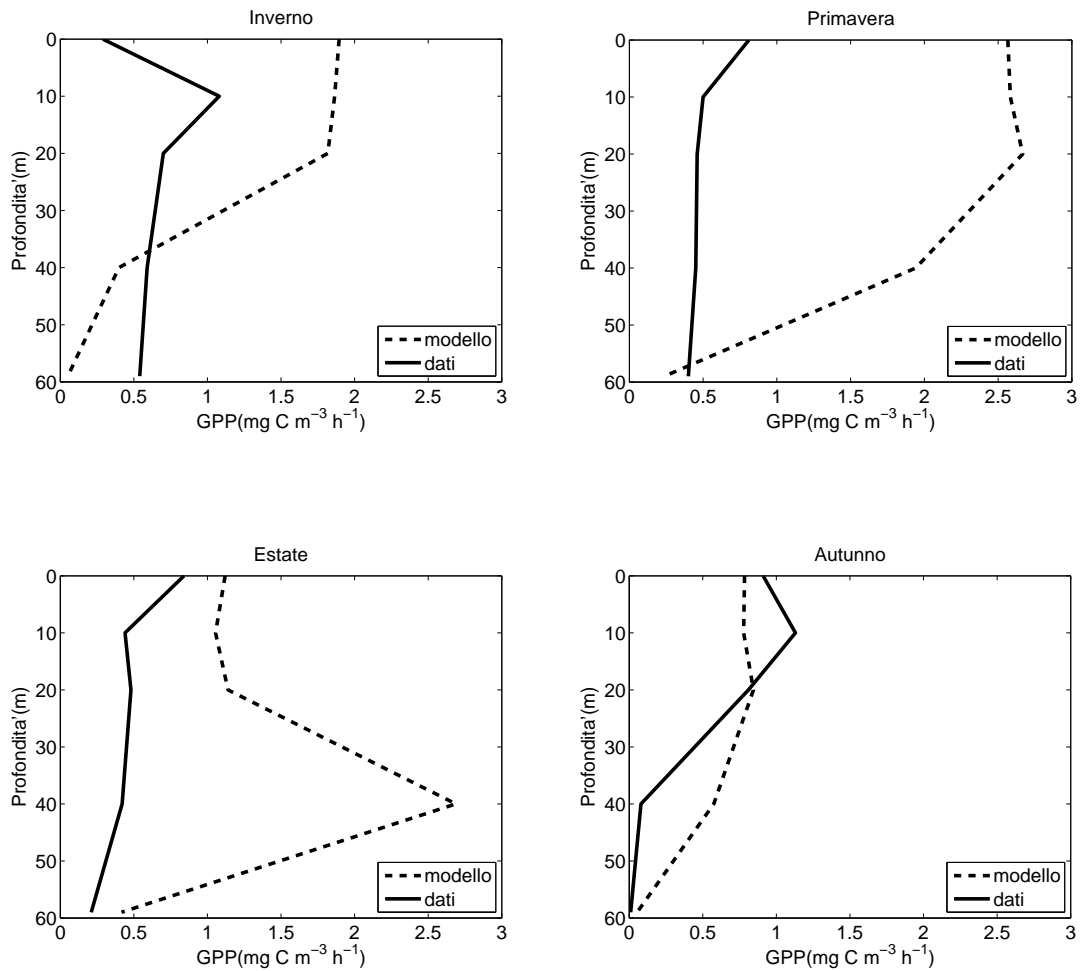


Fig. 7 Profili medi stagionali di Produzione primaria lorda (GPP) simulati dal modello e profili medi stagionali di Produzione primaria totale (TPP) misurati nel corso del progetto MAT per la **stazione C12**.

	MODELLO mg m⁻² h⁻¹	DATI mg m⁻² h⁻¹
B6	118 ± 19	71 ± 11
B13	74 ± 24	53 ± 7
C4	11 ± 27	61 ± 10
C12	91 ± 41	36 ± 5

Tabella 1 Medie annuali e rispettive deviazioni standard di Produzione primaria Lorda (integrata sulla colonna d'acqua) da dati simulati dal modello numerico e campionati per le quattro stazioni

4.2 BUDGET DI CARBONIO NEI DIVERSI SOTTOBACINI DELL'ADRIATICO

Per studiare i flussi di Carbonio nell'Adriatico è stato analizzato l'indice trofico ottenuto mediante il rapporto tra Produzione Primaria Lorda (GPP) e Respirazione di Comunità (R) che sarà indicato come GPP/R. Il modello simula per l'intero bacino un valore di questo rapporto minore di 1, suggerendo, quindi, che il Mar Adriatico, nel suo complesso, può essere considerato una sorgente di CO₂.

Poiché l'Adriatico risulta essere caratterizzato da forti gradienti trofici secondo la direzione Nord-Sud ed OVEST-EST, si è studiato questo indice nei diversi sottobacini.

Il dominio del modello è stato quindi suddiviso (come già convenzionalmente fatto in letteratura) in quattro sottobacini (già definiti nell'introduzione): lo Shallow-Nord, il Deep-Nord, il Middle, ed quello Sud, che presentano differenze morfologiche e di struttura dell'ecosistema.

All'interno di ogni sottobacino sono stati calcolati anche i flussi di sedimentazione simulati, al fine di ottenere una stima del budget totale di carbonio

Analizzando i valori annuali di GPP/R sono state riscontrate notevoli differenze sia tra i differenti sottobacini, sia all'interno dei sottobacini stessi, a conferma della grande variabilità dell'ecosistema Adriatico. (**tabella 2**).

	GPP/R	GPP - R	SEDIMENTAZIONE
S.N	1.39	3.76×10^{15}	1.31×10^{15}
D.N	1	0	
M	0.94	$- 1.40 \times 10^{15}$	6.20×10^{14}
S	0.88	$- 3.51 \times 10^{15}$	4.30×10^{14}

Tabella 2 Differenze e rapporti annuali tra Gross Primary Production e Respirazione nei quattro sottobacini e rispettivi flussi di sedimentazione.

	PERCENTUALI GPP – R	PERCENTUALI SEDIMENTAZIONE
S.N	100%	35%
D.N	0%	
M	37%	16%
S	92%	11%

Tabella 3 Differenze annuali percentuali tra Gross Primary Production e Respirazione nei quattro sottobacini e rispettivi flussi percentuali di sedimentazione.

