Atti Associazione Italiana Oceanologia Limnologia, 13 (2), pp. 249-258, luglio 2000

DISTRIBUZIONE DELLA CLOROFILLA NELLA POLYNYA DI BAIA TERRA NOVA (MARE DI ROSS) DURANTE L'ESTATE AUSTRALE 1997-98

Cinzia DE VITTOR, Marina CABRIMI, Erica CREVATIN, Serena FONDA UMANI

Laboratorio di Biologia Marina, Via August Piccarci, 54, 34010 Trieste

ABSTRACT

During the XIIIth ITALIANTARTIDE Expedition (austral summer 1997/98) size-fractionated chlorophyll *a* was measured in the Terra Nova Bay Polynya. The sampling periods were: early December 1997, beginning and end of February 1998. The results point out the presence of a clear temporal and spatial phytoplankton biomass pattern in the study area. In December, the surface values of chlorophyll *a* ranged from 0.44 μgL^{-1} to 2.22 μgL^{-1}. The highest contribution was generally given by the >10 µm size fraction, except in an intermediate station where the <10 µm size fraction determined nearly the total chlorophyll concentration, due to a relevant percentage of Prymnesiophyceae.

At the beginning of February the surface values were more homogeneous (≈ 2 μgL^{-1}) and higher concentrations were found deeper, as compared to December. During this period a bloom of a small diatom species *(Fragilariopsis* cf *cylindrus)* was observed in the southernmost area, where the highest contribution to total chlorophyll *a* was given by the <10 µm size fraction. In late February, chlorophyll concentrations were generally >3 μgL^{-1}. At the surface, the >10 µm size fraction contribution prevailed. Smaller size fractions contributed more significantly at subsurface depths. Over the whole study period, the <2 µm size fraction concentrations were extremely low.

RIASSUNTO

Durante la XIII spedizione italiana in Antartide (estate australe 1997/98) è stata analizzala la distribuzione della clorofilla *a* frazionata nell'area di polynya di Baia Terra Nova in tre momenti successivi: inizio dicembre '97, inizio e fine febbraio '98. In dicembre i valori superficiali della clorofilla variano da 0.44 μgL^{-1} a 2.22 μgL^{-1} e il contributo più importante è fornito dalle frazioni superiori ai 10 µm, con l'unica eccezione di una stazione intermedia dove l'alta percentuale di primnesioficee determina la prevalenza della frazione inferiore ai 10 µm. Agli inizi di febbraio i valori superficiali si aggirano tutti intorno ai 2 μgL^{-1} raggiungendo concentrazioni anche più elevate alle quote subsuperficiali o profonde. Il massimo contributo alla clorofilla totale, soprattutto nella stazione più meridionale, è dato dalla frazione inferiore a 10 µm ed è probabil-

mente correlabile all'intensa fioritura, sostenuta da una diatonica di piccole dimensioni, appartenente al genere *Fragilariopsis.* Alla fine di febbraio la biomassa autotrofa raggiunge le concentrazioni più elevate, superando i 3 μgL^{-1} nelle quote superficiali, dove il contributo della frazione superiore ai 10 µm è generalmente più consistente. Alle quote subsuperficiali anche le frazioni di dimensione inferiore sono ben rappresentate.

Durante tutto il periodo considerato sono sempre state osservate basse concentrazioni della frazione inferiore ai 2 µm.

1. INTRODUZIONE

La formazione della polynya nel Mare di Ross (area di ghiaccio sottile e di acque libere, circondata dal pack ice), è un fenomeno stagionale determinato dai forti venti catabatici provenienti dal "plateau" continentale (Bates *et al.,* 1998); ha origine a nord del Ross Ice Shelf ed espandendosi rapidamente in ampiezza in novembre, va a costituire la più ampia polynya della regione. Una polynya di più piccole dimensioni, che persiste per buona parte dell'inverno, si sviluppa in Baia Terra Nova a nord della lingua di ghiaccio del Drygalski (Arrigo *et al.,* 1998).

Le zone di polynya sono caratterizzate da intense fioriture fitoplanctoniche e rappresentano una delle aree più produttive dell'oceano Antartico (Smith & Gordon, 1997). Durante la primavera e l'estate, l'introduzione di una gran quantità di acqua a bassa salinità e ad elevato tenore di nutrienti, derivante dallo scioglimento dei ghiacci, e l'adeguata radiazione luminosa (Park *et al.,* 1999), garantiscono un'ottimale crescita del fitoplancton (Smith & Gordon, 1997). Le prime fioriture fitoplanctoniche tardo primaverili/estive possono raggiungere notevole intensità e persistere per un lungo periodo (Arrigo & McClain, 1994); inizialmente sono caratterizzate dalla prevalenza della comunità microfitoplanctonica a cui succedono organismi appartenenti alla classe dimensionale inferiore (nanoplancton) (Saggiomo *et al,* 1998), il picofitoplancton è invece scarsamente rappresentato (Vanucci & Bruni, 1997 e 1999).

La fioritura di *Phaeocystis* è un evento comune all'inizio dell'estate australe (Putt *et al,* 1994; Marino & Cabrini, 1997; Saggiomo *et al,* 1998; Carlson *et al,* 1998). Tale fioritura è successivamente sostituita da comunità di diatomee che iniziano la loro intensa crescita in tardo dicembre - inizio gennaio (Smith *et al.,* 1998). L'evoluzione spazio-temporale dei popolamenti fitoplanctonici provoca brusche variazioni di biomassa soprattutto nel periodo tardo estivo (Lazzara & Nuccio, 1994; Holm-Hansen, 1997). La struttura delle classi dimensionali così come le morfologie dominanti, sono l'espressione quantitativa dell'adattamento di differenti organismi ad un determinato ambiente (Rodriguez & Guerrero, 1994). In relazione quindi allo studio dell'evoluzione spazio-temporale del fitoplancton antartico nella polynya di Baia Terra Nova, l'analisi della clorofilla *a* frazionata è importante per valutare il contributo dei diversi compartimenti pico-, nano-, e microfitoplanctonici nelle fluttuazioni della biomassa che caratterizzano l'estate australe.

2. MATERIALI E METODI

Durante la XIII spedizione nazionale di ricerche in Antartide, svoltasi dal 16 ottobre '97 al 7 marzo '98, è stata condotta, nell'ambito del progetto CLIMA, una campagna oceanografica nel Mare di Ross a bordo della N/O Italica. Il campionamento in arca di polynya di Baia Terra Nova è stato eseguito in tre momenti successivi: inizio dicembre '97 (stazioni 2, 4, 9, 11); inizio febbraio '98 (stazioni 132, 133, 135, 148) e fine febbraio '98 (stazioni 213, 214, 215, 216) (Fig.l).

I campioni sono stati raccolti utilizzando un campionatore Sea Bird Electronics SBE 32 Carousel equipaggiato con 24 bottiglie Niskin da 12 litri ed accoppiato ad una sonda CTD multiparametrica (Sea Bird Electronics SBE 9/11). In ogni stazione sono stati prelevati campioni d'acqua a quote stabilite sulla base delle caratteristiche idrologiche della colonna.

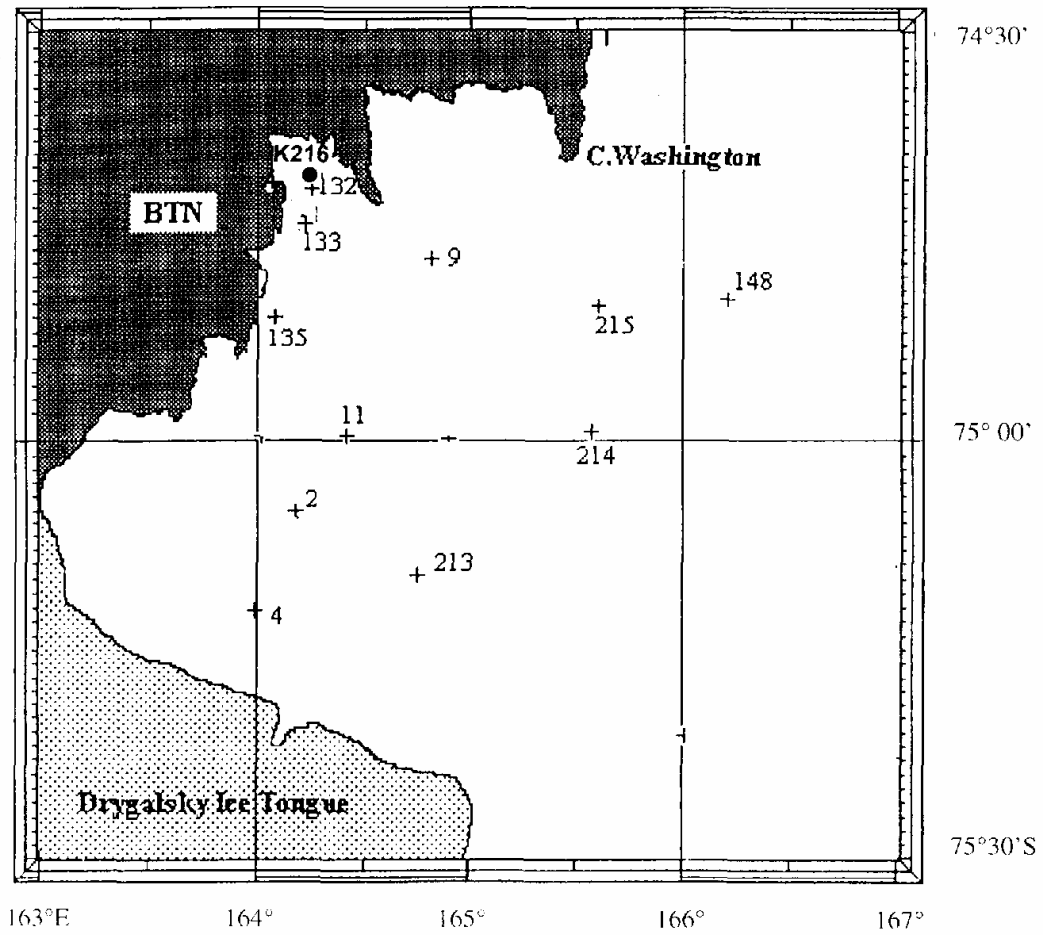

Fig. 1 – Ubicazione delle stazioni di campionamento.

Per l'analisi frazionata dei pigmenti fotosintetici aliquote pari a 500 mL di subcampione sono state filtrate su membrane in policarbonato (Nuclepore) di porosità pari a 10 e 2 µm e successivamente su filtri in fibra di vetro Whatman GF/F (porosità nominale 0.7 µm). I filtri sono stati conservati a -20°C fino al momento delle analisi in laboratorio. L'analisi spettrofluorimetrica è stata condotta su estratto acetonico utilizzando uno spcttrofluorimetro PERKIN ELMER LS 50 B. I feopigmenti sono stati determinati negli stessi campioni previa acidificazione con HCl 1N; la lettura spettrofluorimetrica è stata eseguita alla stessa lunghezza d'onda della clorofilla *a* (Panella & Magazzù, 1978; Lorenzen & Jeffrey, 1980).

Aliquote pari a 250 mL di campione sono state fissate in formalina tamponata con esametilentetramina (concentrazione finale 4%). L'analisi microscopica quali-quantitativa del popolamento fitoplanctonico è stata condotta secondo il metodo di Utermöhl (1958), modificato da Zingone *et al.* (1990).

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

L'analisi dei pigmenti fotosintetici ha evidenziato un'ampia variabilità spazio-temporale nella distribuzione ed abbondanza dei popolamenti fitoplanctonici, peraltro già documentata da diversi autori, sia nella polynya del Mare di Ross (Arrigo *et al.,* 1998; Lazzara & Nuccio, 1994: Smith & Gordon, 1997), che in quella di Baia Terra Nova (Arrigo *et al.,* 1998; Fabiano *et al.,* 1997; Innamorati *et al.,* 1992).

Nella Fig. 2 sono illustrati i profili verticali delle concentrazioni di clorofilla *a* nei tre periodi di campionamento.

Durante il primo periodo (dicembre '97) le concentrazioni superficiali variano da un minimo di 0.44 μgL^{-1} ad un massimo di 2.22 μgL^{-1}, evidenziando un netto gradiente decrescente sud-nord dalla stazione 4 alla 9. Alle quote subsuperficiali i valori si mantengono relativamente stabili per poi diminuire bruscamente a partire dai 50 m di profondità.

All'inizio di febbraio '98 le concentrazioni superficiali di clorofilla sono pari a circa 2 μgL^{-1} sia in area costiera (stazioni: 132, 133, 135) che più al largo (stazione 148). Valori più elevati si riscontrano alle quote subsuperficiali della stazione 132 e a quella più profonda nella stazione 148. A fine febbraio la biomassa autotrofa raggiunge le concentrazioni più elevate di tutto il periodo superando i 3 μgL^{-1} nelle quote superficiali: unica eccezione è rappresentata dalla stazione 214 in cui sono state rilevate concentrazioni simili a quelle dei periodi precedenti.

La frazione inferiore a 2 µm contribuisce scarsamente alla concentrazione totale della clorofilla in dicembre ed inizio febbraio, raggiungendo raramente 0.25 μgL^{-1} (30%): a fine febbraio invece i valori sono più elevati e superano 1 μgL^{-1} (60.5%) alle quote intermedie delle stazioni 213 e 216. Le concentrazioni osservate potrebbero però non essere direttamente relazionabili alla comunità picoplanctonica. Molti organismi autotrofi appartenenti a classi dimensionali superiori presentano, infatti, una delle dimensioni inferiore a 2 µm e possono non venire trattenuti durante la filtrazione, contribuendo quindi erroneamente alla frazione picoplanctonica. Secondo Jacques e Panouse (1991) inoltre questa frazione potrebbe essere inclusiva di frammenti di cellule

più grandi, artefatto della filtrazione, o di cloroplasti liberi (Gieskes & Elbrachter, 1986). E' quindi possibile che, dall'analisi della clorofilla frazionata, il contributo del picofitoplancton alla biomassa totale, risulti sovrastimato. Le osservazioni in microscopia a fluorescenza sembrano confermare questa ipotesi, evidenziando popolamenti picofitoplanctonici decisamente esigui (Paola Del Negro, comunicazione personale). Anche Vanucci e Bruni (1998) riportano che la comunità autotrofa di dimensioni inferiori a 2 µm in Antartide è praticamente assente, mentre sono abbondanti organismi di 2-3 µm, suggerendo quindi, che una piccola differenza dimensionale può essere cruciale in termini competitivi.

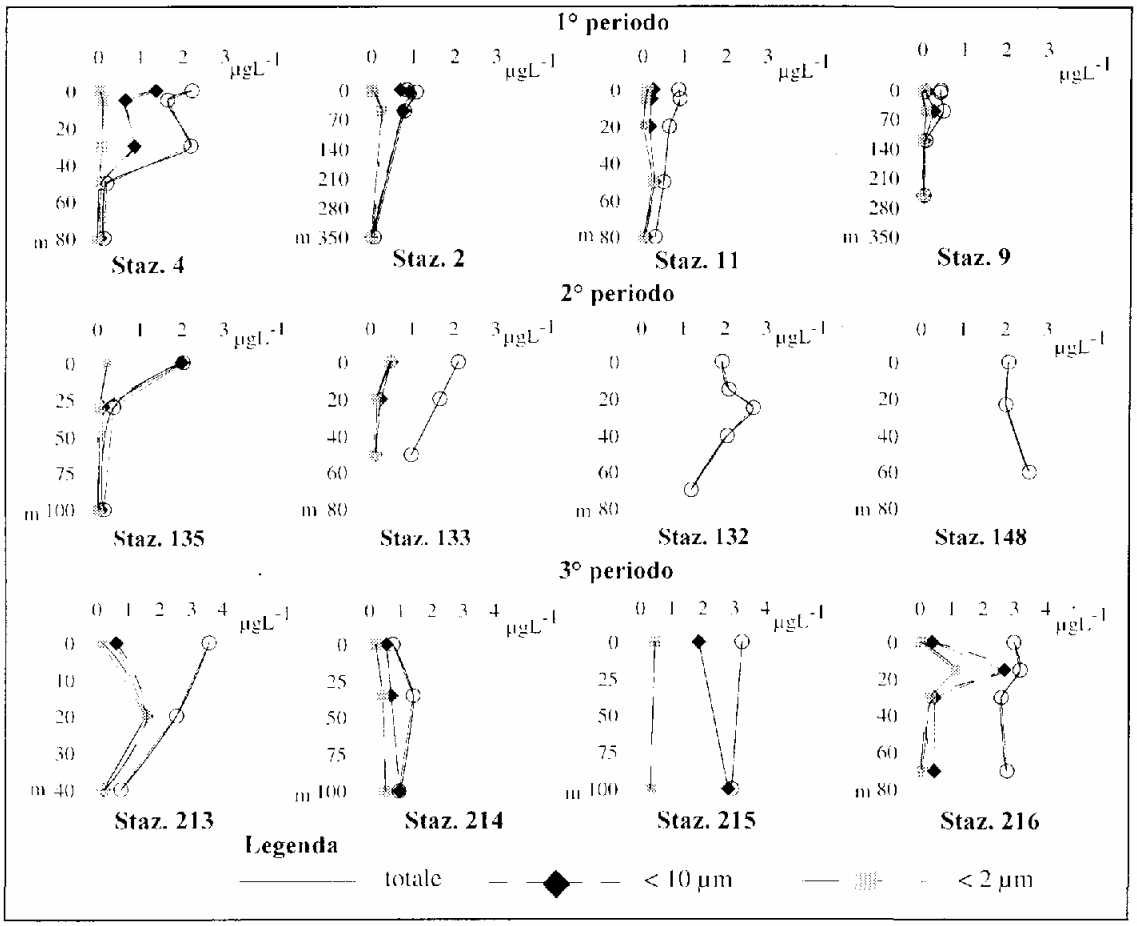

Fig. 2 -Clorofilla *a* durante i tre periodi di campionamento

Le frazioni inferiori e superiori a 10 µm contribuiscono in modo variabile alla biomassa totale in relazione al periodo ed alla localizzazione spaziale della stazione considerata. Agli inizi di dicembre, ad esempio, nella stazione 2 la biomassa è principalmente costituita dalla frazione inferiore a 10 µm ed infatti, in questa stazione, è stata rilevata la dominanza di piccole primnesioficee. Nella stazione 4 la concentrazione totale e quasi equamente ripartita tra la frazione inferiore e quella superiore ai 10 µm. In

corrispondenza ai due massimi registrati in superficie e a 30 m di profondità, sono state riscontrate elevate abbondanze di *Phaeocystis* cf. *antartica,* organismo flagellato di dimensioni comprese tra 4 e 8 µm, presente anche nella sua fase palmelloide, che può raggiungere 1.5-2 mm (Marino & Cabrini, 1997).

Nelle stazioni 9 e 11 prevale la frazione superiore ai 10 µm: le specie dominanti risultano *Fragilariopsis curta, F. kerguelensis, Thalassiosira gravida* e *T. decipiens.*

Durante il secondo periodo di campionamento l'aumento di biomassa (valori superficiali di circa 2 μgL^{-1} e subsuperficiali prossimi ai 3 μgL^{-1}) è dovuto essenzialmente all'incremento numerico delle diatomee. Nella stazione 132 il picco di clorofilla evidenziato a 25 m corrisponde alla più elevata abbondanza microfitoplanctonica sostenuta da organismi appartenenti al genere *Fragilariopsis.* Nella stazione 133 la concentrazione di clorofilla decresce linearmente dalla superficie al fondo, analogamente alle abbondanze del fitoplancton, rappresentato quasi interamente da diatomee, nella 135 invece il decremento è brusco ed il maggior contributo alla biomassa totale sembra essere fornito dalla frazione inferiore a 10 µm. La comunità fitoplanctonica. in questo caso, è costituita per il 90% dalla specie *Fragilariopsis* cf *cylindrus,* che può presentare dimensioni comprese tra 3 e 10 µm. Nell'area circostante questa stazione è stata osservata un'intensa fioritura di questa specie che, inglobata nel ghiaccio di nuova formazione, lo ha colorato di rosso brunastro (Cabrini & Cataletto, nello stesso volume). Anche nella stazione 148 la comunità fitoplanctonica è rappresentata da diatomee, l'andamento della concentrazione di clorofilla è però crescente dalla superficie verso i 60 m di profondità, dove raggiunge il suo valore massimo.