Dei quattro sottobacini solo lo Shallow-Nord rivela un eccesso di Produzione rispetto alla Respirazione, presentando una situazione prevalentemente autotrofa. Il Deep-Nord, invece, si trova pressoché all'equilibrio (con un valore di GPP/R di circa 1). Per quanto riguarda il bacino Centrale e Meridionale è stato riscontrato un eccesso di Respirazione rispetto alla Produzione (GPP/R = 0.94 per il bacino centrale, GPP/R = 0.88 per quello meridionale) Questo eccesso di Respirazione può essere visto in termini di deficit di Carbonio Organico.

Secondo le simulazioni da noi analizzate, il surplus di Carbonio prodotto nella zona costiera dell'Adriatico Settentrionale è sufficiente a bilanciare il tasso di sedimentazione del bacino Nord e, ipotizzando un trasporto netto in direzione

Sud, anche il deficit di Carbonio presente nel bacino Centrale ivi compresi i flussi di sedimentazione. Seguendo questo ragionamento il surplus di carbonio prodotto nel bacino Shallow Nord colmerebbe solo in minima parte il deficit di C del bacino meridionale lasciando pressoché inalterato il rapporto GPP/R simulato in quella zona.

Partendo dal principio di conservazione della massa abbiamo supposto che la causa di questo deficit fosse da attribuire al carbonio organico disciolto (DOC) associato all'immissione delle acque levantine nel canale d'Otranto.

Questo DOC "alloctono" immesso nell'Adriatico potrebbe infatti aumentare significativamente la respirazione batterica che nel bacino sud (in base ai valori simulati dal modello) costituisce circa il 70% della respirazione di comunità **(Tabella 4)**

A supporto di questo ragionamento è stato effettuato un esperimento di sensibilità realizzando nuove simulazioni eliminando, nel modello, l'immissione di DOC dal canale d'Otranto.

Questo esperimento, come ci si aspettava, ha portato ad un sensibile aumento dei valori di GPP/R nel bacino sud mentre ha lasciato pressoché inalterati i valori dello stesso rapporto negli altri sottobacini ed i flussi di sedimentazione.

Il Mare Adriatico, quindi, privato di sorgenti alloctone di C-organico risulterebbe perfettamente all'equilibrio in termini di budget di carbonio con un rapporto $GPP/R=1$.

Secondo lo scenario offerto dal modello numerico si evince che l'apporto di carbonio organico dovuto alle Acque Levantine influisce esclusivamente sul bacino Meridionale, mentre la West Adriatic Coastal Current distribuirebbe il surplus di Carbonio prodotto nello Shallow Nord solo fino al bacino Centrale.

In **fig. 8** è riportata una rappresentazione schematica del Mar Adriatico e dei suoi sottobacini con i corrispondenti valori di GPP – R e di sedimentazione in percentuale e i valori di GPP/R.

	Rbatt/R
S.N	0.58
D.N	0.68
M	0.69
S	0.73

Tabella 4 Rapporto annuale medio tra i valori simulati di Respirazione Batterica e Respirazione di Comunità nei quattro sottobacini.

I valori del rapporto GPP/R e dei flussi di sedimentazione simulati dal modello sono stati confrontati con i pochi dati presenti in letteratura come mostrato in **tabella 5 e 6**.

	MODELLO	DATI La Ferla et al.(2005)
S.N	1.4 ±	1.28
S	0.9 ±	0.72

Tabella 5 Rapporti annuali tra Gross Primary Production e Respirazione da simulazione e da dati presenti in letteratura (La Ferla et al.(2005)) per lo Shallow Nord e il bacino Sud.

	MODELLO	DATI Giani et al.(2001)
N	46	71-97

Tabella 6 Valori annuali dei flussi di sedimentazione ($\text{mg C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) da simulazione e de dati presenti in letteratura (Giani et al (2001)) per il bacino Nord.

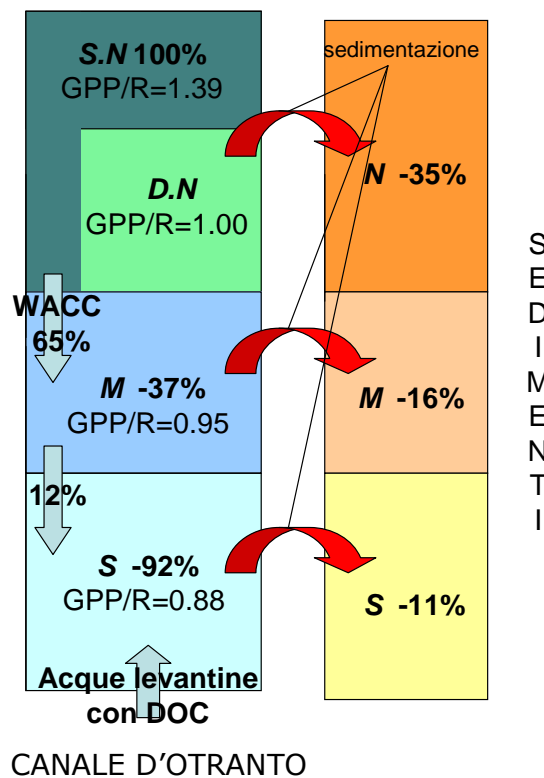
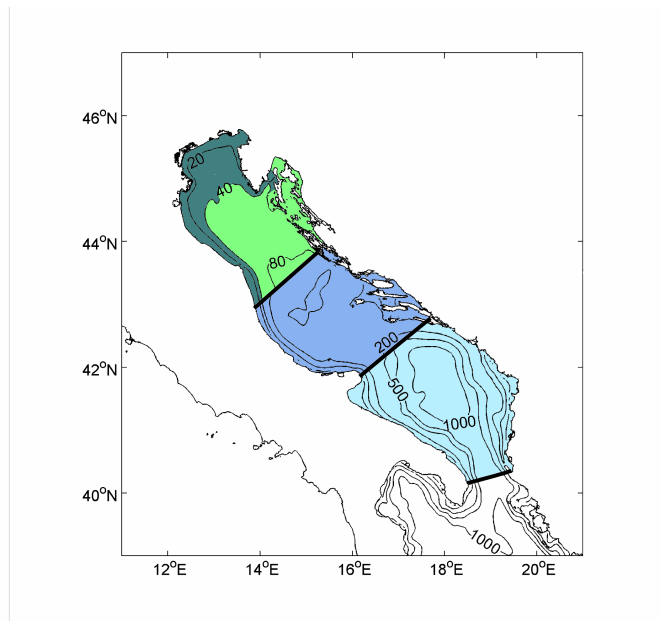


Fig. 8 Rappresentazione schematica dei sottobacini Mar Adriatico con rispettivi valori di GPP-R e flussi di sedimentazione in percentuale e valori di GPP/R. I valori percentuali sono calcolati rispetto al surplus di carbonio prodotto nello Shallow Nord (**S.N**)

4.3 BGE IN SEI DIFFERENTI STAZIONI COME INDICE DELLO STATO TROFICO

Per studiare in maniera ancora più accurata la variabilità spazio-temporale all'interno del bacino è stata analizzata la Bacterial Growth Efficiency (BGE) stagionale in sei stazioni (**A, B6, B13, C4, C12, C**) (**fig. 3**) sottocampionate dal dominio del modello. Le stazioni sono state scelte in modo da rappresentare zone con caratteristiche trofiche ed idrodinamiche contrastanti.

La BGE è stata calcolata seguendo la formulazione suggerita da Polimene et al., (2006a) secondo cui:

$$BGE = BCP / \left. \frac{\partial B_c}{\partial t} \right|_{DOC}^{uptake}$$

Dove BCP è la produzione batterica netta, e $\left. \frac{\partial B_c}{\partial t} \right|_{DOC}^{uptake}$ è l'uptake totale di Carbonio.

La BGE è un parametro che, come il rapporto GPP/R, può essere utilizzato come indice dello stato trofico del bacino. Essa infatti è tipicamente bassa negli ambienti dove predomina la catena microbica (oligotrofici) mentre è alta negli ambienti dove prevale la catena erbivora (meso-eutrofici) (del Giorgio and Cole, 1998).

I valori simulati di BGE nelle sei stazioni indicano la presenza di un gradiente Nord-Sud (**fig. 9**).

Il modello simula, in tutte le stazioni analizzate, un aumento di BGE nei mesi estivi mentre i valori minimi cadono nei mesi invernali. L'andamento stagionale della BGE sembra quindi essere strettamente correlato con il ciclo del DOC che pure presenta i massimi nei periodi estivi (Giani et al, 2005, Polimene et al.,

2006b). La correlazione spaziale tra i valori annuali medi di DOC e di BGE simulati nelle sei stazioni campione non mostrano però una correlazione significativa (**fig. 10**). Altamente correlati invece sono i valori di BGE annuali medi ed i valori di fosforo totale simulati nelle differenti stazioni (**fig. 11**), indicando una stretta relazione tra BGE e nutrienti in accordo con quanto descritto in letteratura (Del Giorgio and Cole, 1998).

Il modello quindi riproduce alcune caratteristiche della BGE ben note dalla letteratura e cioè la dipendenza dal DOC (dipendenza che si verifica temporalmente) e dai nutrienti (che si verifica spazialmente).

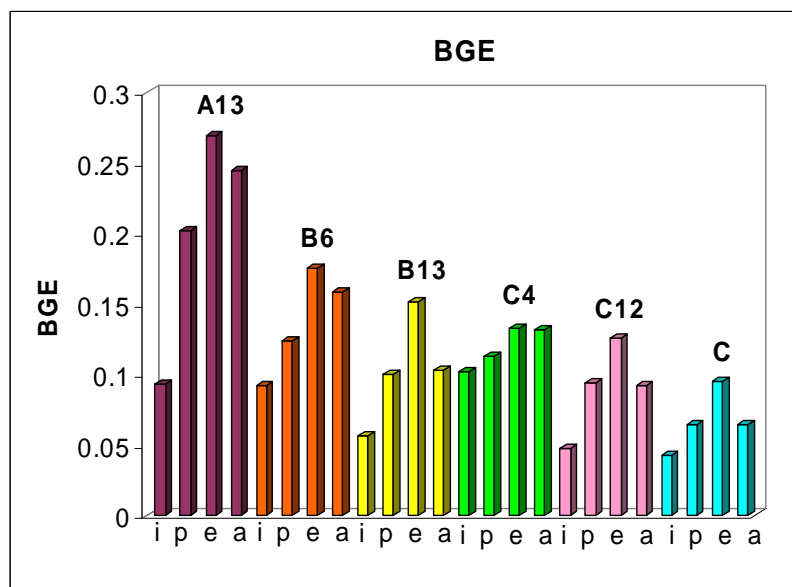
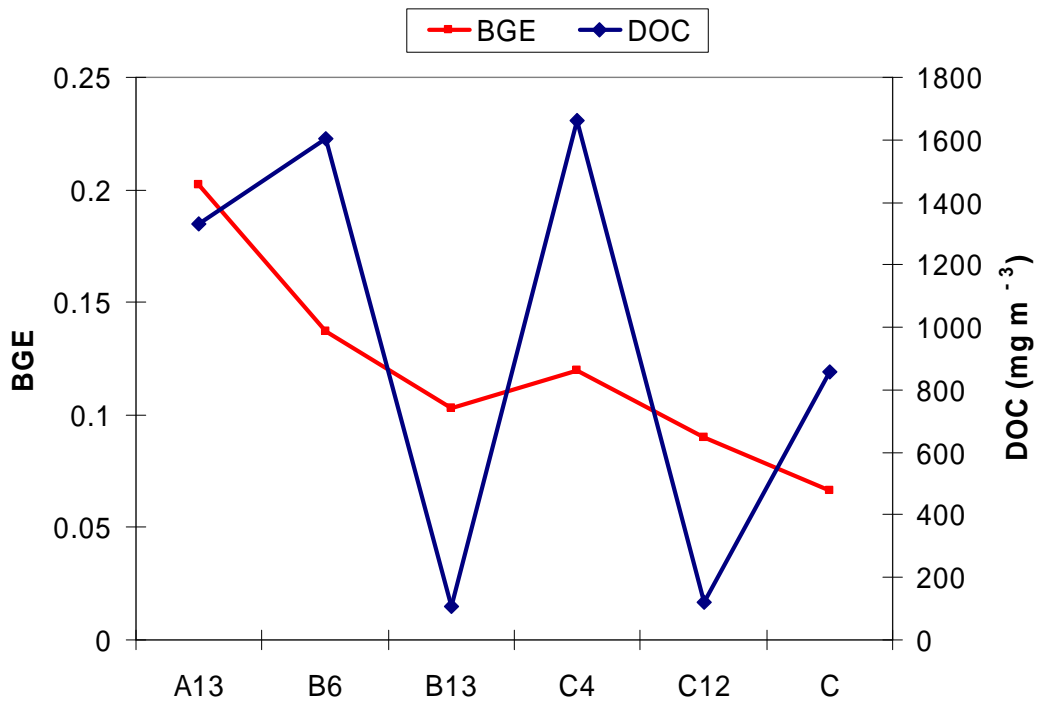
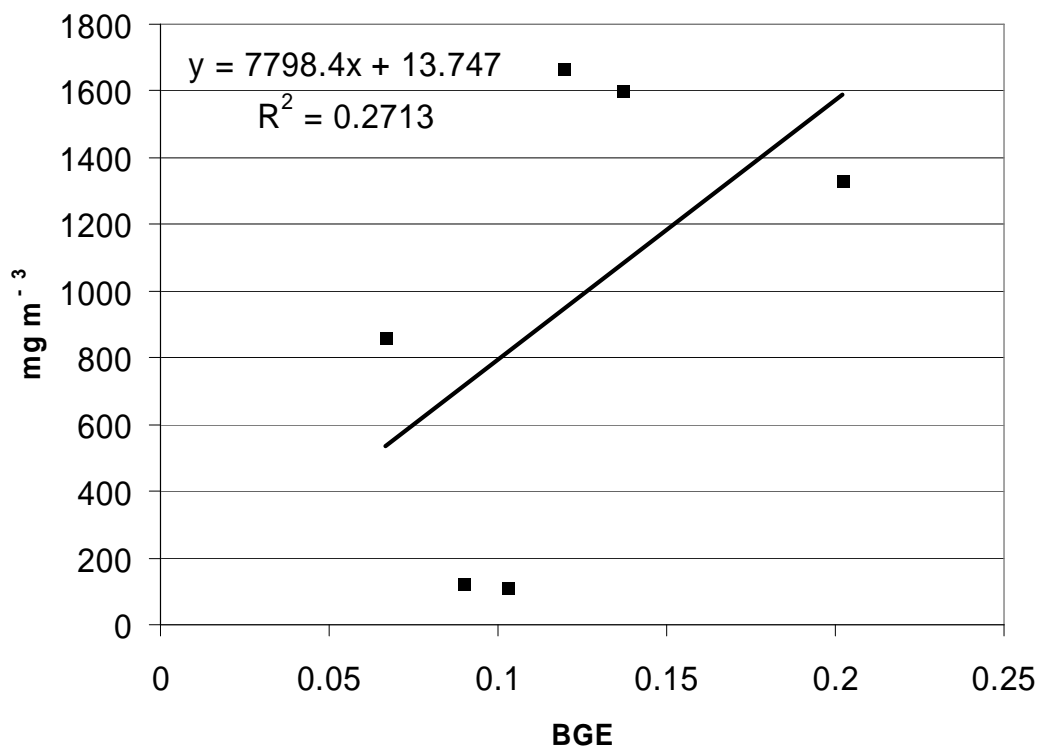