Nell'ultimo periodo di campionamento, alla fine di febbraio, le più elevate biomasse sono sostenute dalla frazione superiore ai 10 uni nelle quote superficiali delle stazioni 213 e 216 e le specie dominanti sono *Fragilariopsis curia* e *F. kerguelensis.* La componente inferiore ai 10 µm, costituita da piccoli flagellati, contribuisce per il 43.2% alla quota superficiale e per l'84.7% a quella profonda nella stazione 215. Anche nella stazione 216 il picco di clorofilla (18 m) è dovuto in parte a questa componente (49.2%) oltre che a quella inferiore a 2 uni (35%). Il massimo contributo della frazione inferiore ai 2 µm (60.5%) si registra nella stazione 213 alla profondità di 20 m.

Sulla base delle osservazioni eseguite in microscopia a fluorescenza questa frazione sembra essere sostenuta da nanoplancton di piccole dimensioni (3-5 x 2 µm) che per i motivi .sopracitati non è stato trattenuto durante la filtrazione ed ha quindi contribuito ad aumentare i valori di concentrazione rilevati per la frazione inferiore ai 2 µm.

Nel nostro studio le concentrazioni di clorofilla più elevate si riscontrano nell'ultimo periodo di campionamento (fine febbraio) con valori che raggiungono e talvolta superano i 3 μgL^{-1} a differenza di quanto riportato da Smith *et al.* (1998) per la polynya del Mare di Ross. Secondo questi autori la più elevata biomassa e la massima produzione vengono raggiunte subito dopo lo scioglimento completo del ghiaccio e/o il suo movimento verso Nord (metà - fine dicembre). Il bloom decresce in estensione ed intensità in gennaio, e le concentrazioni di clorofilla sono uguali o inferiori a 1 μgL^{-1} in febbraio.

Il primo campionamento eseguito in questo studio corrisponde, però, agli inizi di dicembre, quando la fioritura non aveva probabilmente ancora raggiunto la sua massi-

ma intensità, mentre l'elevata biomassa registrata a fine febbraio era sostenuta sia dalla componente microfitoplanctonica. alla fine della sua fioritura, sia da quella nano-planctonica caratteristica del periodo tardo estivo, già evidenziata in Baia Terra Nova (Innamorati *et al.* 1992).

Il rapporto feopigmenti/clorofilla *a* (Phaeo/Chl *a)* in dicembre risulta, infatti, abbastanza basso con una media geometrica di 0.66 ± 0.29, indicando una fioritura recente. Tale rapporto aumenta fino a 1.36 ± 0.40 all'inizio di febbraio e poi diminuisce leggermente a fine febbraio (Phaeo/Chl *a* = 1.10 ± 0.19). Il marcato aumento del rapporto Phaeo/Chl *a* potrebbe derivare dall'incremento dell'attività di grazing che influenza anche la struttura dimensionale della comunità fitoplanctonica (Saggiomo *et al.* 1998).

Le regressioni ortogonali tra feopigmenti e clorofilla *a,* considerando tutte le frazioni (Fig. 3), confermano la differenza dei popolamenti nei tre momenti studiati. Le tre rette di regressione presentano pendenze simili, vicine all'unità, ma le intercette con l'asse delle ordinate sono differenti ad indicare che i rapporti tra le grandezze lineari sono diversi (Lazzara & Nuccio, 1992).

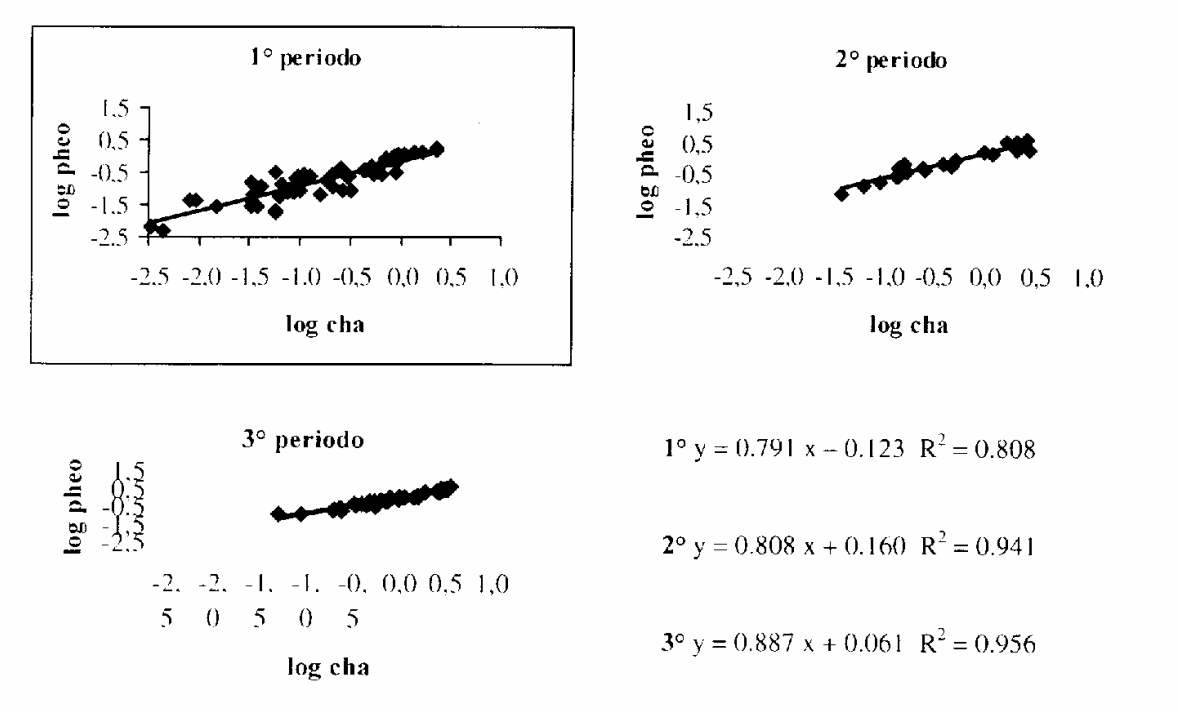

Fig. 3 - Regressioni ortogonali tra clorofilla *a* e feopigmenti.

Il test di Wilcoxon-Mann-Whitney eseguito sulla clorofilla *a* totale e sul rapporto $Phaeo_{tot}/Chl.a_{tot}$. dimostra infatti che la probabilità che le tre situazioni studiate siano diverse è superiore al 96% (Tab. 1).

Tab. 1 - Risultati del test di Wilcoxon-Mann-Whitney.

Periodi	1°-2°	1°-3°	2°-3°
Clorofilla tot.	$p \leq 0.003$	$p \leq 0.001$	$p \leq 0.038$
$Phaeo_{to}$,/$Chl.a_{tot}$.	$p \leq 0.001$	$p \leq 0.001$	$p \leq 0.025$

In conclusione durante la campagna oceanografica 97/98, la determinazione della concentrazione di clorofilla *a* nelle diverse frazioni, supportata dalle osservazioni microscopiche eseguite sulla comunità fitoplanctonica, ha permesso di individuare la dinamica spazio-temporale del popolamento planctonico fototrofo durante l'estate australe nella polynya di Baia Terra Nova. In dicembre è stata osservata la fase iniziale della fioritura a *Phaeocystis.* Ad inizio febbraio, la biomassa fitoplanctonica è sostenuta da diatomee, che solitamente iniziano la loro fioritura a fine dicembre - inizio gennaio. In questo caso, visto l'elevato rapporto Phaeo/Chl *a*, il bloom è stato osservato nella sua fase terminale. Nell'ultimo periodo, infine, il popolamento si diversifica e le componenti di dimensione inferiore assumono maggiore importanza.

In Fig. 4 viene evidenziato l'aumento di concentrazione della clorofilla *a* che si verifica passando da dicembre a fine febbraio e la progressiva stabilizzazione dei popolamenti confermata dalla limitata variabilità rilevata nei rapporti Pheo/chl *a* dell'ultimo periodo.

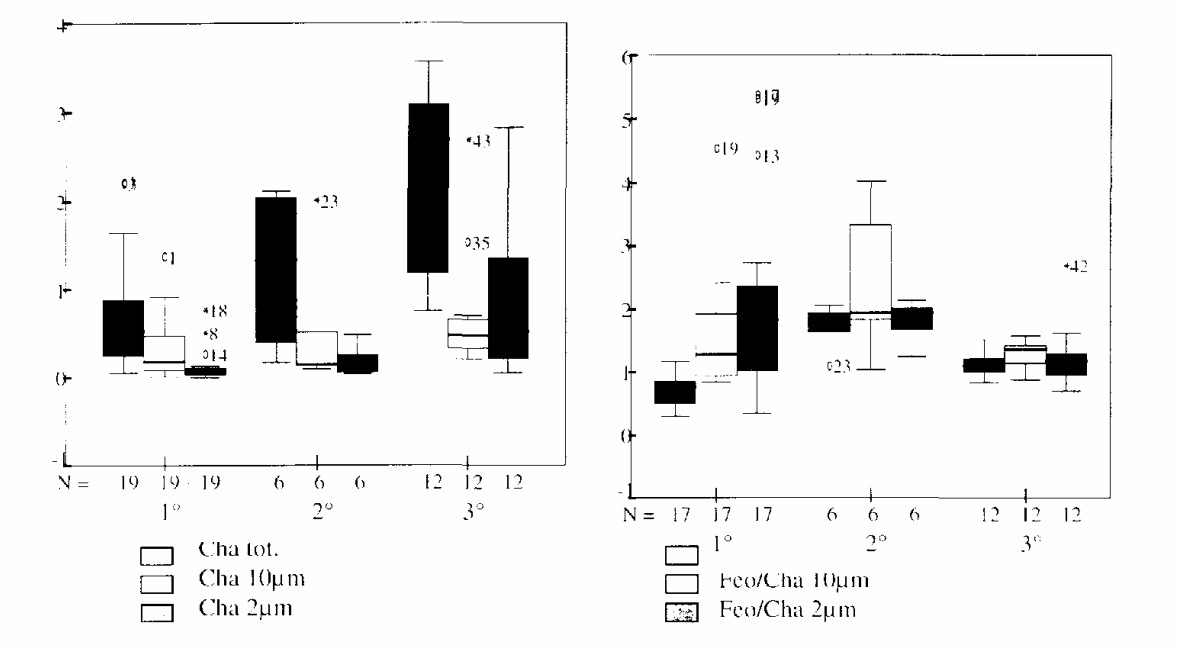

Fig. 4 - Buxplots della clorofilla *a* totale e frazionata (<10 µm e < 2 µm) e dei relativi rapporti con i feopigmenti (Phaco/Chl *a*) nei tre periodi di campionamento

RINGRAZIAMENTI

Questa ricerca è stata svolta nell'ambito del Progetto Nazionale di Ricerca in Antartide (PRNA), sottoprogetto CLIMA.

Gli autori desiderano ringraziare il comandante, l'equipaggio ed i tecnici di bordo della N/O Italica per la disponibilità dimostrata durante lo svolgimento della campagna oceanografica, la dott.ssa Paola Del Negro per le informazioni relative al popolamento picofitoplanctonico e i referees anonimi per la revisione critica del lavoro.

BIBLIOGRAFIA

Arrigo K.R. & McClain C.R. 1994. Spring phytoplankton production in the Western Ross Sea. *Science,* 266: 261-263.

Arrigo K.R., Weiss A.M. & Smith W.O.Jr. 1998. Physical forcing of phytoplankton dynamics in the southwestern Ross Sea. *J. Geophys. Res.,* 103: 1007-1021.

Bates N.R., Hansell D.A., Carlson C.A. & Gordon L.I. 1998. Distribution of CO_2 species, estimates of net community production, and air-sea CO2 exchange in the Ross Sea polynya.*J. Geophys. Res.,* 103: 2883-2896.

Cabrini M. & Cataletto B. 2000. Fioritura di diatomee nel Mare di Ross nell'estate australe 1998. *Atti A.I.O.L,* XIII, 2: (stesso volume).

Carlson C.A., Ducklow H.W., Hansell D.A. & Smith W.O.Jr 1998. Organic carbon partitioning during spring phytoplankton blooms in the Ross Sea polynya and Sargasso Sea. *Limnol. Oceanogr.,* 43: 375-386.

Fabiano M, Chiantore M.. Povero P., Cattaneo-Vietti R., Pusceddu A., Misic C. & Albertelli G. 1997. Short-term variations in particulate mailer flux in Terra Nova Bay, Ross Sea. *Antarctic Science, 9:* 143-149.

Gieskes W.W.C. & Elbrachter M. 1986. Abundance of nanoplankton-size-chlorophyll-containing particles caused by diatom disruption in surface waters of the Southern Ocean (Antarctic Peninsula region). *Nether. J. Sea Res..* 20: 291-303.

Holm-Hansen O. 1997. Variability of Phytoplankton Distribution in Antarctic Waters. *Kovean J. Palar Res.,* 8: 29-34.

Innamorati M., Lazzara L., Mori G., Nuccio C. & Saggiomo V. 1992. Spatial and temporal distributions of phytoplankton size fractions in Antarctic waters: biomass and production, summer 1989/90. *Atti del IX Congr. Ass. Ital. Oceanol Limnol.,* S. Margherita Ligure, 20-23 novembre 1990: 605-612.

Jacques G. & Panouse M. 1991. Biomass and composition of size fractionated phytoplankton in the Weddell - Scotia Confluence area. *Polar Biol.,* 11: 315-328.

Luzzara L. & Nuccio C. 1994. Relazioni ira particellato, biomassa e popolamenti fitoplanctonici nel Mare di Ross durante la fioritura estiva. *Atti del X Congr. Ass. Ital. Oceanol. Limnol.,* Alassio. 4-6 novembre 1992: 655-665.

Lorenzen C.J. & Jeffrey S. 1980. Determination of chlorophyll in seawater. SCOR-UNESCO, *Technical Papers in Marine Science,* 35: 1-20.

Marino D. & Cabrini M. 1997. Distribution and succession of phytoplankton populations in the Ross Sea (Anlarctica) during the austral spring 1994. Nat. Prog. Ant. Res. ROSSMIZE 93-95. Data Report (Faranda F.M., Guglielmo L. & Povero P. eds.): 307-341.

Panella S. & Magazzù G. 1978. Analisi dei pigmenti fitoplanctonici. In: Metodi per lo Studio del Plancton e della Produzione Primaria (Magazzù G. ed.), Edizioni GM: 19-33.

Park M.G., Yang S.R., Kang S.-H, Chung K.H. & Shim J.H. 1999. Phytoplankton biomass and primary production in the marginal ice zone of the north-western Weddell Sea during austral summer. *Palar Biol.*, 21: 25 1 -261.

Putt M., Miceli G. & Stoeckcr D.K. 1994. Association of bacteria with *Phaeocystis* sp. in McMurdo Sound, Antarctica. *Mar. Ecol. Prog. Ser.,* 105: 179-189.

Rodriguez V. & Guerrero F.J. 1994. Chlorophyll *a* of size fractionated Summer Phytoplankton blooms at a Coastal Station in Màlaga Bay, Alboran Sea. *Estuar. Coast Shelf Sci.,* 39: 413-419.

Saggiomo V., Carrada G.C., Mangoni O., Ribera d'Alcalà M. & Russo A. 1998. Spatial and temporal variability of size-fractionated biomass and primary production in Ross Sea (Antarctica) during austral spring and summer. *J. Mar. System,* 17: 115-127.

Smith W.O.Jr., Carlson C.A., Ducklow H.W. & Hansell D.A. 1998. Growth dynamics of *Phaeocystis Antarctica-dominated* plankton assemblages from the Ross Sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.,* 168: 229-244.

Smith W.O.Jr. & Gordon L.I. 1997. Hyperproductivity of the Ross Sea (Antarctica) polynya during austral spring. *Geophys. Rex. Lett., 24:* 233-236.

Ulermöhl H. 1958. Zur Vervolkommung der quantitativen phytoplankton. Method Mitt. Int. Ver. Their. *Angev. Limnol.* 9: 1-38.

Vanucci S. & Bruni V. 1997. Nanoplankton and picoplankton in the Ross Sea. Nat. Prog. Ant. Res. ROSSMIZE 93-95. Data Report. (Faranda F.M., Guglielmo L. & Povero P. eds.): 343-359.

Vanucci S. & Bruni V. 1998. Presence or absence of picophytoplankton in the western Ross Sea during spring 1994: a mailer of size definition? *Polar Biol.,* 20: 9-13.

Vanucci S. & Bruni V. 1999. Ultra phytoplanktonic community structure in the Ross Sea during the austral spring 1994. Ross Sea Ecology -Italiantartide Expeditions 1987-1995 (Faranda F.M., Guglielmo L. & lanora A. eds.). Springer-Verlag: 181-193.

Zingone A., Honsell G., Marino D.. Montresor M. & Socal G. 1990. Fitoplancton. *Nova Thalassia,* 11: 183-198.

Lavoro presentato al XIII Congresso A. I. O. L, Portonovo (Ancona), 28-30 settembre 1998

Atti Associazione Italiana Oceanologia Limnologia, 13 (2), pp. 259-268, luglio 2000

INFLUENZA DEL GRAZING MESOZOOPLANCTONICO SUI FLUSSI DI SEDIMENTAZIONE NEL MARE DI ROSS MERIDIONALE: RISULTATI OTTENUTI DA TRAPPOLE PER SEDIMENTI

Alessandra ACCORNERO[1], Sergio TUCCI[2], André MONACO[3]

[1] Istituto di Meteorologia ed Oceanografìa, Istituto Universitario Navale, Napoli, Italia
[2] DIP.TE.RIS., Università di Genova, Genova, Italia
[3] CE.F.R.E.M., Université de Perpignan, Perpignan, Francia

ABSTRACT

In many areas of the Southern Ocean, the production and sinking of mesozooplankton *fecal pellets* is a dominant component of the gravitational flux of both organic and siliceous material to depth. Sediment trap results from the Ross Sea show that fecal material can contribute up to 70% of the mass flux, indicating that mesozooplankton grazing/*fecal pellet* production is an important process regulating carbon flux from the euphotic zone. In the framework of the C.L.I.M.A. Project, a time-series sediment trap has been moored at 423 m depth near the Ross Ice Shelf (Southern-central Ross Sea) during 1995. In this paper we describe the flux of *fecal pellets* in that location, its quantitative and qualitative variations throughout the year, and finally we discuss the importance of grazing in affecting the downward transport of particulate matter.

RIASSUNTO

Nell'Oceano Meridionale, i *fecal pellets* rappresentano uno dei principali meccanismi di trasferimento del carbonio organico e della silice biogenica dalla zona eufotica agli strati profondi. Nel Mare di Ross risultati ottenuti tramite trappole per sedimenti hanno evidenziato che il materiale fecale può contribuire tino al 70% del flusso di massa totale, suggerendo che il *grazing* zooplanctonico, e la conseguente produzione di *fecal pellets,* è un processo che può influenzare in maniera significativa l'esportazione di POC dallo strato superficiale della colonna d'acqua. Nell'ambito del Progetto C.L.I.M.A. (Climatic Long-term Interactions for the Mass balance in Antarctica), una linea di ormeggio con trappole per sedimenti e strumentazione oceanografica è rimasta ancorata nel Mare di Ross centro-meridionale, in prossimità del Ross Ice Shelf, dal Gennaio 1995 al Gennaio 1996. Questo studio è focalizzato sui flussi di *fecal pellets,* misurati tramite trappole per sedimenti, e sul loro contributo al flusso totale durante l'anno di osservazione. Vengono descritte le principali categorie di *pellets* osservate, i relativi tassi di sedimentazione e la loro evoluzione nel corso dell'anno;

viene infine discussa l'importanza del *grazing* zooplanctonico come fattore di controllo sul trasporto verticale di materiale particellato.