Fig. 9 Valori stagionali integrati sulla colonna d'acqua per il parametro di BGE nelle sei stazioni analizzate.

i = inverno
 p = primavera
 e = estate
 a = autunno

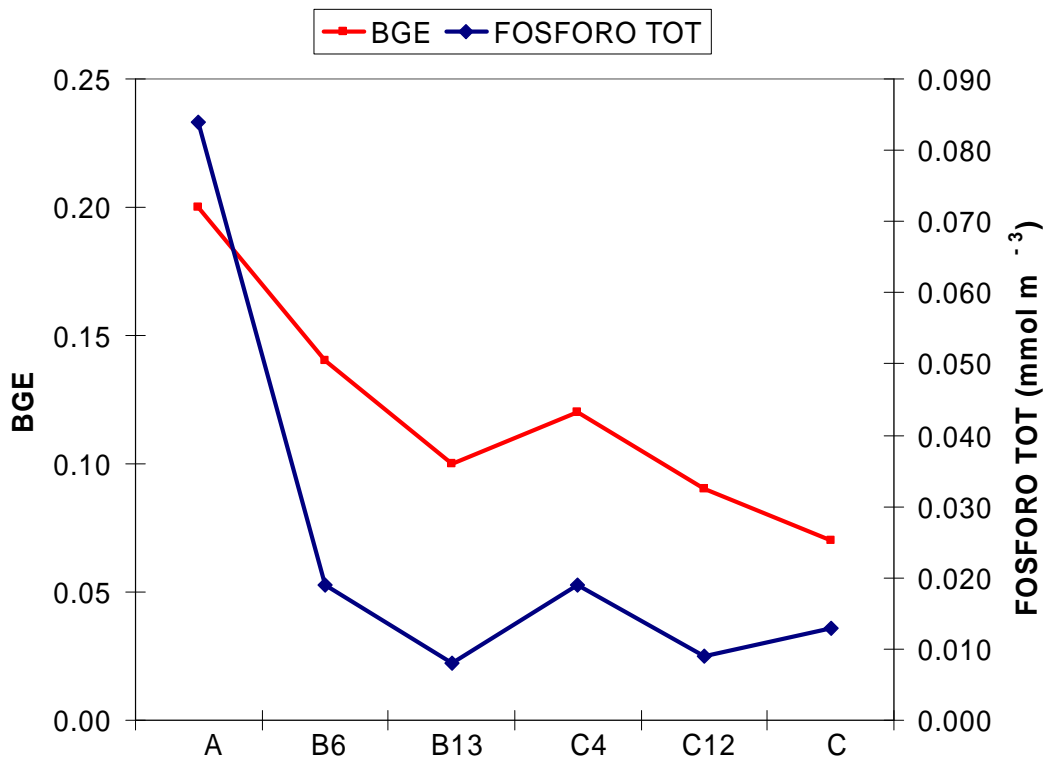


(A)