1. INTRODUZIONE

Studi condotti nell'ultimo decennio hanno evidenziato l'importanza della "pompa biologica" nel ciclo marino del carbonio e le sue implicazioni per i cicli biogeochimici globali ed il clima (Legendre & Le Fèvre, 1991; Walsh, 1991). Il carbonio biogenico può essere trasferito dalla zona eufotica, dove viene prodotto, alle acque profonde, sotto forma di carbonio organico disciolto (DOC), tramite meccanismi di convezione, o particellato (POC), tramite la sedimentazione di particelle biogeniche.

I *fecal pellets* sono tra i costituenti biogenici principali del flussi di sedimentarione (Fowler & Knauer, 1986). Nell'Oceano Meridionale essi rappresentano uno dei più importanti meccanismi di trasferimento di carbonio organico e silice biogenica agli strati profondi (Fischer *et al.,* 1988). Nel Mare di Ross risultati ottenuti tramite trappole per sedimenti hanno evidenziato che il materiale fecale può contribuire fino al 70% del flusso di massa totale, suggerendo che il *grazing* zooplanctonico, e la conseguente produzione di *fecal pellets. è* un processo che può influenzare in maniera significativa l'esportazione di POC dallo strato superficiale della colonna d'acqua (Dunbar *et al.,* 1998). Smith & Dunbar (1998) hanno rilevato forti differenze quantitative e temporali tra i flussi di materiale fecale nelle regioni centrale ed occidentale del Mare di Ross meridionale. Il nostro studio è fecalizzato sui flussi di *fecal pellets,* misurati tramite trappole per sedimenti, nell'area centro-meridionale del Mare di Ross, in prossimità del Ross Ice Shelf, dal Gennaio 1995 al Gennaio 1996. Nel presente articolo vengono descritte le principali categorie di *fecal pellets* osservate, i relativi tassi di sedimentazione e la variabilità temporale nel corso dell'anno; viene infine discussa l'importanza del *grazing* zooplanctonico come fattore di controllo sul trasporto verticale di materiale particellato.

2. MATERIALI E METODI

Nell'ambito del progetto C.L.I.M.A. (Climatic Long-term Interactions for the Mass balance in Antarctica) una linea di ormeggio con trappole per sedimenti e strumentazione oceanografica è rimasta ancorata nel Mare di Ross centro-meridionale, in prossimità del Ross Ice Shelf, dal 28/01/1995 al 21/01/1996. Problemi tecnici impedirono purtroppo il corretto funzionamento della trappola superficiale (230 m) ed un set completo di campioni è stato recuperato soltanto dalla trappola profonda (423 m), posta a circa 180 m dal fondo, per evitare interferenze legate alla risospensione del sedimento. Ogni collettore ha raccolto il materiale in corso di sedimentazione durante un intervallo di tempo di 15 giorni.

Immediatamente dopo l'apertura del collettore, il materiale raccolto è stato esaminato in microscopia ottica ed elettronica, passato attraverso un retino da 1 mm per la rimozione degli organismi più grossi e diviso in una serie di sub-campioni omogenei, seguendo la metodica descritta da Heussner *et al.* (1990). Da due a quattro aliquote per

ciascun campione (ad eccezione dell'ultimo campione, relativo al periodo 07/01-21/01/1996, perso durante un allagamento della camera fredda) sono state utilizzate per i conteggi di *fecal pellets,* previo trasferimento in un'apposita vaschetta grigliata. Nel caso di campioni molto poveri di materiale i conteggi sono stati eseguiti sull'intero campione. 11 flusso di *fecal pellets,* espresso in numero di *pellets* per metro quadrato al giorno, è stato calcolato dividendo il numero totale di *pellets* nel campione per l'intervallo di tempo e l'area di raccolta della trappola. Tutti i *fecal pellets* sono stati classificati sulla base delle loro caratteristiche morfologiche; i primi 100 *pellets* contati (fatta eccezione, ovviamente, per i campioni dove il numero di feci raccolte, era inferiore) sono stati misurati e il loro volume calcolato applicando l'appropriata formula geometrica. Il flusso numerico è stato successivamente convertito in flusso volumetrico ($mm^3/m^2/d$), poiché *pellets* appartenenti ad una stessa categoria presentavano variazioni significative di volume da un campione all'altro.

Osservazioni in microscopia elettronica a scansione sono state condotte su *pellets* interi e sul loro contenuto; circa 5-10 *pellets* per ciascuna categoria sono stati prelevati tramite pipetta da ciascun campione, posti su un filtro Millipore e risciacquati con acqua distillata. Le osservazioni sono state condotte con un microscopio Hitachi S 520, previa liofilizzazione e successiva doratura del filtro recante i *pellets.*

3. RISULTATI

3.1. Classificazione e descrizione morfologica *dei fecal pellets*

Cinque diverse categorie di *fecal pellets* sono state identificate nei campioni della trappola in prossimità del Ross Ice Shelf.

1. Sferici. Tale classe include i *pellets* di minori dimensioni, generalmente di poche decine di µm di diametro, con alcune eccezioni intorno ai 100 µm. Tali *pellets* sono di colore marrone scuro e composti da un miscuglio di detrito planctonico di origine sia auto- che etero-trofica; il contenuto si presenta generalmente finemente triturato.

2. Ovali A. La forma caratteristica è molto simile a quella di un pallone da rugby, con una porzione centrale allargata e due estremità identiche, più piccole e affusolate. La lunghezza e la larghezza sono rispettivamente comprese negli intervalli 200-800 e 50-300 µm.

3. Ovali B. I *pellets* appartenenti a tale classe appaiono formati da due sfere di dimensioni diverse, fuse insieme a dare una forma grossolanamente ovale, ma con un'estremità più grande dell'altra. Contrariamente agli ovali di tipo A, che presentavano tutti identica forma, gli ovali B sono caratterizzati da piccole differenze. Le dimensioni variano da 270 a 550 µm per la lunghezza, e da 200 a 350 µm per la larghezza. Entrambi i tipi di ovali sono di colore bruno-verdastro, tranne pochi ovali A, che sono di un marrone molto più scuro, probabilmente dovuto all'inclusione di particelle litogeniche. Al microscopio elettronico tutti i *pellets* ovali risultavano essere costituiti essenzialmente da detrito di origine diatomacea, e in misura minore da Parmales, resti di Silicoflagellati e materiale non identificato di origine probabilmente non vegetale.

4. Ellissoidali. I *pellets* di questo tipo sono beige-giallognoli e generalmente più piccoli degli ovali precedentemente descritti (100-400 µm di lunghezza per 40-200 µm

di diametro). Sono costituiti da un corpo di forma cilindrica che termina in due estremità arrotondate, anche se in alcuni casi una delle due estremità si presenta più affusolata e termina con una piccola protuberanza membranosa (vedi la descrizione fornita da Honjo & Roman, 1978).

5. Cilindrici. Questi *pellets* si differenziano dagli altri per due caratteristiche essenziali: a) presentano una struttura più lassa e meno compatta, con aspetto più amorfo e materiale molto meno "impacchettato" all'interno del *pellet* stesso; b) nei nostri campioni essi non sono mai stati osservati come *pellets* interi, ma come frammenti di varia lunghezza (250-1600 µm) e larghezza (50-800 µm), con la membrana peritrofica aperta ad entrambe le estremità e materiale in corso di fuoriuscita attraverso queste aperture. In questi *pellets,* così come negli ellissoidali, oltre a detrito fitoplanctonico, sono stati rinvenuti numerosi frammenti di appendici di Crostacei e filamenti di origine sconosciuta.

Oltre alle classi sopra descritte, rinvenute in tutti i campioni, materiale fecale di diverso aspetto è stato osservato solo occasionalmente, e incluso in un gruppo definito *"fecalpellets* giganti" per le dimensioni comprese tra alcuni mm e 1-2 cm. Di forma approssimativamente cilindrica, tali feci presentavano un'ampia gamma di colori: dal giallognolo all' arancione brillante, al marrone scuro. Le osservazioni in microscopia elettronica a scansione hanno rivelato un contenuto in larga parte costituito da frammenti di crostacei planctonici, amalgamati in una matrice organica; in alcuni casi essi potevano contenere anche elementi interi di grosse dimensioni, quali Pteropodi ed altri *fecal pellets.* Feci di tali dimensioni sono probabilmente prodotte da zooplancton carnivoro di grossa taglia o da pesci, e non sono state quindi incluse nella discussione dei risultati, che è invece fecalizzata su materiale fecale di origine mesozooplanctonica.

3.2. Flussi di *fecal pellets* e loro evoluzione temporale

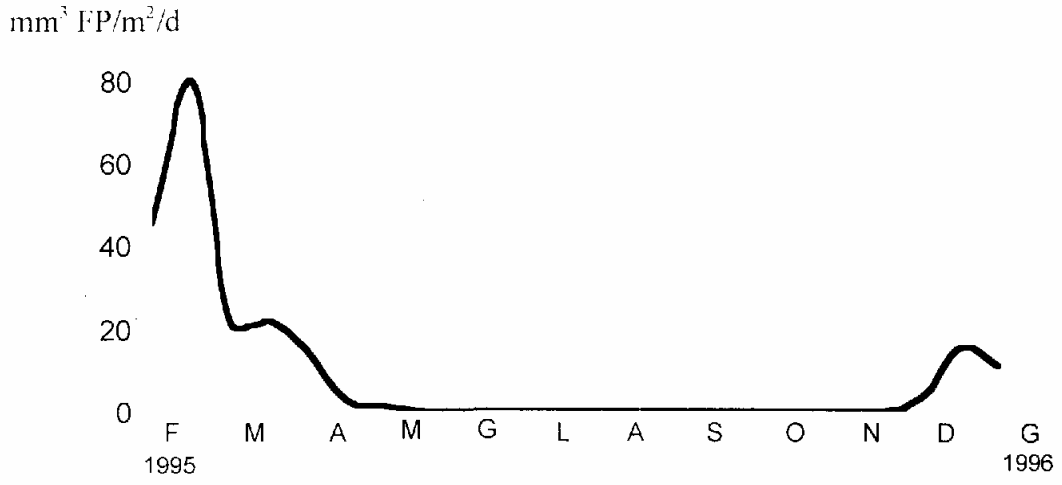

Fig. 1 - Evoluzione temporale del flusso totale di *fecal pellets*, espresso in termini volumetrici, dal 28/01/1995 al 07/01/1996.

Il volume totale di materiale fecale che sedimenta lungo la colonna d'acqua (Fig. 1) raggiunge un massimo di 80 $mm^3/m^2/d$, e presenta un'evoluzione temporale ben definita. Nel primo mese di funzionamento della trappola (28/01-28/02/1995) i tassi di sedimentazione sono i più elevati dell'intero anno di osservazione (pari a 4000-5500 *pellets/m²/d).* Nel periodo successivo la sedimentazione di feci diminuisce gradualmente, fino a raggiungere valori quasi nulli durante il lungo inverno antartico, con l'eccezione di un campione contenente un aggregato amorfo di grosse dimensioni (2,5 cm), che includeva varie decine di *pellets.* Nel Dicembre 1995 il flusso ritorna a valori significativi, che sono però di gran lunga inferiori (circa 1/5) rispetto a quelli del periodo iniziale di osservazione.

L'evoluzione temporale del contributo delle varie classi presenta differenze significative nel corso dell'anno di studio; nella Figura 3 sono rappresentati soltanto i periodi in cui il flusso di *pellets è* pari o superiore a 4 *pellets* /m^2/d, vale a dire da fine Gennaio (messa a mare della trappola) a fine Aprile e nel Dicembre e Gennaio successivi.

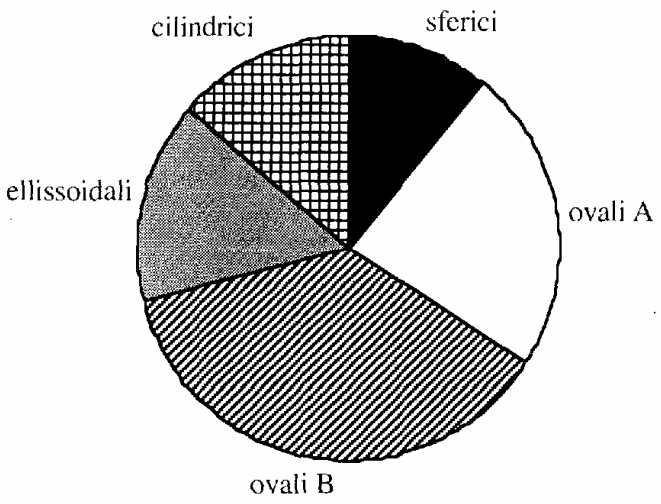

Fig. 2 - Contributo delle varie categorie *di fecal pellets* al flusso fecale annuale.

Gli ovali di tipo B sono la categoria predominante durante tutto Febbraio, mentre in seguito il loro flusso tende a diminuire con l'avvicinarsi dell'inverno australe, e si mantiene su livelli bassi anche nella tarda primavera-inizio estate dell'anno successivo. Lo stesso tipo di andamento caratterizza i *fecal pellets* ellissoidali, che portano però un contributo pari alla metà di quello degli ovali B. Ovali A, sferici e cilindrici presentano tutti un picco nel mese di Marzo, ma, mentre il contributo degli ovali A si mantiene significativo anche verso l'inizio di Maggio, per le altre due categorie il flusso si annulla. Nel Dicembre 1995 il flusso è rappresentato esclusivamente da cilindrici (54%) e ovali di tipo A (46%), mentre nel Gennaio 1996 predominano ovali B (47%) e cilindrici (31%).

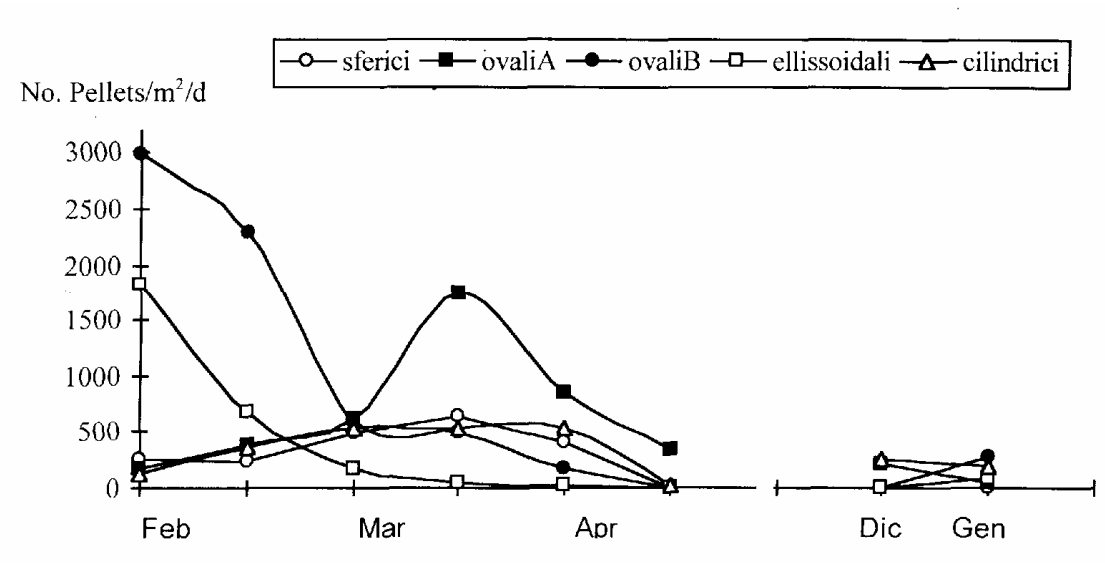

Fig. 3 - Evoluzione temporale del flusso delle diverse categorie di *fecal pellets.*

4. DISCUSSIONE

Fecal pellets ovali, cilindrici ed ellissoidali sono stati precedentemente osservati nel Mare di Ross, sia in campioni prelevati tramite retino che in trappole per sedimenti (Marino *et al.,* 1994; Jaeger *et al.,* 1996; Fabiano *et al.,* 1997; Dunbar *et al.,* 1998). *Pellets* tabulari, invece, non sono stati rinvenuti in nessuno dei nostri campioni, malgrado essi siano già stati descritti in altri siti del Mare di Ross (Jaeger *et al.,* 1996; Dunbar *et al.,* 1998). *Pellets* sferici, che costituiscono il 10% delle feci sedimentate nella nostra trappola su base annuale, non sono stati fino ad oggi osservati nell'area di studio.

In termini di flusso numerico, la sedimentazione di materiale fecale in prossimità del Ross Ice Shelf risulta inferiore rispetto ad altri siti del Mare di Ross, soprattutto se ci riferiamo ai periodi di massima produttività (Dunbar *et al.,* 1998; Accornero & Manno, dati non pubblicati), ma comparabile sia quantitativamente (numero di *pellets* che sedimentano giornalmente) sia qualitativamente (contributo delle varie categorie al flusso fecale totale) a dati ottenuti nel Mare di Weddel e di Scotia (Fischer *et al.,* 1988; Nothig & von Bodungen, 1989; Gonzàlez, 1992).

Purtroppo non è stato possibile condurre esperimenti ai fini dell'identificazione degli organismi produttori dei diversi tipi di *pellets* osservati nei campioni. Masserelle fecali di forma e dimensioni simili ai *pellets* sferici sopra descritti sono state osservate da Gowing & Silver (1985) e da Gonzàlez (1992) ed attribuite a protozoi. I *pellets* ovali, già descritti da Marino *et al.* (1994) e Fabiano *et al.* (1994) nell'area di Baia Terra Nova, sono probabilmente prodotti da Pteropodi e/o Ostracodi. *Pellets* ovali, però, sono stati anche attribuiti a Copepodi, così come gli ellissoidali (Martens, 1978; Gonzàlez *et al.,* 1994; Dunbar *et ai,* 1998). Sia Copepodi che Eufausiacei sono stati presumibilmente identificati quali organismi produttori di feci cilindriche (Dunbar *et al.,* 1998).

Il flusso di massa totale nell'area e nel periodo di studio è stato descritto da Accornero *et al.* (1999). Tre fasi successive erano state individuate: una prima fase, da fine Gennaio ad Aprile 1995. caratterizzata da valori significativi, alla quale succedeva un secondo periodo di flusso praticamente nullo durante l'autunno-invemo australe, seguito da una terza ed ultima fase che presentava valori relativamente alti (i massimi dell' intero anno di osservazione) da Dicembre alla metà del Gennaio successivo. Dalla comparazione dei trends annuali di flusso totale, sopra descritto, e di flusso di *fecal pellets* (Fìg. 1) risulta evidente che quest'ultimo rispecchia fedelmente il flusso di massa dall'inizio dell'esperimento fino alla fine del secondo periodo. Nella terza fase, invece, in corrispondenza dei massimi del flusso totale, il flusso di *fecal pellets* risulta particolarmente scarso. Da fine Gennaio ad Aprile, quindi, il significativo contributo del materiale fecale al flusso totale suggerisce l'importanza del *grazing* zooplanctonico come fattore di controllo sul flusso di sedimentazione: il materiale sedimenta essenzialmente sotto torma di *fecal pellets* per lo più integre e densamente impacchettate, che possono raggiungere velocità di sedimentazione di diverse centinaia di metri al giorno (Jaeger *et al.*, 1996). Nell'estate successiva (Dicembre 1995-Gennaio 1996), invece, il contributo delle particelle fecali al flusso di massa è molto scarso (in concomitanza, inoltre, con i valori annuali più elevati di flusso di silice biogenica, vedi Accomero *et al.,* 1999). Osservazioni al microscopio elettronico hanno evidenziato che io tale periodo il fitoplancton sedimenta in uno stato particolarmente "fresco", le alghe appaiono cioè intatte, non brucate e spesso associate in colonie, e molte diatomee contengono il citoplasma. Esistono due possibili ipotesi in grado di spiegare questo fatto: a) nel periodo considerato la produzione filoplanctonica e il consumo erbivoro non sono "in fase", il che favorisce la sedimentazione massiva delle cellule algali; b) la produzione primaria è molto maggiore del consumo, il che permette la sedimentazione di una larga frazione, che può cosi raggiungere gli strati profondi prima di essere consumata. Vista la durata del periodo considerato (30 giorni) e visto che a tali latitudini sia fioriture fitoplanctoniche che eventi di sedimentazione particolarmente abbondanti avvengono generalmente su scale temporali di alcuni giorni, noi propendiamo per la seconda ipotesi. In entrambi i casi ci troviamo comunque in presenza di un sistema che favorisce l'esportazione di materiale sotto forma di cellule fitoplanctoniche e detrito vegetale poco degradato.