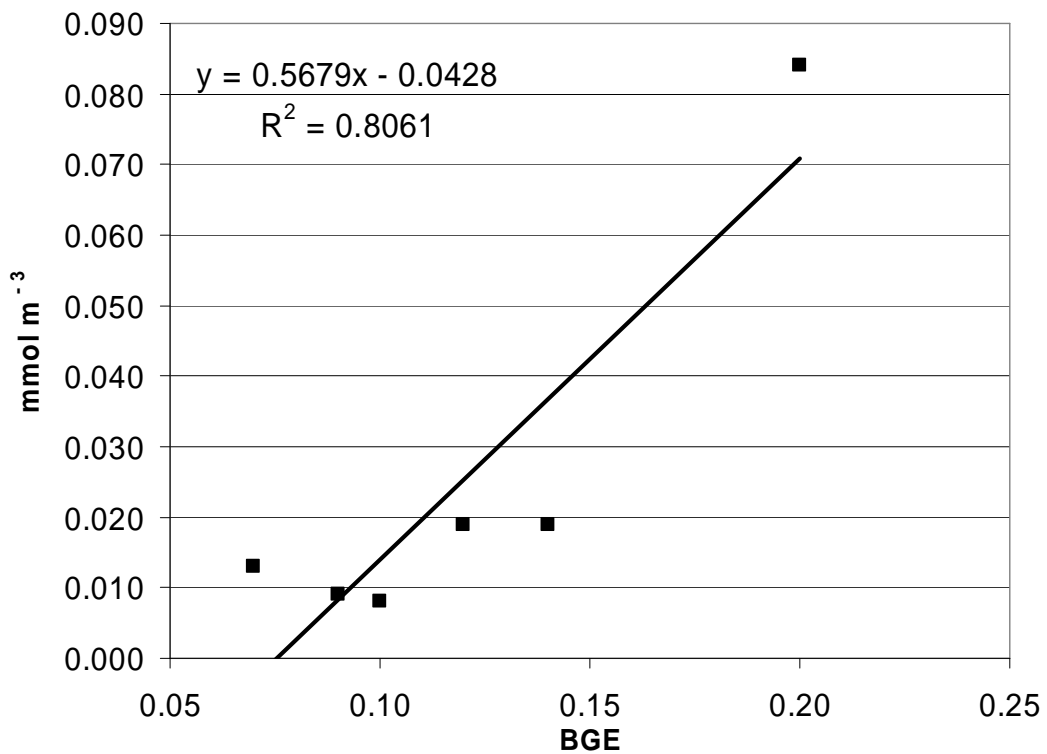


(B)

Fig. 10 (A) Andamento dei parametri di BGE e DOC annuali medi, integrati sulla colonna d'acqua, simulati nelle sei stazioni analizzate e (B) rispettiva retta di regressione.



(A)



(B)

Fig. 11 Andamento dei parametri di BGE e FOSFORO TOTALE annuali medi, integrati sulla colonna d'acqua, simulati nelle sei stazioni analizzate e rispettiva retta di regressione.

4.4 RELAZIONI TRA LA STRUTTURA DELLA COLONNA D'ACQUA ED IL CICLO STAGIONALE DEL FITOPLANCTON

Negli anni '50 l'oceanografo Sverdrup ideò un modello teorico per spiegare le condizioni necessarie perché si verificano le fioriture algali, mettendole in relazione ai processi di rimescolamento che avvengono nella colonna d'acqua. Questo modello era stato pensato specificatamente per le crescite fitoplanctoniche primaverili nel Nord Atlantico, situazione circoscritta quindi nel tempo e nello spazio.

Il meccanismo di Sverdrup descrive il feed back che avviene tra gli eventi fisici e biologici all'interno della colonna d'acqua collegando la Profondità Critica (Critical Depth), profondità alla quale l'integrale verticale della Produzione Primaria risulta uguale all'integrale della Respirazione degli autotrofi, alla profondità a cui si trova lo strato rimescolato (Mixed Layer), strato in cui la densità è circa costante. In genere lo strato rimescolato si estende dalla superficie fino al Pycnoclino (zona dove esiste il massimo gradiente di densità). Per calcolare la profondità dello strato rimescolato è stato utilizzato un parametro che è indice della stabilità della colonna d'acqua, la frequenza di Brunt-Vaisala. La profondità dove questo valore è massimo è la profondità alla quale inizia il Pycnoclino, ed è una stima quindi del limite inferiore dello strato rimescolato.

Secondo il meccanismo di Sverdrup sono presenti le condizioni fisiche e biologiche affinché si verifichi una fioritura quando lo strato rimescolato si trova ad una profondità minore della profondità critica. Quest'ultima infatti è correlata alle condizioni biologiche e di luce necessarie alla fioritura algale, ma anche al meccanismo di rimescolamento che porta in superficie i nutrienti.

Nel presente studio abbiamo verificato se il modello di Sverdrup fosse in grado di spiegare l'insorgere di una fioritura in due punti del mare Adriatico. Per far questo abbiamo però ridefinito, sulla scia di quanto già fatto in letteratura (Siegel et al., 2002), il concetto di profondità critica includendo in quest'ultima anche la respirazione degli eterotrofi.

Il meccanismo di Sverdrup è stato verificato in due stazioni: **A**, **C**, che presentano rispettivamente i valori massimi e minimi di BGE.

Le due stazioni sono anche le più distanti in termini di posizione e morfologia.

La **stazione A** è costiera ed è perciò quella che maggiormente risente degli apporti fluviali. Presenta inoltre una bassa batimetria che non supera i 40m di profondità, essendo situata nello Shallow Nord.

La **stazione C** è localizzata invece al centro del bacino meridionale, zona che risente sporadicamente degli apporti fluviali, dove troviamo una colonna d'acqua che raggiunge profondità di oltre 1000 m. In questa stazione i valori riportati si riferiscono ai primi 100 metri della colonna d'acqua che è approssimativamente il limite della zona eufotica.

Stazione A:

Come si può vedere dal grafico (**fig. 12**) nella **stazione A** è sempre verificata la condizione di Sverdrup. Da ciò si può dedurre che sia l'insorgere che il decadimento della fioritura sia indipendente dalla profondità dello strato rimescolato. Infatti, come detto in precedenza, in mare aperto la profondità dello strato rimescolato è direttamente connessa alla disponibilità dei nutrienti mentre in questa stazione i nutrienti provengono essenzialmente dal Po.

Il ciclo del fitoplancton sembra quindi essere governato da un altro fattore.

Analizzando il rapporto tra Produzione Batterica (BCP) e Produzione Primaria Netta nelle due stazioni (**fig. 15**) non si osserva nella **stazione A** un maggiore contributo batterico rispetto a quello fitoplanctonico. E' quindi da escludere un controllo della fioritura dovuto alla competizione batterica con i produttori primari.

La **fig. 16**, che rappresenta la variazione temporale delle componenti dello zooplancton attraverso il rapporto tra gli individui di taglia maggiore (mesozooplancton, microzooplancton) e quelli di taglia minore (nanozooplancton), dimostra la sostanziale prevalenza dei predatori di grandi dimensioni, con un valore del rapporto maggiore di 1 durante tutto l'anno esclusi i mesi invernali. Si osserva inoltre un picco di zooplancton durante il mese di giugno in corrispondenza del picco di produzione primaria (**fig. 15**).

La Produzione Primaria netta è quindi correlata alle portate del Po e il suo decadimento viene controllato dall'attività di grazing da parte dello zooplancton (controllo Top Down).

I flussi di Carbonio sono diretti verso i comparti più alti della catena trofica che portano flussi ad elevata sedimentazione. Ciò è ben osservabile in **tabella 3** dove sono riportati gli alti tassi di sedimentazione del bacino Nord, zona in cui è situata la **stazione A**.

Stazione C:

La struttura della colonna d'acqua sembra guidare, in questa stazione, il bloom fitoplanctonico primaverile, che nel grafico corrisponde alla diminuzione della profondità dello strato rimescolato ed il contemporaneo abbassamento della

profondità critica (**fig. 13**). Il meccanismo di Sverdrup per la fioritura tardo invernale è quindi verificato in questa stazione.

Il conseguente decadimento della produzione primaria è dovuto ad una limitazione da nutrienti che sembra dipendere dalla competizione batterica con il fitoplancton (**fig. 15**). La biomassa batterica risulta bassa fino al mese di Maggio poiché fino a quel periodo non è disponibile DOC semilabile (**fig. 17**), che è il substrato principale per la crescita batterica.

Durante i mesi invernali i batteri, essendo limitati dalla scarsa quantità di DOC, non sembrano competere con il fitoplancton per l'assunzione di nitrati e fosfati. Quando le concentrazioni di DOC cominciano a crescere (primavera) i batteri si attivano e, per un più efficiente utilizzo del DOC, utilizzano i nutrienti disciolti sottraendoli così al fitoplancton.

Dall'andamento del rapporto tra BCP e Produzione Primaria netta (**fig. 15**) si evince che i batteri, in questa stazione, dominano sul fitoplancton specialmente nei mesi estivi. Questo, unitamente al fatto che prevalgono i predatori di piccole dimensioni (nanoflagellati eterotrofi) (**fig. 16**), suggerisce che la struttura trofica nella **stazione C** è caratterizzata da una catena di tipo microbico e che i produttori primari sono controllati dal basso (secondo un meccanismo tipo Bottom-Up). La presenza di una struttura trofica di tipo microbico (microbial loop) dove quindi dominano produttori e consumatori di piccole dimensioni (nano e pico-plancton) è anche confermata dai bassi tassi di sedimentazione simulati dal modello nel bacino sud di cui la stazione C fa parte.

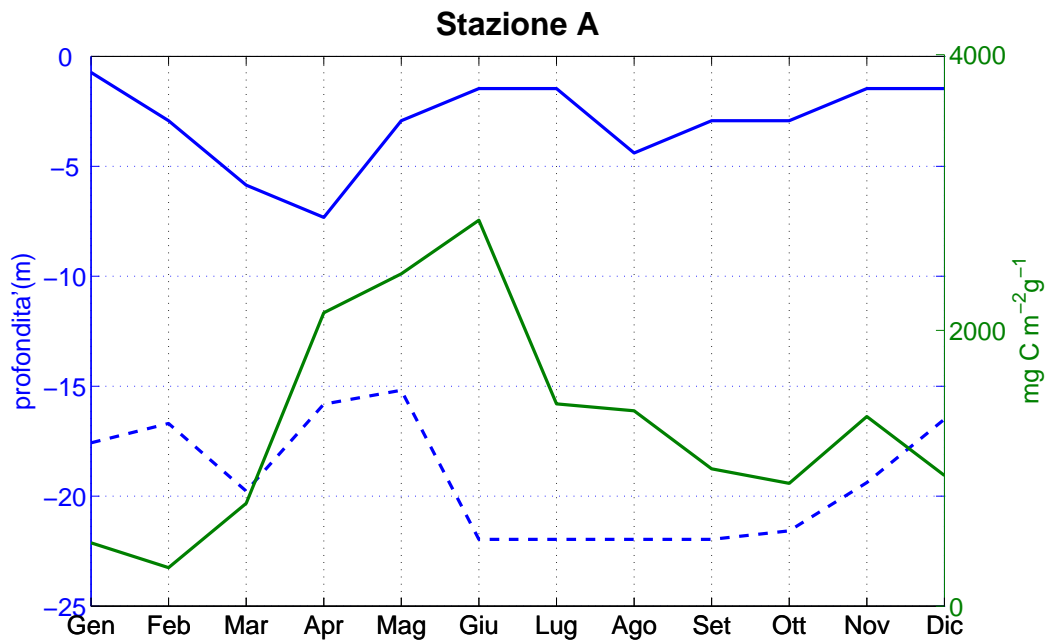


fig. 12 Nel grafico è riprodotta la struttura annuale media della colonna d'acqua nella **stazione A** attraverso l'analisi del Strato Rimescolato (linea blu continua), della Profondità Critica (linea blu tratteggiata) e della Produzione Primaria Netta integrata (linea verde).