Analizzando invece il periodo fine Gennaio-fine Aprile 1995 una diminuzione significativa del flusso di *fecal pellets* si ha in corrispondenza degli ovali A di colore più chiaro e di più piccola taglia. Contrariamente al Febbraio precedente, dove il contenuto era rappresentato essenzialmente da diatomee facilmente identificabili, tali *fecal pellets* contengono materiale molto sminuzzato e difficilmente attribuibile alla specie fitoplanctonica di origine. Sulla base dei dati di letteratura (Gonzalez *et al.*, 1994) e delle nostre osservazioni microscopiche. tali feci potrebbero essere presumibilmente prodotte da Copepodi ciclopoidi del genere *Oithona*. Per verificare questa ipotesi sarebbe necessario conoscere l'assemblaggio mesozooplanctonico della colonna d'acqua durante tutto il periodo di osservazione, il che non è stato possibile vista l'area in cui ci troviamo. A supporto della presenza di *Oithona*. però, ricordiamo che mentre Copepodi calanoidi sono stati rinvenuti in tutti i campioni. Copepodi ciclopoidi del genere

Oithona sono assenti nei campioni estivi e presentano abbondanze crescenti andando verso l'inverno australe (Lacombre, 1998).

E' stato dimostralo che questi organismi sono in grado di esercitare un importante ruolo di controllo sul flusso di *fecal pellets* di altri zooplanctonti, in particolare Copepodi calanoidi, favorendo lo stabilirsi di un sistema di ritenzione dove i *fecal pellets* tendono ad essere riciclati negli strati superiori della colonna d'acqua (Gonzàlez &Smetacek, 1994).

Ricapitolando, si verifica la successione di tre diversi tipi di situazioni:

- un sistema che favorisce l'esportazione di materiale dalla zona fotica, dove viene prodotto, agli strati profondi, in larghissima parte sotto forma di materiale fecale prodotto dai grazers mesozooplanctonici (Febbraio 1995);
- un sistema che favorisce la ritenzione del materiale negli strati superiori della colonna d'acqua, in corrispondenza dell'aumento di *fecal pellets* probabilmente originati da fenomeni di coprofagia e/o coprorexia (Marzo-Aprile 1995);
- un sistema che favorisce l'esportazione di una grossa frazione di materiale algale non brucato, in cui le cellule algali sedimentano massicciamente come tali, piuttosto che incluse in *fecal pellets* (Dicembre 1995-Gennaio 1996).

5. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Nel periodo caratterizzato dalla maggiore produttività (Febbraio, Dicembre e Gennaio), si alternano periodi in cui l'esportazione di materiale agli strati profondi viene supportata: (a) essenzialmente dalla sedimentazione algale o (b) essenzialmente dalla sedimentazione di materiale fitoplanctonico incluso nei *fecal pellets.* Oltre alla variabilità spaziale e temporale della produzione fitoplanctonica, differenze nella struttura dell'ecosistema pelagico, ad esempio nel rapporto fitoplancton/zooplancton e nella composizione delle due comunità sono responsabili di questa forte stagionalità nel paltern di sedimentazione.

Malgrado che le osservazioni condotte abbiano permesso di rilevare alcuni trends interessanti, riteniamo che. per stimare in maniera soddisfacente l'impatto del *grazing* zooplanctonico sui flussi di sedimentazione, sarà importante effettuare esperimenti mirali alla determinazione dei tassi di produzione di *fecal pellets* tramite incubazione dei principali organismi produttori (es: specie di Copepodi e Pteropodi dominanti) prelevati a diverse profondità nella colonna d'acqua e mantenuti in diverse condizioni sperimentali, unitamente alle misure dei principali costituenti biogenici del flusso verticale di particelle.

RINGRAZIAMENTI

Questa ricerca è stata svolta nell'ambito delle attività del Programma Nazionale di Ricerche in Antartide (P.N.R.A.). Si ringrazia il personale tecnico dell'Università di Perpignan per il supporto fornito nelle attività di laboratorio.

BIBLIOGRAFIA

Accornero A., Bergamasco A.. Monaco A. & Tucci S. 1999. Particle fluxes at the edge of the Ross Ice Shelf: the role of physical forcing. In: Oceanography of the Ross Sea (Antarctica) (Spezie G. & Manzella G.M.R. eds.), Springer-Verlag: 177-195.

Dunbar R.B., Leventer A.R. & Mucciarone O.A. 1998. Water column sediment fluxes in the Ross Sea. Antarctica: atmospheric and sea-ice forcing. *Journal of Geophysical Research.* 1093: 30741 -30760.

Fabiano M., Chiantore M.. Povero P., Cattaneo-Vietti R., Pusceddu A., Misic C. & Albertelli G. 1997. Short-term variations in particulate matter flux in Terra Nova Bay. Ross Sea. *Antarctic Science.* 9: 143-149.

Fischer G.. Füttererer D., Gersonde R.. Honjo S., Ostermann D. & Wefer G. 1988. Seasonal variability of particle flux in the Weddel Sea and its relation to ice cover. *Natura.* 335: 426-428.

Fowler S.W. & Knauer G.A. 1986. Role of large particles in the transport of elements and compounds through the Oceanic water column. *Progress in Oceanography,* 16: 147-194.

Gonzàlez ILE. 1992. Distribution and abundance of minipellets around the Antarctic Peninsula. Implications for protistan feeding behaviour. *Marine Ecology Progress Serie*.* 90: 223-236.

Gonzàlez H.E., Kurbjeweit F. & Bathmann U. 1994. Occurrence of cyclopoid copepods and faecal material in the Halley Bay region. Antarctica. during January-February 1991. *Polar Kiology.* 14 (5): 33 i -342.

Gonzàlez H.E. & Smetacek V. 1994. The possible role of the cyclopoid copepod *Oithona* in retarding vertical flux of zooplankton fecal material. *Marine Ecology Progress Series,* 113: 233-246.

Govving M.M. & Silver M.W. 1985. "Minipellets": a new and abundant size class of marine fecal pellets. *Journal of Marine Research.* 43: 395-41 8.

Heussner S., Ratti C. & Carbonile J. 1990. The PPS 3 time-series sediment trap and the trap sample processing techniques used during the ECOMARGE experiment. *Continental Shelf Research.* 10: 943-958.

Honjo S. & Roman M.R. 1978. Marine copepod fecal pellets: production, preservation and sedimentation. *Journal of Marine Research,* 36: 45-57.

Jaeger .I.M.. Nittrouer C.A., DeMaster D.J., Kelchner C. & Dunbar R. 1996. Lateral transport of settling particles in the Ross Sea and implications for the fate of biogenic material. *Journal of Geophysical Research,* 101: 18479-18488.

Lacombre S. 1998. Elude du matérici biologique (organismes nageurs) recolté dans les pièges à particules immergés dans la Mer de Ross (Antarctique). Tesi di Laurea. Université de Perpignan - Observatoire Océanologique de Banyuls-sur-Mer (Université de Paris VI).

Legendre L. & Le Fèvre J. 1991. From individual plankton cells to pelagic marine ecosystems and to global biogeochemical cycles. In: Particle analysis in oceanography (Demers S. ed.), Springer-Verlag, *NATO ASI Series,* vol. G27: 261-300.

Marino O., Montresor M., Mazzella L. & Saggiomo V. 1994. Diatom flora in oval fecal pellets from Terra Nova Bay (Antarctica). 13th International Diatom Symposium: 229-240.

Martens P. 1978. Faecal pellets. Fiches d'Identification du Zooplancton (Fraser J.H. ed.) 164: 1-4.

Nothig E.-M. & von Bodungen B. 1989. Occurrence and vertical flux of faecal pellets of probably protozoan origin in the southeastern Weddel Sea (Antarctica). *Marine Ecology Progress Series,* 56: 281-289.

Smith W.O. & Dunbar R.B. 1998. The relationship between new production and vertical flux on the Ross Sea Continental shelf. *Journal of Marine Systems,* 17: 445-457.

Walsh J.J. 1991. Importance of Continental margins in the marine biogeochemical cycling of carbon and nitrogen. *Nature,* 350: 53-55.

Lavoro presentato al XIII Congresso A.I. O. L, Portonovo (Ancona), 28-30 settembre 1998

Atti Associazione Italiana Oceanologia Limnologia, 13 (2), pp. 269-278, luglio 2000

NUTRIENTS, PHYTOPLANKTON AND PRIMARY PRODUCTION PROCESSES IN OLIGOTROPHIC AREAS (SOUTHERN ADRIATIC AND NORTHERN IONIAN SEAS)

Margherita M. TURCHETTO [1] Franco BIANCHI [1], Alfredo BOLDRIN [1], Antonella MALAGUTI [2], Sandro RABITTI [1], Giorgio SOCAL [1], Laura STRADA [3]

[1] Istituto di Biologia del Mare C.N.R., Castello 1364/A, I - 30122 Venezia
[2] ENEA AMB CAT FRAL, via Don Fiammelli, 2,1 - 40128 Bologna
[3] Istituto Talassografico, C.N.R., via R. Gessi, 1,1 - 34123 Trieste

ABSTRACT

Within the framework of the MTP-II-MATER (Mass Transfer and Ecosystem Response) Project, the distribution of dissolved and particulate matter, phytoplankton and primary production were studied in the southern Adriatic and northern Ionian seas. The results of two cruises, carried out in March and August 1997, are reported here. The suspended matter pattern showed a southward decreasing gradient. In March 1997, the availability of inorganic nutrients in the surface layer of the southern Adriatic favoured the presence of a phytoplankton community mainly composed of diatoms. In August, only organic nutrients were available at the surface. This led to the development of two different phytoplankton populations: the first on the surface, represented by picoplankton and nanoplankton, and the second at a depth of 50 m, mainly composed of diatoms. At the Ionian station in both seasons, the prevalence of organic nutrients in the surface layer favoured phytoplankton communities mainly represented by pico- and nanoplankton (flagellates,.coccolithophorids and small dinoflagellates).

RIASSUNTO

In questo lavoro vengono riportati i risultati di due campagne oceanografiche condotte in marzo e agosto 1997 nell'ambito del progetto MTP-II-MATER, per lo studio della distribuzione del seston ed i processi di produzione primaria nell'Adriatico meridionale e nello Ionio settentrionale. Il materiale particellato nella colonna d'acqua presenta un gradiente decrescente da nord verso sud. Nell'Adriatico meridionale, in marzo, la disponibilità in superficie (0-25 m), di nutrienti disciolti in forma inorganica favorisce lo sviluppo di popolamenti fitoplanctonici, prevalentemente composti da diatomee. La produttività primaria integrata nella colonna d'acqua è pari a 297 mgC m^{-2} g^{-1}. In agosto, nello strato superficiale (0-30 m), i nutrienti sono presenti soltanto in forma organica con massimi di DOP pari a 0.14 µmol l^{-1} e di DON di 6.4 µmol l^{-1}. Si è osservata la presenza di due differenti popolamenti fitoplanctonici lungo la colonna

d'acqua, corrispondenti a due picchi di produzione primaria: in superficie prevalgono il picoplancton ed il nanoplancton, mentre a 50 m sono dominanti le diatomee microplanctoniche. La produttività primaria integrata nella colonna è di 236 mgC m^{-2} g^{-1}. Nello Ionio settentrionale, in entrambe le situazioni stagionali, la distribuzione del materiale particellato non ha evidenziato sostanziali differenze: i massimi di concentrazione del seston sono localizzati nello strato sub-superficiale (40-70 m), nel quale i nutrienti sono presenti soprattutto in forma organica (DOP e DON). Qui prevalgono organismi del pico- e nanoplancton; più dell'80% della clorofilla *a è* infatti rappresentato dalla frazione dimensionale < 10 µm. In questo bacino, sono stati misurati valori di produttività primaria integrata molto simili in entrambe le stagioni (167 e 184 mgC m^{-2} g^{-1}, rispettivamente in marzo ed agosto). Si evidenzia come le aree studiate, pur entrambe a carattere oligotrofico, presentino situazioni differenziate sia per quanto riguarda la distribuzione del materiale disciolto che particellato; la natura dei nutrienti disciolti influenza infatti la struttura della comunità fitoplanctonica e, di conseguenza, il tipo di produzione, "nuova" o "rigenerata", esercitata dagli stessi.

1. INTRODUCTION

The southern Adriatic and Ionian Seas are both considered oligotrophic systems, although they have different water masses and circulation patterns. The South Adriatic Pit, where a cyclonic gyre is described, is characterised by the outflow of the low-salinity Adriatic Surface Water (ASW) al the western end, whereas at the eastern end, the inflow of highly saline Ionian Surface Water (ISW), coming from the eastern Mediterranean, is dominant (Gacic *et al.,* 1996).

The Ionian Sea, which is the central part of the Mediterranean Sea, has not been extensively studied, especially with regard to its biological aspects. One important feature of its physical hydrodynamic structure is the presence in the surface layer of MAW (Modified Atlantic Water) which, advected by the Atlantic Ionian Stream. enters from the Sicily Channel. One of its branches flows northwards to lap the Otranto Strait. The MAW is probably more productive than the ISW, the nature of which appears to be extremely oligotrophic (Rabitti *et al.,* 1994).

Most of our present knowledge on the biological properties of the southern Adriatic area mainly concerns phyto- and zooplankton distribution (Vilicic *et al.,* 1989, 1994, 1995; Fonda Umani *et al,* 1992; Krsinic, 1998; Socal *et al,* 1999). Primary production measurements in the Adriatic Sea mostly deal with the northern and central basins (Franco, 1983; Fonda Umani *et al.,* 1992; Zoppini *et al.,* 1995; Alberighi *et al.,* 1997). whereas very few and sporadic data are reported for the southern basin (Faganeli *et al.,* 1989). As regards the Ionian basin. oceanographic and biological information was collected within the framework of the POEM project (Bregant *et al.,* 1992; Rabitti *et al.,* 1994: Civitarese *et al.,* 1996); primary production data for this area are very scarce (Magazzù & Decembrini, 1992; Moutin & Raimbault, 1997).

To increase the amount of available information regarding this still partly unknown topic. measurements of primary productivity and related parameters were considered, within the framework of the FU MTP-II MATER (Mass Transfer and

Ecosystem Response) Project "Multidisciplinary studies in the Adriatic/Ionian subbasins", the aims of which were to study biotic processes controlling bio-geochemical fluxes.

This paper reports the results of two cruises: MAI/1 and MAI/2, carried out in March and August 1997 respectively, on board the Italian R/V "Urania".

2. METHODS

Two stations were mainly investigated: station Al, located in the centre of.the South Adriatic Pit (1200 m depth), and station II, in the north-western part of the Ionian Sea (2400 m depth; Fig. 1).

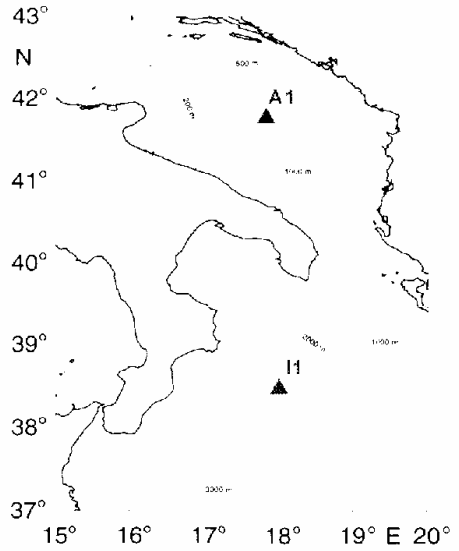

Fig. 1 - Station map.

CTD vertical profiles were performed with a SeaBird probe equipped with Sea Tech transmissometer (25 cm path length) and fluorometer. Discrete water samples were collected with Niskin bottles at standard (0, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 150 m) and at the maximum fluorescence depths for total suspended matter (TSM), particulate organic carbon (POC), total particulate nitrogen (TPN), total and fractionated (< 2 µm, 2-10 µm, >10 µm) chlorophyll *a* concentrations (CHL *a),* dissolved inorganic and total nutrient concentrations, primary production rates, phytoplankton abundance and species composition. Dissolved inorganic nutrients ($N\text{-}NO_2$, $N\text{-}NO_3$, $P\text{-}PO_4$, SÌ-$S1O_4$) were determined automatically on board with a Chemlab analyser, following Grasshoiff *et al.* (1983). Total dissolved nitrogen (TDN) and phosphorus (TOP) were determined on filtered frozen samples by a photo-oxidation (UV) method using an irradiation unit (Thalassia mod. RFC 239), equipped with a high-energy 900 W UV lamp (Heareus TQ 1200), following Walsh (1989) with a few modifications.

TSM samples were filtered on pre-weighed 25 mm Millipore HA filters, and those

for POC and TPN on pre-combusted 25 mm Whatman GF/F glass fibre filters. All filters were stored at -20 C until analysis. In the laboratory, TSM filters were oven-dried at 60 C and then weighed; POC and TPN filters were exposed to HCl vapours for 24 h to remove inorganic carbon (Hedges & Stern, 1984) and then analysed with a Perkin Elmer 2400 CHN elemental analyser.

Chlorophyll *a* samples were filtered on 47 mm GF/F glass fibre filters and immediately frozen. Samples were analysed by the fluorometric method, after acetone extraction (Holm-Hansen *et al.,* 1965). Phytoplankton samples were immediately fixed with hexamethylen-tetramine buffered formalin and counted on an inverted microscope (Utermohl, 1958). Cell size and volume were determined according to Edler (1979), and Phytoplankton Carbon (PPC) was obtained by multiplying cell or plasma volume by 0.11 for diatoms, coccolithophorids and flagellates, and by 0.13 for thecate dinoflagellates (Smetacek, 1975).

Primary production rates were determined with the ^{14}C method (Steemann-Nielsen, 1952) with 4-hour *in situ* incubations in light and dark bottles (100 ml). Samples were filtered onto 47 mm HA Millipore filters (0.45 µm porosity), then 0.5 ml of 1M HCl was added to remove inorganic carbon residues. The integrated primary production value was obtained by multiplying the value of the 4-h incubation by a daily factor calculated from the incident solar radiation of the whole day and that relative to the incubation period. Furthermore, to test daily productivity, primary production rates were measured on 24-h basis (4 incubations of 4 h each) and the daily values obtained were in good agreement with those calculated.

3. RESULTS

In general, particulate matter distribution showed a southward-decreasing gradient, related to hydrological, chemical and biological dynamics. TSM concentrations were generally low, never exceeding 1 mg dm^{-3}, and higher in the southern Adriatic than in the northern Ionian station.

Fluorescence profiles (Fig. 2) showed higher values in the surface-subsurface layer in March and deeper maxima (50-70m) in August.

3.1. South Adriatic station

In March 1997, the availability of inorganic nutrients in the upper water column, due to winter mixing (DIN 2 µmol l^{-1}, P-PO_4 0.1 µmol l^{-1}), enhanced phytoplankton growth (Fig. 3). TSM, chlorophyll *a* and phytoplankton abundances showed their maximum values in the subsurface layer (TSM: 0.2 mg dm^{-3}, chl *a:* 0.6 µg l^{-1}). POC and TPN concentrations were higher at the surface, with 62 and 11 µg l^{-1}, respectively. On average. phytoplankton abundance was greater than 10^5 cells l^{-1}, with a maximum of 2.8 x 10^5 cells l^{-1} at 20 m depth; the mean PPC was about 20 µgC l^{-1}.

The phytoplankton community was mainly represented by microplanktonic diatoms (67%); nanoflagellates, dinoflagellates and coccolithophorids constituted respecttively 25%. 5% and 2% of the total cell number. Several pelagic species belonging to the genera *Chaetoceros* (especially *C. curvisetus, C. brevis* and *C. dichaeta), Bacteriastrum* sp. and *Guinardia (G. striata),* were observed. The euphotic zone (PAR > 1%)

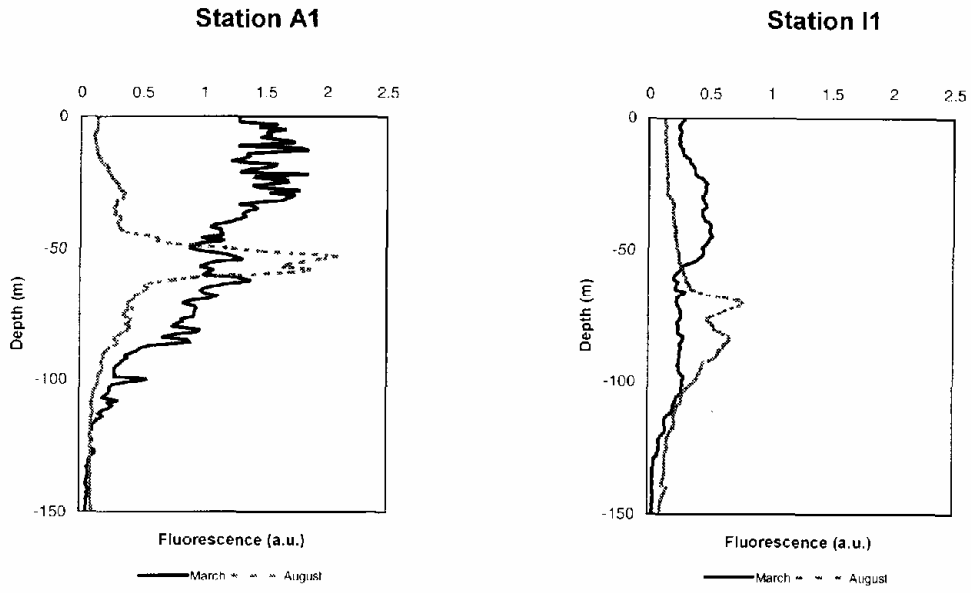

Fig. 2 - Vertical profiles of fluorescence expressed in arbitrary units (a.u.), al Adriatic and Ionian stations. in March (solid line) and August 1997 (dashed line)

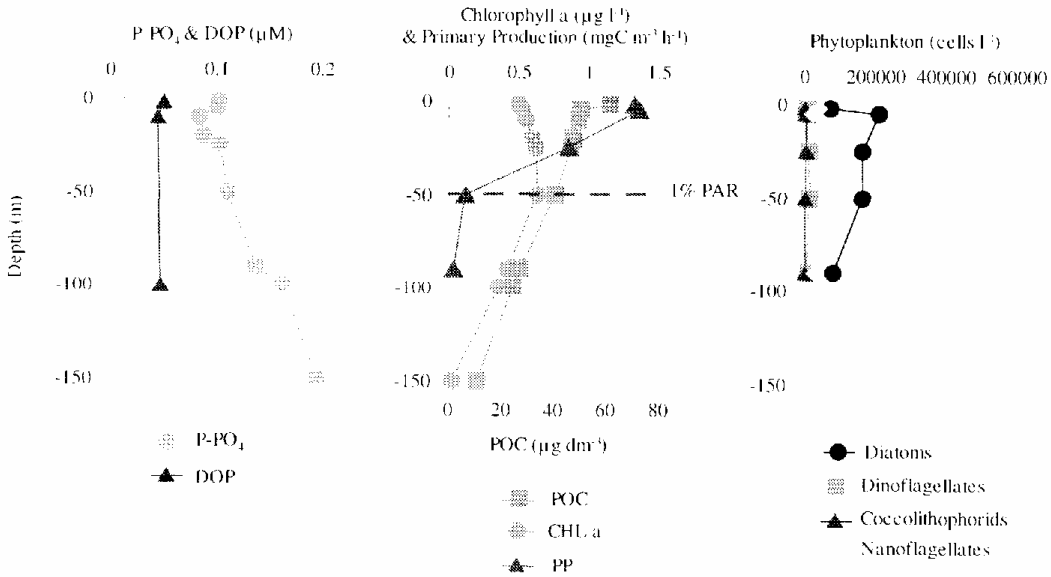

Fig. 3 - Vertical profiles of Phosphate and Dissolved Organic Phosphorus; Chlorophyll *a.* Primary Production and Parliculate Organic Carhon; Phyluplankton composition at south Adriatic station (st. A1) in March 1997.

reached a depth of 40 m. Primary production rates, favoured by nutrient availability, showed surface-subsurface peaks with values up to 1.4 mgC m^{-3} h^{-1}, decreasing downwards. Daily integrated primary productivity, calculated in the 0-90 m layer, was 297mgC$m^{-2}d^{-1}$.

In August 1997, the seasonal thermocline and the lack of inorganic nutrients in the surface layer, due to biological consumption and water column stratification, brought about a shift in maximum values of particulate matter to deeper levels, below the nutricline (Fig. 4). At the surface, dissolved nutrients were mainly in organic form: DON and DOP reached 6 and 0.15µmol l^{-1} , respectively. This different nutrient availability through the water column determined the presence of two distinct phytoplankton assemblages. In the upper layer, the community was mostly composed of picoplankton, nanoflagellates and coccolithophorids *(Emiliania huxleyi, Rhabdosphaera claviger),* small cells all feeding on regenerated organic nutrients, whereas below 50 m depth the comrnunity was dominated by diatoms (60% at 50 m depth; *Chaetoceros* sp., *Leptocylindrus*

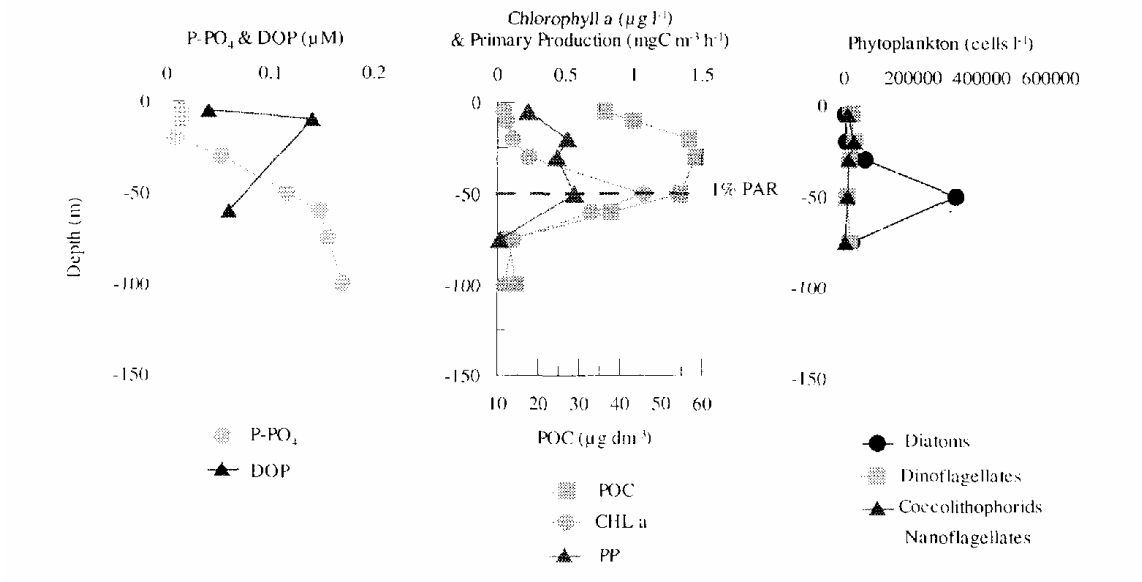

Fig. 4 - Vertical profiles of Phosphate and Dissolved Organic Phosphorus; Chlorophyll *a,* Primary Production and Particulate Organic Carbon; Phytoplanklon composition at south Adriatic station (st. A1) in August 1997.

danicus, Pseudonitzschia delicatissima complex. *Thalassionema nitzschioides),* which use the inorganic nutrient fraction. The vertical distribution of primary production rates exhibited two peaks, one at 20 m and one at 50 m depth, with similar values, 0.51 and 0.57 mgC m^{-3} h^{-1}, respectively; integrated daily primary pro-ductivity was 236 mgC m^{-2} g^{-1}. This structure was also observed in the chlorophyll *a* size fractions: at the surface, 98% of total chlorophyll concentration was represented by the < 10 µm fraction, whereas at 50 m depth, 42 % of it consisted of cells >10 µm. TSM, POC and TPN concentrations showed peaks around 50 m, where a Deep Chloro-phyll Maximum (CHL *a* of 1.1 µg l^{-1}) was observed.

3.2. Northern Ionian station

Particulate matter distribution did not reveal many differences between the observed seasonal situations. Peaks of particle concentration were recorded in the subsurface layer (40-70 m), where nutrients were mainly in organic form (i.e. DON and DOP).

In March, the DON concentration at 50 m reached values of 12.7 µmol l^{-1}, whereas DIN was only 2.4 µmol l^{-1}. PO_4 was around 0.05 µmol l^{-1} until 100 m depth, whereas DOP increased with depth up to 0.15 µmol l^{-1}.

Particulate matter concentration was generally hall' that of the Southern Adriatic Pit: TSM concentration was on average 0.05 mg dm^{-3} POC 21.7 µg dm^{-3} and TPN 3.8 µg dm^{-3}; chlorophyll *a* peaked at 0.3 µg l^{-1} at 40 m, the fraction < 2 µm accounting for more than 75 %. Phytoplankton showed very low abundances, ranging from 28 to 61 x 10^3 cells l^{-1}, with a community dominated by nanoflagellates, coccolithophorids (mainly *Emiliania huxleyi)* and small naked dinoflagellates *(Gymnodinium* sp.). Phytoplankton carbon (PPC) was on average 1.6 µgC l^{-1} , one order of magnitude lower than in the southern Adriatic. Primary production rates were on average 1/3 those of the southern Adriatic, with a peak of 0.42 mgC m^{-3} h^{-1} at 40 m depth, corresponding to the highest chlorophyll concentration. The euphotic layer was 50 m deep.

In this station, the summer thermocline reached a greater depth (50 m), so that the nutrient-depleted layer was deeper here than in the southern Adriatic. In the surface layer, only DON was present (mean value of 5 µmol l^{-1}), whereas DIN was almost absent, progressively increasing downwards (Fig. 5). POC concentrations showed peaks around 65 m, corresponding to those of chlorophyll, phytoplankton and carbon.

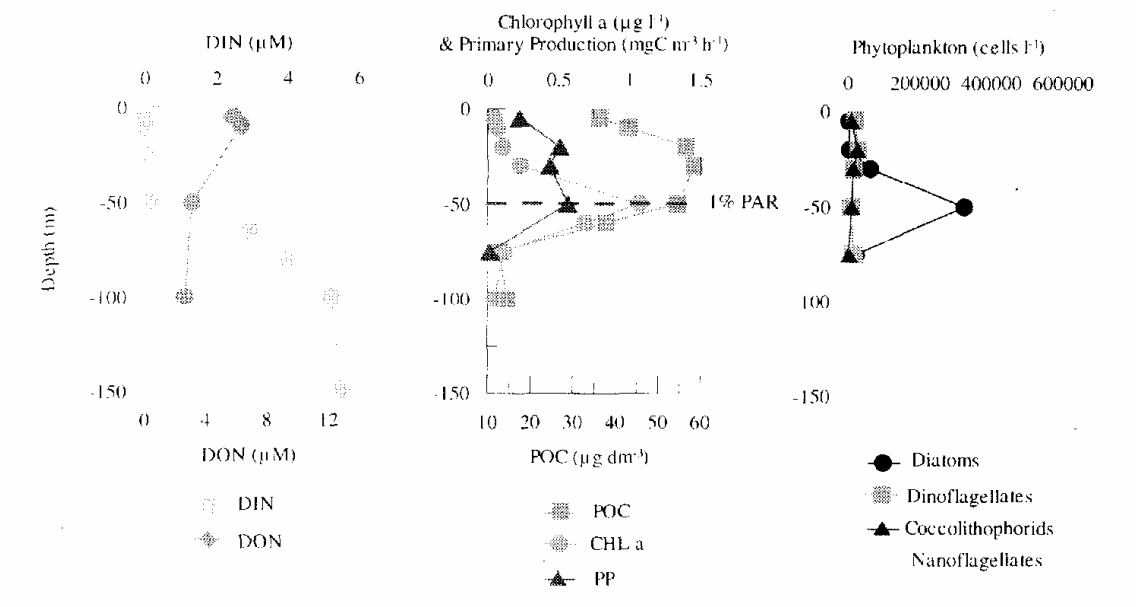

Fig. 5 - Vertical profiles of Phosphate and Dissolved Organic Phosphorous: Chlorophyll *a,* Primary Production and Particulate Organic Carbon; Phytoplankton composition at Ionian station (st. I1) in August 1997.

The chlorophyll fraction of < 2 µm accounted for 58-70% of the total. Phytoplankton showed higher abundances (> 10^5 cells $l^{-1}$and carbon values (5 µgC l^{-1}) compared with the situation in March, with maxima of 2 x 10^5 cells l^{-1} and 6.9 µgC l^{-1} at 65 m depth, respectively. The population was mainly represented by pico- and nano-plankton, the latter represented by flagellates, dinoflagellates *(Gymnodinium* spp., *Oxytoxum variabile)* and coccolithophorids *(Emiliania huxleyi, Calciosolenia murrayi, Ophiaster hydroideus). '*

Primary productivity values were similar to those of March, with a peak of 0.45 mgC m^{-3} h^{-1} at 25 m, the euphotic layer reaching 70 m depth. Daily integrated primary productivity showed very similar values in both seasons: 167 in March and 184 mg C m^{-2} d^{-1} in August.

4. DISCUSSION AND CONCLUSIONS

The areas studied here, both representative of oligotrophic systems, showed different values for dissolved and particulate matter, and thus a different degree of fertility. The availability of varians nutrient forms (inorganic or organic), due to the water column structure and circulation dynamics, affected the phytoplankton community and primary production processes.

In the Southern Adriatic Pit, seasonal upwelling phenomena occur (Vilicic *et al.,* 1989; Socal *et al.,* 1999), which bring inorganic nutrients to the surface. These events favour the growth of micro-phytoplankton, with chlorophyll size fraction > 2 µm represented mainly by diatoms, which are able to exert "new production" processes.

Instead, the Ionian surface waters are very poor in inorganic nutrient content (Bregant *et al.* 1992, Civitarese *et al.* 1996), and the only available nutrients are present in organic form. These trophic conditions enhance "regenerated production" processes, carried out mainly by small phytoplankton (Thingstad and Sackshaug 1990), as dernonstrated by the dominant chlorophyll size fraction < 2 µm. These communities consist of pico- and nanoplankton, mainly represented by phytoflagellates, coccolitho-phorids and dinoflagellates.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was supported by the EU MAST-III-MTP-II MATER (Mass Transfer and Ecosystem Response) Project, contract no. MAS3-CT96-0051. We are grateful to Drs A. De Lazzari and O. Civitarese for field work and laboratory analyses, G. Penzo and E. Lipparini for technical assistance, and the captains and crew of the R/V "Urania" for assistance at sea. G. Walton revised the English text.

REFERENCES

Alberghi L., Franco P., Bastianini M. & Socal G. 1997. Produttività primaria, abbondanza fitoplanctonica e campo di irradianza in due stazioni dell'Adriatico settentrionale. Crociere Marzo e Giugno 1994. *Biol. Mar. Medit.* 4(1): 17-23.

Bregant D., Civilarese G. & Luchetta A. 1992. Chemical parameter distribution in the Ionian Sea during POEM-06 Cruise (October 1991), *Rapp. Comm. int. Mer Medit.* 33: 395.

Civitarese G., Crise A., Crispi G. & Mesetti R. 1996. Circulation effects on nitrogen dynamics in the Ionian Sea. *Oceanol. Acta* 19, 6: 609-622.

Edler L. 1979. Recommendations for marine biological studies in the Baltic Sea. Phyloplankton and chlorophyll. *Baltic Marine Biologists Publ, 5:* 1-38.

Faganelli J., Gacic M., Malej A. & Smodlaka N. 1989. Pelagic organic matter in the Adriatic Sea in relation to winter hydrographic conditions. *J. Plank. Res.* 11,6: 1129-1141.

Fonda Umani S., Franco P., Ghirardelli E. & Malej A. 1992. Outline of oceanography and plankton of the Adriatic Sea. In: *Marine Eutrophication and Population Dynamics:* 347-365.

Franco P. 1983. Distribuzione verticale della produttività primaria e struttura della colonna d'acqua nell'Adriatico settentrionale. *Atti 5° Congresso AIOL,* Stresa, 19-22 maggio 1982: 515-523.

Gacic M., Kovacevic V., Manca B., Papageorgiou E., Poulain P.M., Scarazzato P. & Vetrano A. 1996. Thermohaline properties and circulation in the Otranto Strait. *Bulletin de l'Istitut Océanographique,* Monaco, 17, 2:117-146.

Grasshoff K., Erhardt M. & Kremling, K. 1983. Methods of seawater analysis. *Verlag. Chemie,* Weinheim, 419 pp.

Hedges J.I. & Stern J.H., 1984. Carbon and nitrogen determination of carbonate - containing solids. *Limnol. Oceanogr.,* 19: 984-989.

Holm-Hansen O., Lorenzen C.J., Holmes R.W. & Strickland J.D.H. 1965. Fluorometric determination of chlorophyll. *J. Cons. perm. Int. Explor. Mer,* 30: 3-15.

Krsinic F. 1998. Vertical distribution of protozoan and microcopepod communities in the South Adriatic Pit. *J. Plankton Res.* 20, 6: 1033-1060.

Magazzù G. & Decembrini F. 1992. Biomasse et Production primaire du picoplancton phototrophe en Mer Mediterranee. *Rapp. Comm. int. Mer Medit.,* 33: 259.

Moutin T. & Raimbault P. 1997. Primary production in the eastern and western Mediterranean Sea during the early summer season (MINOS Cruise). International Conference: Progress in Oceanography of Mediterranean Sea Rome, November 17-19, 1997. Abstracts Volume: 341.

Rabitti S., Bianchi F., Boldrin A., Da Ros L., Socal G. & Tolti C. 1994. Particulate matter and phytoplanklon in the Ionian Sea. *Oceanol. Acta* 17, 3: 297-307.

Smetacek V. 1975. Die Sukzession des Phytoplanklon der westilchen Kieler Butch. PhD Thesis, Univ. Kiel, 151 pp.

Socal G., Boldrin A., Bianchi F., Civilarese G., De Lazzari A., Rabitti S., Toni C. & Turchetto M.M. 1999. Nutrient, particulate mailer and phytoplanklon variability in the photic layer of the Otranto Strait. *J. Mar. Sys.,* 20/1-4:381-398.

Steemann-Nielsen E. 1952. The use of radioactive carbon (14C) for measuring organic production in the sea. *J. Cons. perm. int. Explor. Mer.,* 18: 117-140.

Thingslad T.F. & Sackshaug E. 1990. Control of phytoplankton growth in nutrient recyc-ling ecosystems. Theory and terminology. *Mar Ecol. Prog. Ser.* 63: 261-272.

Utermöhl. H. 1958. Zur Vervollkomnung der quantitativen Phytoplankton-Methodik. *Mitt. Int. Ver. LimnoL* 9: 1-38.

Vilicic D., Krsinic F. & Bicanic Z. 1994. The Diatom Nitzschia sicula (Casti.) Hust. and Naupliar Faecal Minipellets in the Adriatic Sea. *Mar. Ecol.* 15 (1): 27-39.

Vilicic D., Leder N., Grzetic Z. & Jasprica N. 1995. Microphytoplankton in the Strait of Otranto (eastern Mediterranean). *Mar. Biol.* 123: 619-630.

Vilicic D., Vucar Z., Skrivanic A. & Grezetic Z. 1989. Phytoplankton Blooms in the Oligotrophic Open South Adriatic Waters. *Mar. Chem.* 28: 89-107.

Walsh T.W. 1989. Total dissolved nitrogen in seawater: a new high-temperature combustion method and a comparison with photo-oxidation. *Mar. Chem.,* 26: 295-311.