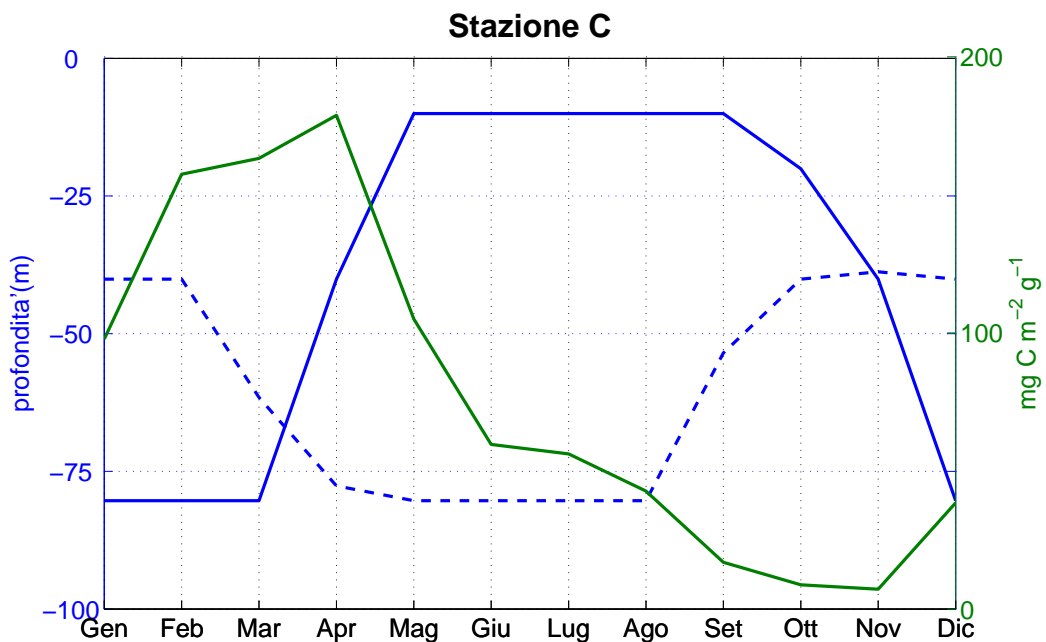


fig. 13 Nel grafico è riprodotta la struttura annuale media della colonna d'acqua nella **stazione C** attraverso l'analisi del Strato Rimescolato (linea blu continua), della Profondità Critica (linea blu tratteggiata) e della Produzione Primaria Netta integrata (linea verde).

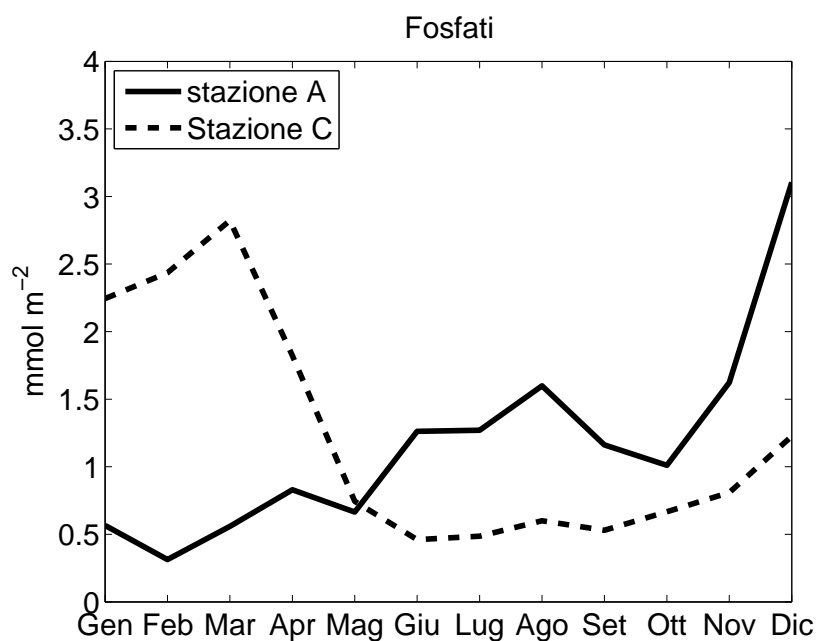


fig. 14 Andamento annuale della concentrazione di fosfati, integrati sulla colonna d'acqua, nelle due stazioni analizzate.

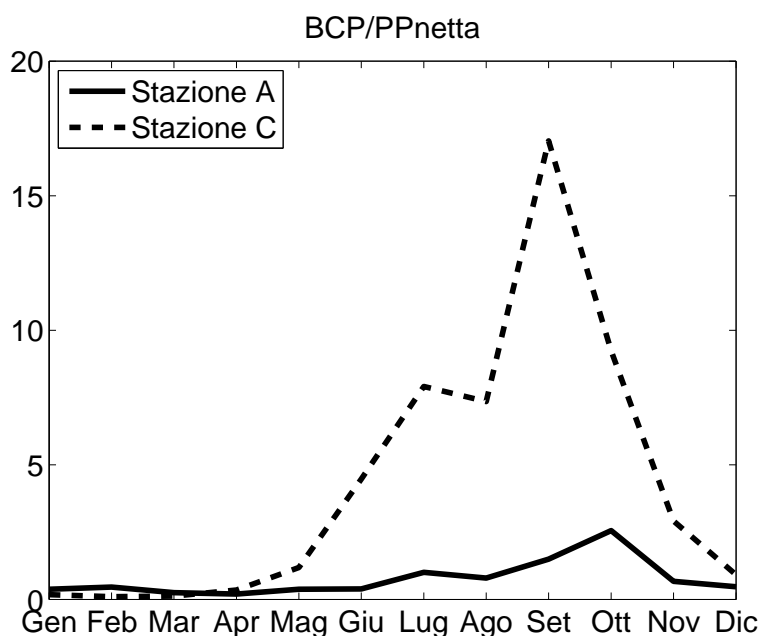


fig. 15 Rapporto annuale tra i parametri di Produzione Batterica e di Produzione Primaria Netta, integrati sulla colonna d'acqua, nelle due stazioni analizzate.

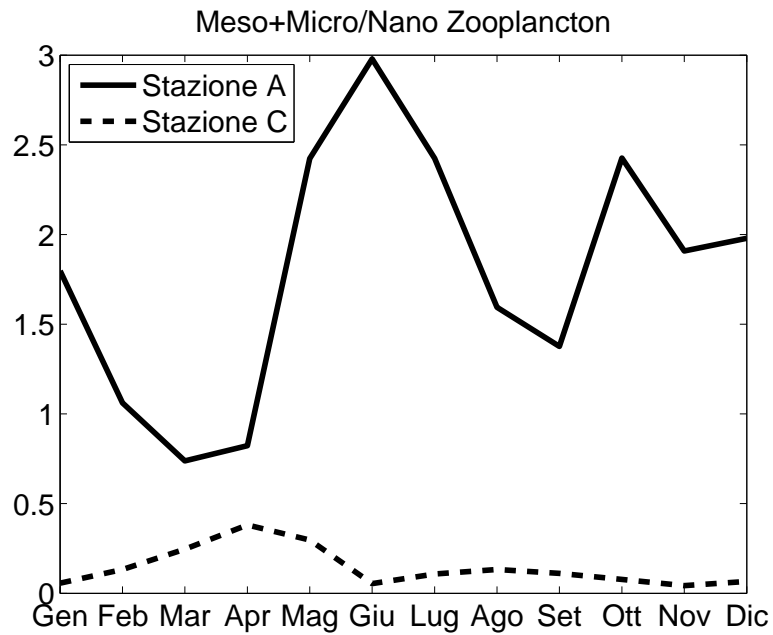


fig. 16 Variazione temporale delle componenti dello zooplancton attraverso il rapporto annuale tra gli individui zooplanctonici di taglia maggiore (Meso, Micro) e quelli di taglia minore (Nano), integrati sulla colonna d'acqua.