Zoppini A.. Pettine M., Tolti C., Puddu A., Artegiani A. & Pagnotta R. 1995. Nutrients, standing crop and primary production in the western coastal waters of the Adriatic Sea. *Estuarine. Coastal and Shelf Science,* 41: 493-513.

Lavoro presentato al XIII Congresso A.I.O.L, Portonovo (Ancona), 28-30 settembre 1998

Atti Associazione Italiana Oceanologia Limnologia, 13 (2), pp. 279-288, luglio 2000

L'EVOLUZIONE STORICA DEL LITORALE DI GENOVA ATTRAVERSO DUE ESEMPI CARATTERISTICI: VOLTRI E ALBARO

Carlo CAVALLO, Roberta IVALDI

Dipartimento per lo studio del territorio e delle sue risorse, Università di Genova

ABSTRACT

In this paper the historical changes of the coastal area of the city of Genova are examined, focusing on the different natural and anthropic processes which governed the changes. The main changes occurred during last century due to the big expansion of the urban area and of the port structures, the main are the expansion of Genova port at the beginning of this century and that of Voltri port which started in the ’80 and is still going on. Besides these major changes the urban coastal area is interested by other types of changes such as some beach fills carried out in the sixties (Lido d’Albaro beach) and all the minor structures as promenades, sewage plants and similar.

RIASSUNTO

In questo lavoro vengono esaminate le variazioni storiche della fascia costiera del Comune di Genova, individuando i diversi processi naturali ed antropici causa delle principali trasformazioni avvenute con particolare riferimento a due esempi caratteristici: Voltri e Albaro. Sulla base delle caratteristiche morfologiche del territorio e di quelle storico-geografiche si sono evidenziate le diverse fasi evolutive del litorale genovese focalizzandosi sui due siti sopraindicati, rappresentativi di una realtà antropizzata che non ha cambiato radicalmente l'ambiente preesistente. L'ultimo secolo rappresenta sicuramente il periodo che segna le maggiori modifiche alla fascia costiera con l'espansione urbana e portuale, avvenute in diverse fasi di cui le più evidenti sono l'ampliamento del porto di Genova cominciata all'inizio di questo secolo e proseguita nel dopoguerra e la realizzazione, negli anni '80, del porto di Voltri. Oltre a queste trasformazioni maggiori la fascia costiera è interessata anche da altre forme di influenza antropica come i ripascimenti degli arenili avvenuti in modo ingente ad opera delle discariche lungo costa risalenti al dopoguerra (spiaggia del Lido di Albaro) e tutte le strutture minori quali ad esempio le passeggiate a mare, i depuratori, e le colmate.

1. EVOLUZIONE STORICA DEL LITORALE GENOVESE

Il litorale del Comune di Genova (da Vesima a Nervi) è costituito da una costa articolata e complessa estesa linearmente per 42,5 km ed è caratterizzato da un'alter-

nanza di spiagge sabbiose e ciottolose, scogliere naturali e artificiali e dalle strutture portuali. La sua configurazione è strettamente dipendente dalle variazioni storiche conseguenti le varie fasi di espansione della città. Seguendo le varie trasformazioni del porto si può avere un quadro dello stato attuale del litorale genovese e della sua evoluzione (Fig. 1).

L'antico porto di Genova si è insediato e sviluppato nei secoli in corrispondenza di un anfiteatro naturale molto favorevole con sviluppo lineare di 2,5 km, posto al centro dell'arco costiero ligure e delimitato ad Est dalla penisoletta del Molo e ad Ovest dal promontorio di capo Faro.

La linea di costa, prima di essere occupata dalle strutture del porto antico era piuttosto frastagliata con morfologie poco acclivi e brevi tratti pianeggianti nel settore di levante, vicino al Molo, e via via più acclivi procedendo verso ponente (Brandolini *et al.,* 1996). Le spiagge presenti, che si riducevano drasticamente durante le mareggiate, erano molto strette e passavano da sabbiose a ciottolose procedendo verso ponente per scomparire in corrispondenza della costa rocciosa del promontorio di capo Faro. Queste spiagge si originavano dal deposito, sul substrato marnoso, dei sedimenti trasportati dai piccoli rivi esistenti (Pareto, 1846). Diversi bacini confluiscono nell'anfiteatro e durante i secoli, in funzione dell'espansione urbana, sono stati regimati, tombinati o deviati riducendo al minimo il loro contributo di carico solido. Questa insenatura viene descritta dal Rovereto (1939) come una *"piccola rientranza della linea costiera in delineamento parabolico, e orientata in maniera da essere completamente aperta verso mezzogiorno e verso ponente: non è stata quindi la forma, ma l'ubicazione rispetto alle vie dei traffici, ai passi dell 'Appennino.....ed è stata sin dall 'età del Ferro sito marittimo".*

Il primo approdo fu costruito sfruttando il ridosso del capo roccioso del Molo. Risalgono a circa il X secolo le prime strutture che daranno origine al Molo, terminato nel 1128 e sorto su una dorsale naturale a protezione della più antica area portuale, il Mandraccio. A seguito del continuo aumento di traffici la costruzione di nuove strutture continuò in maniera pressoché continuativa. Al XVI secolo risalgono le prime strutture in muratura che vanno a sostituire i pontoni di legno presenti all'interno dell'anfiteatro. Il periodo 1500-1600 segna una svolta con grandi trasformazioni nelle opere edilizie. Nel XVII secolo viene colmata un'ampia area tra il Mandraccio e il centro dell'anfiteatro (in prossimità del Palazzo San Giorgio) e viene costruito, in corrispondenza del capo Faro, il Molo Nuovo. Le strutture portuali furono protette dall'impeto delle mareggiate da diverse opere di difesa e dal continuo rifiorimento delle scogliere. Solo nel secolo scorso le ultime grandi trasformazioni del Porto Antico, con la costruzione e l'ampliamento di nuove calate, hanno fatto sentire la necessità di realizzare opere di difesa idonee come le dighe foranee (Cabona & Terranova, 1992).

Agli inizi del novecento continuò a sentirsi la mancanza di spazi per la pressante richiesta determinata dallo sviluppo industriale di quegli anni. L'unica soluzione fu l'impiego di colmate e lo sviluppo portuale verso mare; questo causò le prime pesanti variazioni della dinamica litorale e del trasporto lungocosta dei sedimenti.

Alla fine del secolo scorso la fascia costiera a ponente dell'anfiteatro di Genova era caratterizzata da circa 16 km di arenili pressoché continui, mentre attualmente solo il

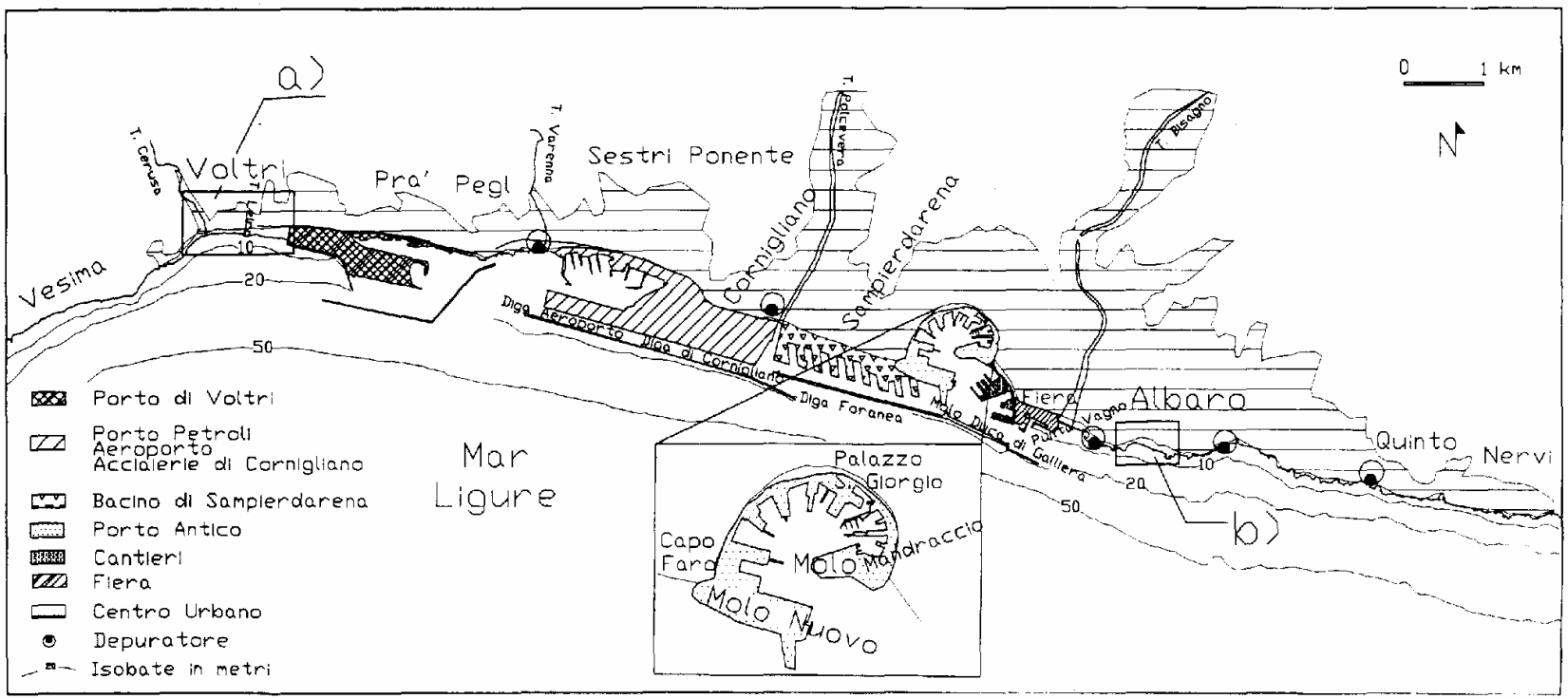

Fig.1 - Evoluzione storica del litorale genovese con evidenziate le fasi di trasformazione delle strutture portuali. Ingrandimento relativo all'area del Porto Antico: a) e b) indicano i due esempi presentati nel lavoro.

tratto compreso tra Veltri e Vesima mantiene una dinamica naturale (Brandolini *et al,* 1992). In particolare, alla fine dell'800, il tratto costiero di Sampierdarena era caratterizzato da una stretta spiaggia sabbiosa con la presenza di sporadiche opere di difesa a protezione delle strutture presenti lungo la costa tra cui la linea ferroviaria ed alcuni stabilimenti balneari. Procedendo verso ponente la spiaggia si faceva via via più ampia fino a 150 m in corrispondenza dell'abitato di Sestri Ponente. A Pegli erano presenti diverse opere di difesa trasversale mentre Prà aveva una spiaggia lunga e stretta che si ampliava gradatamente verso Voltri, soprattutto nel tratto a levante del torrente Cerusa (Ascari *et al,* 1937). La costruzione della linea ferroviaria, realizzata lungo la costa negli anni 1850-1860 creò un primo sbarramento alla dinamica trasversale dei sedimenti impedendo la dissipazione dell'energia del moto ondoso e quindi incentivando i fenomeni erosivi provocati dalle opere di difesa dei manufatti (Cabona & Terranova, 1992).

Il litorale di ponente presentava pertanto delle caratteristiche morfologiche più favorevoli ad un ampliamento del porto rispetto al litorale di levante, costituito essenzialmente da costa alta e rocciosa con poche e piccole spiagge a tasca. A ponente, oltre alla morfologia favorevole, la posizione era più strategica per la vicinanza al nuovo polo industriale, sorto lungo la piana del torrente Polcevera a metà dell'800, che era in continua espansione e collegato direttamente con linea ferroviaria alle aree di oltre Appennino. Alla fine del secolo pertanto, l'incremento delle attività industriali fino alla foce del Polcevera portò ad una graduale espansione verso ponente delle aree portuali, iniziata nel 1905 e conclusasi negli anni '40 con la costruzione di 7 moli a pettine davanti a Sampierdarena (Brandolini *et al.,* 1994).

Al 1932 risale l'esecuzione della spianata di San Benigno, a monte del Molo Nuovo del Porto Antico. I lavori di ampliamento continuarono con la realizzazione della colmata di Cornigliano per accogliere le acciaierie (1939-1942) e successivamente della colmata davanti a Sestri Ponente per l'aeroporto ed il porto petroli (1954-1960).

Anche a levante del Porto Antico l'espansione procedette sia pur con areali minori. Dopo i bacini di carenaggio, costruiti a levante del Molo Vecchio alla fine del secolo scorso, l'espansione proseguì fino alla foce del torrente Bisagno con la realizzazione della Fiera di Genova, risalente agli anni '50.

In seguito a tutte queste trasformazioni la lunghezza degli arenili genovesi negli anni '50 era già ridotta del 50%. Rimaneva il lungo tratto di spiaggia tra Pegli e Voltri finché, a partire dagli anni '70, la grande domanda di un porto per regolare il traffico container portò alla realizzazione del Porto di Voltri, ancora in corso d'opera, che ha cancellato oltre 2 km di spiaggia davanti a Prà e Palmare con una colmata di oltre 700.000 m^2 (Brandolini *et al,* 1992).

Le spiagge residue hanno comunque avuto un'evoluzione pesantemente influenzate da queste trasformazioni. Quelle di Pegli, si sono in pratica trasformate *in pocket-beach* artificiali, essendo racchiuse tra le strutture portuali, e sono sostanzialmente stabili o in lieve avanzamento (a levante della foce del torrente Varenna). La spiaggia di Voltri, compresa tra le opere portuali e la foce del torrente Cerusa, è in continuo avanzamento per l'azione di sbarramento della deriva litoranea causato dalla struttura

portuale stessa.

Oltre alle opere portuali, altre strutture lungocosta hanno mutato profondamente l'immagine naturale del territorio di fronte alle esigenze di urbanizzazione. Tra queste si possono annoverare i depuratori (Fig. 1) sorti negli anni 1970-1980 lungo tutto il litorale genovese su colmate a mare e tutte le opere di difesa rigide, quali pennelli e difese aderenti, presenti soprattutto sulla costa di levante. Questo tratto di costa non portualizzato è caratterizzato da spiagge a tasca non molto ampie alternate a tratti di costa rocciosa per uno sviluppo di circa 15 km prevalentemente interessati dal percorso via Aurelia. All'estremo levante genovese la passeggiata a mare di Nervi è stata ricavata direttamente sulla falesia rocciosa per uno sviluppo di quasi 2 km.

Considerazione a parte va fatta per il porticciolo di Nervi che ha visto negli anni diverse trasformazioni fino ad arrivare all'attuale assetto che chiude quasi completamente la piccola baia. Questo crea non pochi problemi al torrente Nervi che, in periodi di piena non trovando una idonea apertura al mare, ricolma spesso il porticciolo di sedimenti con problemi anche per il borgo.

In questo contesto si sono esaminati nel dettaglio due casi emblematici, rappresentati dalla spiaggia di Veltri e da quelle di San Giuliano e Lido d'Albaro, che ben esemplificano l'evoluzione delle aree limitrofe a quelle portuali.

2. EVOLUZIONE DEL LITORALE DI VOLTRI

Tra il Torrente Cerusa e la Punta di Pegli si sviluppava, fino alla fine del secolo scorso, una spiaggia rettilinea di notevole lunghezza (circa 4 km) alimentata da numerosi torrenti di cui i più importanti sono il Cerusa ed il Leira (Fig. 1). L'esigua pianura che raccorda la spiaggia ai pendii retrostanti è costituita da un deposito di spiaggia che poggia su di una piattaforma di abrasione marina, successivamente ricoperto da materiali alluvionali (Carobene & Firpo, 1994).

Le prime testimonianze grafiche sull'assetto del litorale sono contenute nelle tavole del Vinzoni, risalenti alla seconda metà del '700 in cui si ritrae, sotto l'amministrazione dell'allora "Commissariato della Sanità di Veltri", il tratto di costa compreso tra Veltri e Pegli; è evidente il brusco mutare di orientazione della costa in corrispondenza dell'abitato di Voltri, ancor oggi riscontrabile come arcuatura del tracciato della via litoranea napoleonica e di quello ferroviario ottocentesco. L'estensione della piana alluvionale era decisamente inferiore a quella attuale; il "Castello" (attuale sede della Circoscrizione di Voltri) si trovava direttamente sull'arenile presso la sponda destra del Leira.

Fino alla fine dell'800 la spiaggia di Voltri era molto usata da pescatori e commercianti, malgrado la sua esposizione ai venti di quasi tutti i quadranti. Ascari *et al.* (1937), citando numerosi documenti dell'800, rilevano la violenza dei venti di tramontana incanalati nella valle del Cerusa, tali da far denominare il luogo "bocca di vento" da parte dei marinai dell'epoca. Inoltre viene citata la presenza di un molo utilizzato a fini commerciali che subiva frequenti danneggiamenti da parte delle mareggiate invernali (1673, 1699).

La ricostruzione degli eventi storici dell'800 da parte dell'Ascari *et al.* (1937) rileva un periodo di crisi erosiva fino al 1830 con forti danni alla costa in prossimità della foce del Cerusa, seguito da un periodo di generale avanzamento delle spiagge negli anni 1840-1860.

In seguito a tale avanzamento si verificò una notevole espansione edilizia con costruzione di edifici direttamente sull'arenile. Nel frattempo era cominciata la costruzione della linea ferroviaria che, utilizzando in notevole quantità il materiale della spiaggia e dei fiumi, innescò una nuova fase erosiva generando, ovviamente, gravi danni e addirittura crolli agli edifici appena costruiti.

Nel 1864 il mare batteva direttamente contro i muri delle case e produceva paurosi scalzamenti alla stessa costruenda linea ferroviaria tanto che il Comune di Veltri, nel 1864-66, fece costruire due pennelli, uno alla destra del Leira ed uno al Chiaminone (Ascari *et al.,* 1937). Tali pennelli furono distrutti e ricostruiti più volte ma comunque fecero sentire la loro influenza nel tratto di spiaggia fra le foci del Cerusa e del Leira, che aumentò sensibilmente, cambiando curvatura; a levante del Chiaramone si innescò invece una violenta fase erosiva che portò alla completa scomparsa dell'arenile di Palmare ed allo scalzamento della linea ferroviaria per oltre 400 m. Questa fu protetta in seguito da scogliere ed altre opere massicce.

Gli anni successivi sono caratterizzati dall'alternanza di fasi di erosione e fasi di accrescimento delle spiagge: questo a causa del fatto che in occasione di piene violente dei fiumi, si instaura un regime di ripascimenti che può protrarsi per alcuni anni mentre, in occasione di forti mareggiate, si può generare un periodo di erosione intensa. Sono anche documentate storicamente alcune inversioni della deviazione della foce dei fiumi, specialmente del Leira, che dimostrano come eccezionali mareggiate di scirocco possano invertire il senso della deriva litoranea netta per alcuni anni.

Questo evidenzia una volta di più come la dinamica di un litorale in un'area come quella ligure, con corsi d'acqua a regime torrentizio ed elevata energia del rilievo, dipenda da molteplici fattori che interagiscono tra di loro in maniera complessa, comprensibile solamente con analisi a lungo termine, prescindendo da situazioni contingenti, che possono portare ad interpretazioni errate o addirittura pericolose.

Un dato certo è invece la enorme influenza negativa che la costruzione e la manutenzione della ferrovia ebbero sull'equilibrio costiero in tutta la riviera ligure, influenza risultata più determinante per arenili di notevole estensione longitudinale.

A partire dal dopoguerra il boom edilizio influenzò questa zona in maniera determinante in quanto fu scelta come sede preferenziale per discariche di inerti e la linea di riva andò sempre avanzando attraverso la creazione di una grossa discarica in corrispondenza della foce del Leira, poi stabilizzata e trasformata in parcheggio, e soprattutto attraverso le discariche, notevolmente aggettanti a mare, del costruendo porto di Veltri iniziate negli anni '60 (Cabona & Terranova, 1992; Cavallo, 1995). La spiaggia di Veltri alla foce del Cerusa presentava, negli anni '40, una spiaggia molto limitata, con il mare che lambiva i capannoni industriali, un pennello e un molo che sono stati poi eliminati negli anni seguenti con l'espansione della spiaggia mentre, a levante, si provvedeva alla realizzazione di opere trasversali, tra cui quelle alla foce del Leira.

Attualmente la spiaggia di Veltri, nel settore orientale, è in continua progradazione per l'effetto dell'interruzione della deriva verso est dei materiali provenienti dai due fiumi, provocato dalle strutture del porto. La ricostruzione delle linee di riva più recenti restituite dalle foto aeree della Regione Liguria (Fig. 2) indica come nel 1973 davanti al campo sportivo S. Carlo, realizzato su un terrapieno artificiale, non esisteva spiaggia ma soltanto una scarpata alta qualche metro e immergente direttamente in mare; nel 1993, nello stesso punto, è presente una spiaggia larga circa 60 m. Nella zona adiacente al molo di sottoflutto del porto l'avanzamento si può quantificare in circa 200 m dal 1834 al 1993, di cui 100 m solamente dal 1973 al 1993.

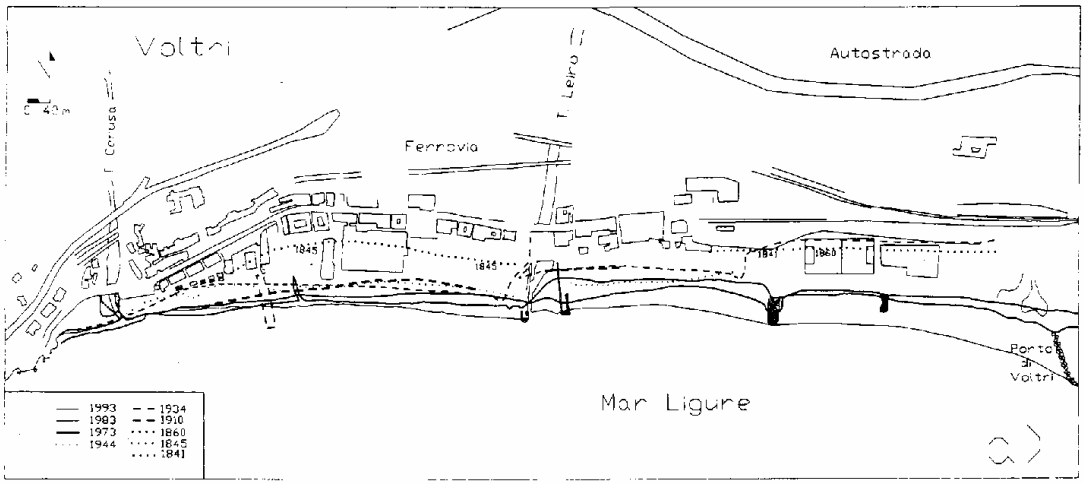

Fig. 2 - Litorale di Genova Voltri: variazioni della linea di riva dal 1841 ad oggi.

3. IL LITORALE DI S. GIULIANO - LIDO D'ALBARO

Le spiagge di San Giuliano e del Lido d'Albaro hanno avuto una evoluzione molto diversa da quella di Veltri. Innanzi tutto si sviluppano in una zona di costa rocciosa dove la configurazione naturale impedisce la formazione di spiagge naturali. Le tavole del Vinzoni mostrano una continuità della costa rocciosa tra Punta Vagno e Boccadasse, con la presenza di numerose calette senza spiaggia. Le pocket beaches che si formarono a partire dall'800 in queste calette sono di origine essenzialmente artificiale. Ascari *et al.* (1937) a proposito di questa porzione di litorale scrivono testualmente: *...il regime di essa dipende assolutamente da particolari ed artificiali condizioni d'ambiente. Infatti, data l'enorme quantità di detriti, relitti di scavi e costruzioni, che vengono giornalmente scaricati a mare da anni e anni, dipendenti dall'enorme sviluppo urbanistico di Genova nella sua parte di Levante, è assolutamente impossibile un lavoro di indagine volto allo studio dei fenomeni naturali.*

L'evoluzione storica della spiaggia di San Giuliano e del lido di Albaro è evidenziata dalla Fig. 3 e dalla sequenza di foto storielle che ricoprono tutto il secolo con particolare riguardo all'esempio che ha subito maggiori variazioni (Fig. 4). Si può notare l'abnorme ampiezza della spiaggia sul finire degli anni ‘60 a seguito delle

discariche effettuate in quell'epoca con il materiale proveniente dalla costruzione dell'autostrada Genova-Sestri Levante.

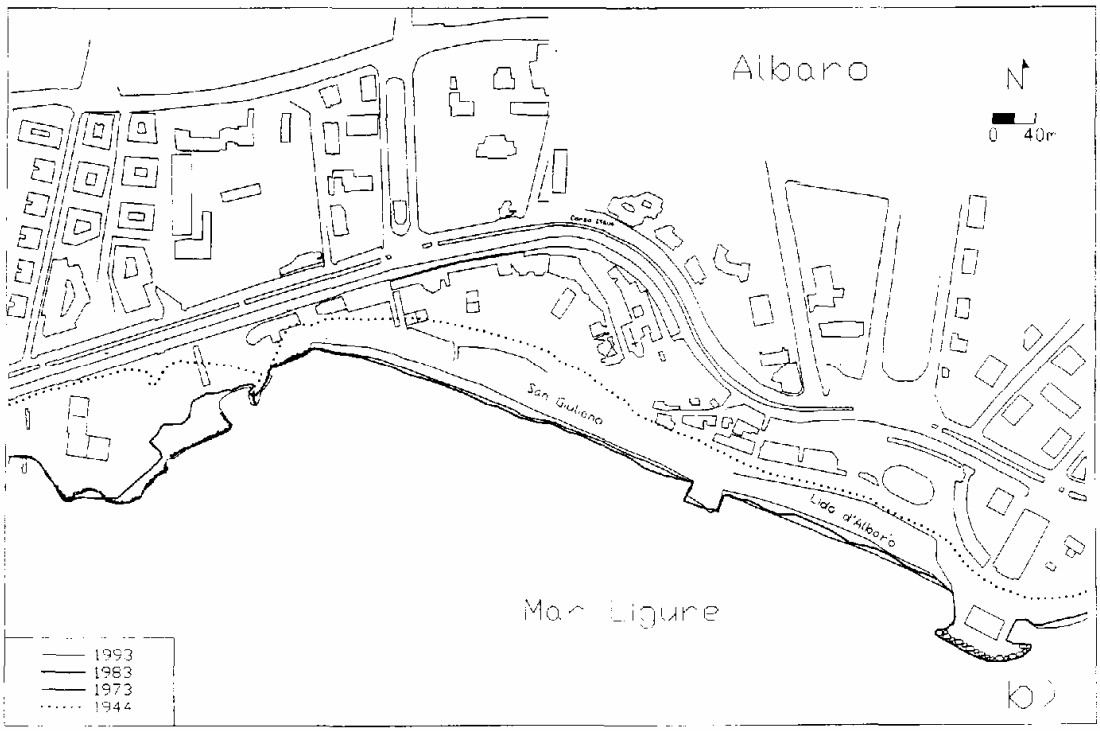

Fig. 3 - Litorale di San Giuliano e Lido di Albaro: variazioni della linea di riva dal 1944 ad oggi.

Il confronto delle immagini storiche e attuali, per la spiaggia di San Giuliano è emblematico e rispecchia una situazione comune a gran parte del litorale genovese di levante. L'occupazione intensiva del litorale da parte degli stabilimenti balneari aumenta gradatamente nel tempo fino alla situazione attuale dove, a fronte di una saturazione completa degli spazi, la spiaggia si attesta su posizioni molto più arretrate evidenziando gravi problemi di erosione, non essendo più massicciamente alimentata da versamenti artificiali.

4. CONCLUSIONI

Dall'analisi del litorale compreso nel Comune di Genova (da Vesima a Nervi) si evince come si presenti articolato e complesso e caratterizzato da una fascia costiera irregolare ove si alternano costa deposita e costa rocciosa e infrastrutture. Nel corso degli anni tutta la fascia costiera ha subito radicali cambiamenti imputabili essenzialmente all'antropizzazione, sempre più pressante per le esigenze di espansione economica e urbana della città. Questi cambiamenti, oltre a modificare il profilo naturale e la fruibilità dei settori coinvolti, hanno influenzato la tendenza evolutiva delle porzioni di costa adiacenti. La tendenza evolutiva dei due siti analizzati in dettaglio, Veltri (dalla fine dell'800) e Albaro (dai primi del '900) mostra come ci sia stata una trasformazione, soprattutto negli ultimi decenni, nelle destinazioni d'uso laddove il litorale non è stato

Fig. 4 – La spiaggia di San Giuliano: a) anni '20, b) anni '40, c) anni '60 e d) 1998.

occupato da infrastrutture troppo invasive.

Il caso del litorale di Veltri evidenzia, negli ultimi anni, un generale avanzamento della linea di costa, incremento determinato dalle discariche e soprattutto dallo sbarramento alla normale deriva litorale ad opera del molo del porto di Voltri.

Il litorale di Albaro, invece, è esempio di una costa rocciosa ove le piccole spiagge a tasca sono essenzialmente di origine artificiale e pertanto hanno risentito e risentono dell'intervento antropico. Infatti i diversi interventi, quali discariche, avvenute soprattutto a partire dal dopoguerra, e opere minori (ad esempio depuratori, piscine e strutture ricettive), ne hanno modificato profilo e tendenza. Il sito di Albaro presenta tutte le problematiche di un litorale in erosione che deve sopportare le richieste degli utenti per una fruibilità per le attività di tempo libero e balneazione, cercando di mantenere il suo profilo con ripascimenti artificiali.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano i Proff. Remo Terranova, Mauro Piccazzo e Pierluigi Brandolini per la disponibilità dimostrata e il prezioso contributo fornito.

BIBLIOGRAFIA

Ascari M., Baccino L. & Sanguineti G. 1937. Ricerche sulle variazioni delle spiagge italiane: Le spiagge della Riviera Ligure. C.N.R., Roma.

Brandolini P., Firpo M., Piccazzo M., Ramella A. & Terranova R. 1996. Osservazioni preliminari sull'evoluzione quaternaria dell'area del Porto Vecchio di Genova. *Il Quaternario, Italian Journal of Quaternary Sciences, 9* (1): 375-380.

Brandolini P., Ramella A. & Terranova R. 1992. Evoluzione geomorfologico-ambientale della fascia costiera tra Genova e Voltri a seguito degli interventi antropici. *Istituto della Enciclopedia Italiana:* 658-673.

Brandolini P., Ramella A. & Terranova R.1994. Caratteristiche geomorfologiche ed evoluzione recente della piana del T. Polcevera: rapporti con gli interventi antropici. *Il Quaternario,* 7 (1): 403-408.

Cabona D. & Terranova R. 1992. Le aree portuali nell'evoluzione della costa tra Genova e Voltri. Atti XXVI Congresso Geogr. It, Genova 4-9 maggio 1992.

Carobene L. & Firpo M. 1994. Riconoscimento di due antiche linee di riva in corrispondenza del nuovo svincolo autostradale di Genova-Voltri. *Il Quaternario,* 7: 299-302.

Cavallo C. 1995. Dinamica e tendenza evolutiva del litorale tra Varazze e Genova Voltri (Liguria Occidentale). Tesi di Dottorato VII Ciclo. Università di Trieste, 151 pp.

Parete L. 1846. Descrizione di Genova e del Genovesato: 1-36.

Rovereto G. 1939. Liguria Geologica. *Mem. Soc. Geol. It.,*2*:* 1-40.

Vinzoni M. 1983 (riedizione). Piante delle due riviere della Repubblica Serenissima. Ed. SAGEP, Genova.

Lavoro presentato al XIII Congresso A.I.O.L, Portonovo (Ancona), 28-30 settembre 1998

Atti Associazione Italiana Oceanologia Limnologia, 13 (2), pp. 289-296, luglio 2000

FIORITURA DI DIATOMEE NEL MARE DI ROSS NELL'ESTATE AUSTRALE 1998

Marina CABRINI, Bruno CATALETTO

Laboratorio di Biologia Marina, via Auguste Piccard, 54, 34010 Trieste

ABSTRACT

In the frame of CLIMA, an environmental and biological Italian project, in February 1998 during the oceanographic cruise in the western sector of Ross Sea was observed a monospecific bloom caused by *Fragilariopsis* cf. *cylindrus,* a diatom already observed in the same area. In Terranova Bay, in the coastal polynya red stripes with new ice extended on the surface water for about one kilometer. Physical and chemical parameters were measured in surface water and ice in order to identify phytoplankton community and to value particulate through coulter counter. This specific analysis determined a fraction corresponding to 113600 particulates for mi of the same sizes of pennate diatom. Also the analysis at the microscopy to determine phytoplankton confirmed with the count the high concentration of cells belonging to *Fragilariopsis* cf. *cylindrus,* prevalent diatom for 90% of total phytoplankton community. The relation between environmental factors and the summer bloom releaved for the first time in this area are here presented.

RIASSUNTO

Nell'ambito della campagna oceanografica effettuata dal progetto CLIMA riguardante principalmente l'oceanografia fisica integrata dalle componenti chimica, particellato organico ed .inorganico e dalla biologia, nel settore occidentale del Mare di Ross è stato riscontrato un bloom monospecifico causato da *Fragilariopsis* cf. *cylindrus,* diatonica già ritrovata nel Mare di Ross. Nel settore occidentale del Mare di Ross, in prossimità della polynya costiera della Baia di Terranova, nel febbraio 1998 sono state osservate strisce rossastre con ghiaccio di nuova formazione in superficie che si estendevano per più di un chilometro. Sono stati rilevati i parametri fisici, chimici e in superficie sono stati raccolti ghiaccio e acqua per la determinazione del fitoplancton e la valutazione del particellato al coulter counter; quest'ultima analisi aveva immediatamente rilevato una componente dominante corrispondente a 113600 particelle per ml di dimensioni riferibili alla diatonica pennata. Successivamente, al microscopio, il conteggio del preparato di fitoplancton confermava l'elevato valore della concentrazione delle cellule appartenenti al genere *Fragilariopsis* cf. *cylindrus,* dominante per il 90% la comunità microfitoplanctonica osservata. Vengono presentate le relazioni tra i parametri ambientali ed il fenomeno di fioritura estiva rilevato per la prima volta in quest'area.

1. INTRODUZIONE

Nel Mare di Ross la biomassa fitoplanctonica presenta una eterogeneità spaziale molto ampia, come dimostrato da diversi Autori per quell'area, e, più in generale, in tutto l'Oceano Antartico (Smith *et al.,* 1990; Innamorati *et al.,* 1990 e 1992a). La dinamica temporale dei popolamenti fitoplanctonici durante il periodo estivo in Antartide non è stata ancora chiarita, a causa della scarsità dei dati disponibili raccolti sempre su ampie scale temporali, anche se si può sostenere la possibilità di una doppia fioritura nelle acque costiere del Mare di Ross occidentale (Innamorati *et al.,* 1992b).

Nel settore sud-occidentale del Mare di Ross, tra Drygalsky Tongue e Ross Ice Shelf, la distribuzione e la composizione del fitoplancton è stata studiata in relazione alle masse d'acqua nell'ambito della campagna oceanografica del progetto CLIMA effettuata durante la primavera e l'estate australe 1997-1998. Durante il secondo leg (gennaio- marzo 1998), il 9 febbraio 1998 nell'arca della polynya costiera della Baia di Terranova in prossimità della stazione 135 (lat. 75°01.90' S e long. 164°09.55' E, profondità 838 m) (Fig. 1), sono state osservate strisce rossastre con ghiaccio di nuova formazione che si estendevano per più di un chilometro sulla superficie del mare (Fig. 2).

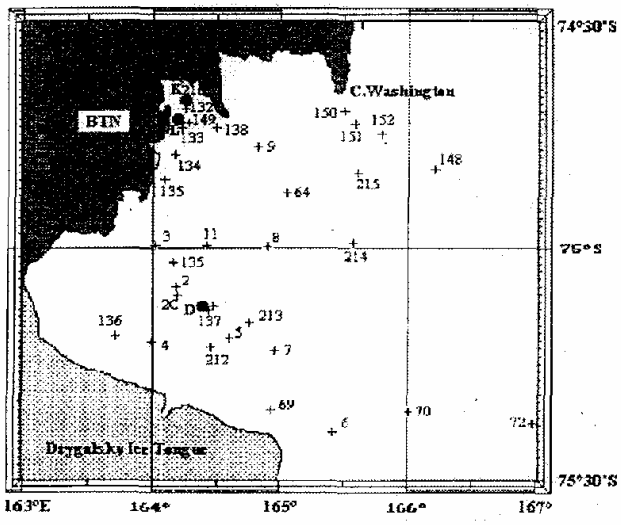

Fig. 1 - Posizione delle stazioni di campionamento nell'area di polynya nel Mare di Ross. Le strisce rossastre di ghiaccio si estendevano tra le stazioni 134 e 135.

Il colore rosso brunastro del ghiaccio era dovuto all'abbondanza di *Fragilariopsis* cf. *cylindrus* (Fig. 3), diatomea dominante la comunità fitoplanctonica estiva e già ritrovata nel Mare di Ross (Leventer & Dunbar, 1996; Marino & Cabrini, 1997). In questo lavoro vengono considerate le condizioni ambientali e, in particolare la struttura morfologica della diatomea responsabile della vistosa colorazione del ghiaccio.

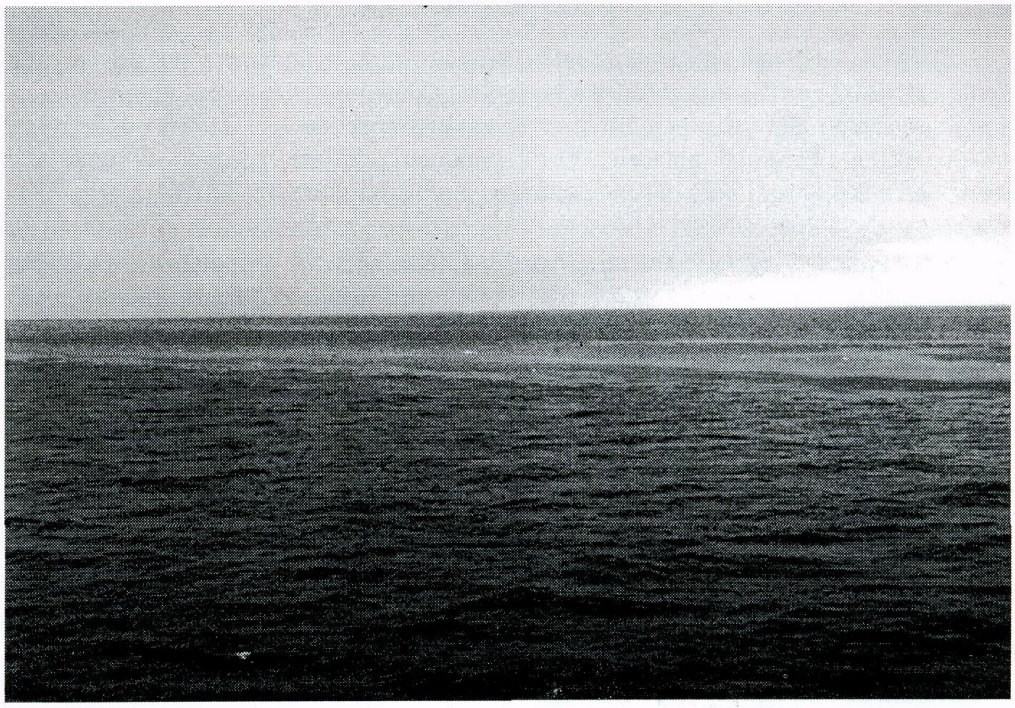

Fig. 2 - Sulla superficie marina sono visibili le strisce rossastre di ghiaccio comprendente la fioritura monospecifica di *Fragilariopsis* cf. *cylindrus*.