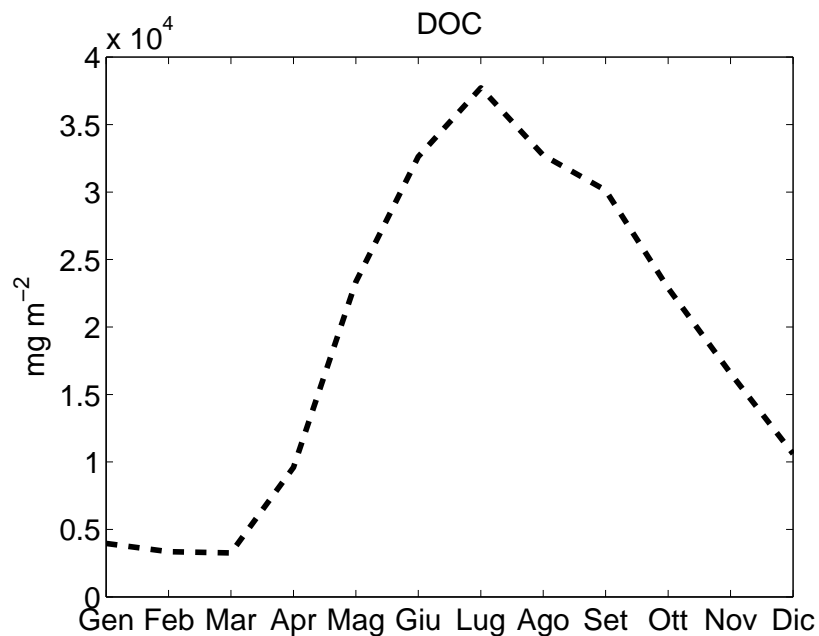


fig. 17 Andamento annuale di Carbonio Organico Disciolto integrato sulla colonna d'acqua nella **stazione C**.

5. CONCLUSIONI

L'utilizzo di un modello numerico per lo studio dei flussi di carbonio nel mare Adriatico ha portato alle seguenti conclusioni:

- Il Mar Adriatico è nel complesso una **sorgente di CO₂**
- Solamente la **zona costiera** del **Bacino Settentrionale** presenta un valore di **GPP/R > 1**
- Il rapporto **GPP/R** è influenzato dall'apporto di **DOC** associato all'ingresso delle **Acque Levantine** ma solo nel **Bacino Meridionale**
- La variabilità della **BGE** indica la presenza di diversi regimi trofici, dalla catena erbivora al "microbial loop"
- La struttura della colonna d'acqua influenza il ciclo dei produttori primari nelle stazioni al largo, mentre nella zona costiera prevale l'influenza degli apporti terrigeni.

BIBLIOGRAFIA

Artegiani A., Bregant D., Paschini E., Pinardi n., Raicich F., Russo A. (1997) vol 27 “*Adriatic Sea General Circulation. Part I: Air-Sea interactions and Water Mass Structure*” Journal of Physical Oceanography

Artegiani A., Bregant D., Paschini E., Pinardi n., Raicich F., Russo A. (1997) “*Adriatic Sea General Circulation. Part II: Baroclinic Circulation Structure*” Journal of Physical Oceanography

Del Giorgio PA, Cole JJ (1998) “*Bacterial Growth Efficiency in natural aquatic systems*” 503-541 Annu Rev Ecol Syst

Giani M., Boldrin A., Matteucci G., Frasari F., Gismondi M., Rabitti S. (2001) “*Downward fluxes of particulate carbon, nitrogen and phosphorus in the north-western Adriatic Sea*” The Science of the Total Environment

Gonzales N., Anadòn R., maranòn E., (2002) 21-30 vol 233 “*Large-scale variability of planktonic net community metabolism in the Atlantic ocean: importance of temporal changes in oligotrophic subtropical waters*” Marine Ecology progress Series

Barale V., Schiller C., Tacchi R., Marechal C. (2005) 68-81 “*Trends and interactions of physical and bio-geo-chemical features in Adriatic Sea as derived from satellite observations*” Science of the Total Environment

La Ferla R., Azzaro F., Azzaro F., Azzaro M., Casuro G., Dicembrini F., Leopardi M., Maimone G., Ponticelli L.S., Raffa F., Santinelli C., Zaccone R., Ribera d'Alcalà M. (2005) 146-166 "*Microbial contribution to carbon biochemistry in the Central Mediterranean Sea: variabilità of activities and biomass*" Journal of Marine Systems

La Ferla R., Azzaro M., Maimone G. (2006) 1-9 "*Microbial respiration and trophic regimes in the Northern Adriatic Sea (Mediterranean Sea)*" Estuarine Coastal and Shelf Science

Polimene L., Allen J.I., Zavatarelli M. (2006) 127-138 vol 43 "*model of interactions between dissolved organic carbon and bacteria in marine systems*" Aquatic Microbial Ecology

Polimene L., Pinardi N., Zavatarelli M., Coltella S. (2006) "*The Adriatic Sea Ecosystem seasonal cycle: validation of a three dimensional numerical model*" in stampa.

Pugnetti A., Armeni M., Camatti E., Crevatin E., Dell'Anno A., Del Negro P., Milandri Anna., Socal G., Fonda Umani S., Danovaro R. (2005) 162-177 "*Imbalance between phytoplanktonic production and bacterial carbon demand in relation to mucilage formation in the northern Adriatic Sea*" Science of the Total Environment

Siegel D.A., Doney S.C., Yoder J.A. (2002) *“The North Atlantic Spring Phytoplankton Bloom and Sverdrup’s Critical Depth Hypothesis”* vol 296
Science

Sverdrup H. (1953) *“On conditions for the vernal blooming of phytoplankton blooms”* J. Cons. Perm. Int. Exp. Mer, 18,287-295.

Zavatarelli M., Baretta J.W., Baretta-Bekker J.G., Pinardi N. (2000) 937-970
“The dynamics of the Adriatic Sea ecosystem. An idealized model study”
Deep-Sea Reserarch Part I

Zavatarelli M., Racich F., Bregant D., Russo A., Artegiani A. (1998) 227-263
“Climatological biogeochemical characteristics of Adriatic Sea” Journal of
Marine Systems