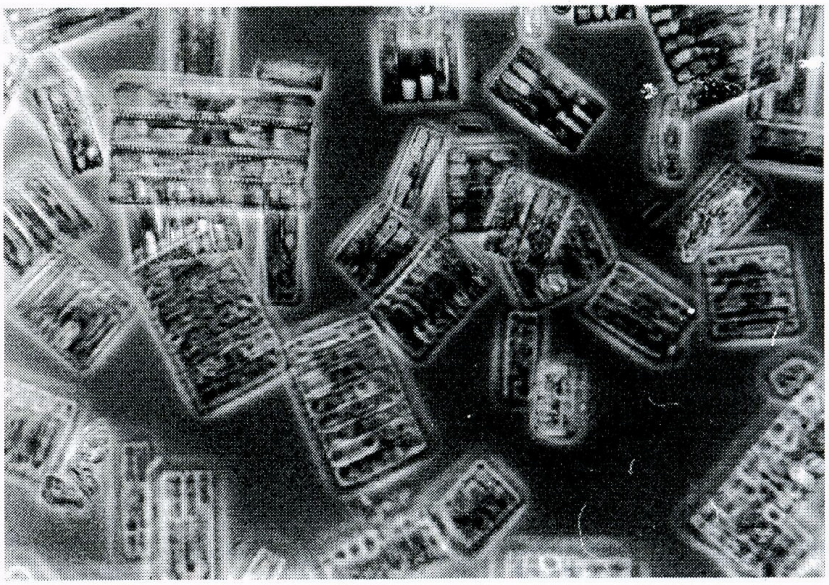

Fig. 3 - *Fragilariopsis* cf. *cylindrus* fotografata al microscopio ottico rovesciato a contrasto di fase a 320X ingrandimenti.

2. MATERIALI E METODI

Il ghiaccio di nuova formazione fu raccolto, fatto sciogliere e furono preparati alcuni campioni per l'analisi chimica e biologica. Contemporaneamente alla raccolta dei campioni furono rilevati i parametri strumentali (temperatura e salinità) nelle acque prospicienti e libere dal ghiaccio. Tra i parametri chimici, secondo il metodo di Strickland e Parsons (1972), furono analizzati i seguenti nutrienti: Si, PO_4, NH_3, NO_3, NO_2.

L'ossigeno disciolto fu determinato con il metodo di Winkler (Strickland & Parsons, 1972), mentre la clorofilla a ed i feopigmenti furono misurati mediante analisi spettrofluorimetrica secondo Lorenzen e Jeffrey (1980). L'analisi sul materiale particolato sospeso fu eseguita mediante un Coulter Counter Multisizer II e, per l'elaborazione dei dati, fu associata ad un programma AccuComp®.

La determinazione ed il conteggio delle cellule fitoplanctoniche furono eseguiti in accordo con il metodo di Utermöhl (Zingone *et al.,* 1990) sia nel ghiaccio sia lungo la colonna d'acqua.

3. RISULTATI E CONCLUSIONI

In superficie l'acqua in prossimità del ghiaccio presentava una temperatura di -1.7°C ed una salinità di circa 34.2 PSU, mentre al fondo venivano rilevate una temperatura ed una salinità rispettivamente di -1.9°C e 34.9 PSU.

Dall'andamento dei nutrienti si osservava che la distribuzione verticale presentava alti valori di silicati tra i 60.98 e 77.56 µmoli l^{-1} e nitrati (20.90-28.37 µmoli l^{-1}), i fosfati raggiungevano al massimo 2.48 µmoli l^{-1} mentre NH_3 e NO_2 rimanevano sempre molto scarsi, al di sotto di 0.2 µmoli L^{-1}. L'ossigeno disciolto era abbastanza costante lungo la colonna d'acqua, oscillando tra il massimo di 10.88 mg l^{-1} rilevato in superficie e 9.72 mg l^{-1} alla profondità di 810 m (Tab.l).

Tab. 1 - Dati relativi ai nutrienti della stazione 135 alle rispettive quote.

Superficie	61.41	1.75	0.18	20.9	0.12	10.88
30 m	69.27	2.33	0.18	27.33	0.12	9.54
100 m	74.51	2.47	0.04	28.34	0.05	9.57
500 m	60.98	2.14	0.07	24.47	<D.L.	9.57
810 m	77.56	2.48	0.11	28.37	0.02	9.72

Dalle analisi dei pigmenti venivano rilevate le concentrazioni in assoluto più elevate, per il periodo considerato, sia di clorofilla a. 25.664 µg l^{-1} che di feopigmenti 147.244 µg l^{-1}, valori di due e tre ordini di grandezza più grandi delle concentrazioni

riscontrate nelle stazioni dell'area monitorata in presenza di polynya (De Vittor *et al.,* stesso volume). Le abbondanze della clorofilla e dei feopigmenti erano dovute quasi completamente a *Fragilariopsis* cf. *cylindrus* che contiene clorofilla a e e, betacarotene e, tra i feopigmenti, fucoxantina, diatoxantina e diadinoxantina. L'eccezionale abbondanza della concentrazione dei feopigmenti era da attribuirsi alle numerose cellule senescenti presenti nel campione.
Dalla caratterizzazione quantitativa e qualitativa del materiale particolato sospeso fu rilevata una componente dominante corrispondente a 113600 particelle per mi di dimensioni comprese tra 1.5 e 3.5 µm di diametro, misure riferibili alle dimensioni dell'asse transapicale della diatomea pennata (Hasle & Syvertsen, 1996), responsabile della fioritura, e di gran lunga superiori alle altre misure del particellato sospeso (Fig. 4).

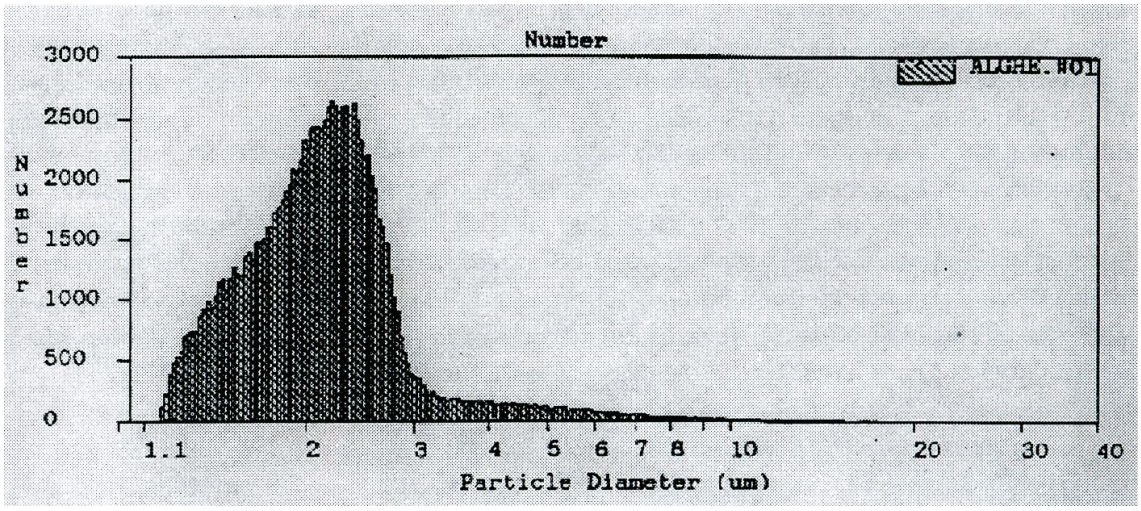

Fig. 4-11 tracciato del Coulter Counter riporta il numero di particelle corrispondente a 113600 per mi di diametro compreso tra 1.5-3 µm.

Nel ghiaccio, dalla determinazione dei taxa (Balech, 1976; Priddle & Fryxell, 1985; Medlin & Priddle 1990; Heimdal, 1993; Throndsen, 1993; Hasle & Syversten, 1996; Steidinger, 1996) la comunità superficiale risultava costituita per circa il 10% dalle seguenti diatomee: *Pseudo-nitzschia seriata, P. delicatissima, Chaetoceros* sp., *Coscinodiscus* sp., *Cylindrotheca closterium* ed alcune specie di diatomee non determinate, specie già osservate precedentemente (Marino & Cabrini, 1997), mentre il 90% era sostenuto da *Fragilariopsis cf. cylindrus* (Fig. 3). Questa specie era presente con 548.650.000 cellule l^{-1}, valore eccezionalmente alto se si considera che, mediamente, le concentrazioni più elevate della comunità fitoplanctonica osservate in questa campagna non superano il milione di cellule l^{-1}. Infatti nell'acqua libera dal ghiaccio le concentrazioni totali del microfitoplancton rilevate a 0 m, 30 m e 100 m non superavano le 400.000 cellule l^{-1}.

Il genere *Fragilariopsis* è tipico della primavera ed estate australe ed è stato osservato nella comunità delle acque del Mare di Weddell (Socal *et al,* 1997) e, nel Mare di Ross, nella parte centro meridionale (Leventer & Dunbar, 1996) e in quella

occidentale (Lazzara & Nuccio, 1994). La presenza di *Fragilariopsis* viene rilevata dalla fine di dicembre all'inizio di gennaio e si mantiene fino alla fine dell'estate, con una composizione specifica variabile. *Fragilariopsis* cf. *cylindrus,* in particolare, viene osservata durante tutta la stagione ma preferibilmente le concentrazioni più elevate si registrano in febbraio, in concomitanza ad una notevole disponibilità di nitrati (Kristiansen *et al.*, 1998).

In conclusione, anche l'episodio della fioritura nel "ghiaccio nuovo" di *Fragilariopsis* cf. *cylindrus,* rilevata nel Mare di Ross, conferma la dominanza di questa diatomea nella comunità fitoplanctonica tipica dell'estate australe anche nella parte occidentale del Mare di Ross. L'eccezionale fioritura è stata riscontrata soltanto nel ghiaccio superficiale di nuova formazione, mentre lungo la colonna d'acqua le diatomee non erano dominanti e presentavano valori molto più bassi. *Fragilariopsis* è tra i generi caratterizzanti il popolamento simpagico, che appare allo scioglimento dei ghiacci nella prima fioritura all'inizio dell'estate, come osservato da Lazzara e Nuccio (1994). L'innesco del suo sviluppo è sicuramente dovuto alla disponibilità di luce e di nutrienti, quali i nitrati e silicati in particolare, ma quello che resta da capire è la dinamica fisiologica che favorisce una diatomea sulle altre. Il confronto dei dati biologici con il particellato rivela come la composizione delle particelle sospese riscontrate sia di origine prevalentemente fitoplanctonica. Questi risultati confermano l'importanza che il ghiaccio marino assume nei cicli biogeochimici e nella dinamica trofica dell'ecosistema antartico, a seguito dell'accumulo delle microalghe inglobate, in questo caso monospecifiche, poiché nella stagione invernale rappresentano l'unico nutrimento per i consumatori ai primi livelli.

RINGRAZIAMENTI

Il presente studio è stato realizzato nell'ambito del Progetto Nazionale Ricerche in Antartide (PNRA). Gli Autori desiderano ringraziare il prof. Giancarlo Spezie e il prof. Enrico Zambianchi, per aver messo a disposizione i dati CTD, la dr.ssa Paola Rivaro e la sig.ra Cinzia Bottinelli, per le analisi dei nutrienti e dell'ossigeno disciolto, il dr. Sergio Tucci e il dr. Marco Cappello, per i dati relativi al particellato sospeso, il dr. Luigi Rovito, per l'elaborazione della mappa delle stazioni, gli ufficiali e l'equipaggio della Nave Oceanografica Italica.

BIBLIOGRAFIA

Balech L. 1976. Clave ilustrada de dinollagelados antarticos. Instituto Antartico Argentino Direccion Nacional de Antartico. Pubbl. IAA 11, 99 pp.

De Vittor C., Cabrini M., Crcvatin E. & Fonda Umani S. 2000. Distribuzione della clorofilla nella polynya del Mare di Ross nell'estate australe 1997-98. Atti A.I.O.L., XJII (2): stesso volume.

Hasle G.R. & Syvertsen E. 1996. Marine diatoms. In: Identifying marine diatoms and dinoflagellates (Tomas C.R. ed.). Academic Press, San Diego, 385 pp.

Heimdal B.R. 1993. Modern coccolithophorids. In: Marine Phytoplankton. A guide to naked flagellates and coccolithophorids (Thomas C.R. ed.). Academic Press, San Diego: 147-263.

Innamorati M., Lazzara L., Massi L., Mori G., Nuccio C. & Saggiomo V. 1992a. Indagine sulla biomassa fitoplanctonica nel Mare di Ross in relazione ai fattori ambientali. In: Oceanografia in Antartide (Gallardo V.A., Ferretti O. & Moyano H.I. eds.), Atti Seminario Internazionale, Concepcion, Cile, 7-9 marzo 1991, HNEA-Centro EULA (Cile): 235-252.

Innamorati M., Lazzara L., Mori G., Nuccio C. & Saggiomo V. 1992b. Spatial and temporal distributions of phytoplankton size fractions in Antarctic waters: biomass and production, summer 1989/90. Atti A.I.O.L., IX: 605-612.

Innamorati M., Mori G., Lazzara L. & Vanucci S. 1990. Eutrofia ed oligotrofia nell'Oceano Antartico. *Oebalia,* XVl-l: 153-162.

Kristiansen S., Farbrot T., Kuosa H., Myklestad S. & von Quillfeldt C.H. 1998. Nitrogen uptake in the infiltration community, an ice algal community in Antarctic pack-ice. *Polar Biol.,* 19 (5): 307-315.

Lazzara L. & Nuccio C. 1994. Relazioni tra particellato, biomassa e popolamenti fitoplanctonici nel Mare di Ross durante la fioritura estiva. Atti A.I.O.L., X: 655-665.

Leventer A. & Dunbar R.B. 1996. Factors influencing the distribution of diatoms and other algae in the Ross Sea. *J. Geophys. Res. C. Oceans,* 101 (8): 18489-18500.

Lorenzen C.J. & Jeffrey S.W. 1980. Determination of chlorophyll in seawater. SCOR-UNESCO. *Technical Papers in Marine Science,* 35: 1-20.

Marino D. & Cabrini M. 1997. Distribution and succession of phytoplankton population in the Ross Sea (Antarctica) during the austral spring 1994. In: Rossmize (Ross Sea Marginai Ice Zone Ecology) 1993-1995 (Faranda F.M., Guglielmo L. & Povero P. eds.). *Data Report Pari I., Nat. Progr. Ant. Res.:* 307-341.

Medlin L.K. & Priddle J. 1990. Polar marine diatoms. British Antarctic Survey. Natural Enviromnent Research Council, University Press, Cambridge, 214 pp.

Priddle J. & Fryxell G. 1985. Handbook of the common plankton diatoms of the Southern Ocean: centrales except the genus *Thalassiosira.* British Antarctic Survey. Natural Environment Research Council, University Press, Cambridge: 159pp.

Smith W.O. Jr., Kelly H.P. & Rich J.H. 1990. Chlorophyll distribution and primary productivity in the Ross Sea, austral summer 1990. *Ant. Jour.,* U.S. 25 (5): 179-182.

Socal G., Nöthig E.M., Bianchi F., Boldrin A., Mathot S. & Rabitti S. 1997. Phytoplankton and particulate matter at the Weddell/Scotia Confluence (47°W) in summer 1989, as a final step of a temporal succession (EPOS Project). *Polar Biol.* 18: 1-9.

Steidinger K.A. 1996. Dinoflagellates. In: Identifying marine diatoms and dino-flagellates (Tomas C.R. ed.). Academic Press, San Diego: 387-598.

Strickland J.D.H. & Parsons T.R. 1972. A practical handbook of. seawater analysis. Ottawa 2nd edn. *Fish Res. Board Can. Bull.,* 167 pp.

Throndsen J. 1993. The planktonic marine flagellates. In: Marine Phytoplankton. A guide to naked flagellates and coccolithophorids (Thomas C.R. ed.). Academic Press, San Diego: 7-145.

Utermöhl H. 1958. Zur Vervollkommnung der quantitativen Phytoplankton-Methodik. *Min. Int. Ver. Limnol., 9:* 1-38.

Zingone A. Honsell G., Marino D., Montresor M. & Socal G. 1990. Fitoplancton. In: Metodi nell'Ecologia del Plancton Marino (Innamorati M., Ferrari I., Marino D. & Ribera d'Alcalà M. eds.). *Nova Thalassia,* 11: 183-198.

Lavoro presentato al XIII Congresso A.I.O.L, Portonovo (Ancona), 28-30 settembre 1998

Atti Associazione Italiana Oceanologia Limnologia, 13 (2), pp. 297-306, luglio 2000

BIVALVE RECRUITMENT EVENTS IN A SOFT-BOTTOM MACROBENTHIC COMMUNITY: MICRO AND MACRO-SCALE ANALYSIS

Anabella COVAZZI HARRIAGUE[1], Mariachiara CHIANTORE[1], Simonetta FRASCHETTI[2], Giancarlo ALBERTELLI[1]

[1]Dipartimento per lo Studio del Territorio e delle sue Risorse, Università di Genova
[2]Dipartimento di Biologia, Università di Lecce

ABSTRACT

Univariate, distributional and multivariate analysis techniques were applied to a coastal sandy-bottom macrobenthic community, located in a long-term monitored site (Ligurian Sea) where samples were collected from March 1990 to February 1995. Herein the macrobenthic community is characterised by seasonal fluctuations of the bivalve *Spisula subtruncata,* whose recruitment shows wide interannual variations. The aim of the study was to analyse bivalve recruitment on different lime scales. During the study period a marked temporal macro-scale variability of abundance was observed. evidencing the recruitment events, taking place in March and late May 1991 and June 1993. Significant differences were evidenced between the recruitment events. despite the overall similarity (comparable H' and J values), applying multivariate analysis to the single replicates.
Key words: *Soft-bottom. macrobenthic community. bivalve recruitment. interannual fluctuations*

RIASSUNTO

Sono state utilizzate tecniche di analisi uni-, multivariata e distribuzionale per lo studio di una comunità macrobentonica costiera di fondo molle, presso una stazione ubicata in Mar Ligure, oggetto di uno studio pluriennale (Marzo 1990-Febbraio 1995). La comunità studiata è caratterizzata da variazioni stagionali della densità del bivalve *Spisula subtruncata,* il cui reclutamento mostra ampie variazioni interannuali. Scopo di questo lavoro e stato quello di analizzare il fenomeno del reclutamento di tale bivalve a breve e lungo termine. Tali eventi di reclutamento determinano rilevanti modificazioni quali e quantitative nella struttura della comunità evidenti su scala pluriennale. Differenze significative tra i singoli eventi di reclutamento, nel complesso apparentemente simili (comparabili valori di H' e J), sono state evidenziate attraverso l'analisi multivariata condotta sulle singole repliche.

1. INTRODUCTION

Recently, one of the main problems of ecology is related lo the temporal and spatial scale of variation in marine environment. Variability of population and community abundance is a typical feature of marine benthic ecosystems at a variety of temporal scales. Climatic factors are believed to be responsible for many aspects of temporal variability of marine communities (Bianchi, 1997) but also the quite different life cycles and biotic interactions of their constituting species have to be taken into account (Caswell, 1982).

Notwithstanding a number of studies have pointed out the importance of long-term data sets in understanding the variability of natural marine systems, few data have been published on this topic in the Mediterranean Sea (Ambrogi *et al.,* 1990; De Biasi, 1994: De Biasi & Bianchi, 1996; De Biasi, 1997, Fraschetti *et al.,* 1997). Multivariate techniques have been applied in this field, as in the last decades they turned out good devices for evidencing community changes in lime and space, mainly linked to environmental gradients and pollution (Ibanez & Dauvin, 1988; Gray *et al.,* 1990; Warwick & Clarke. 1991; Clarke, 1993: Papathanassiou & Tenetos, 1993), but also to evidence natural fluctuations and benthic community distribution (Gray *et al.,* 1988; Austen & Warwick. 1989; San Vicente *et al,* 1997; Sahade *et al.* 1998).

The aim of this study was to evaluate changes in a sandy macrobenthic community on a short (seasonal) and long (interannual) temporal scale, stressing similarities and dissimilarities in the community structure and focusing the attention on the recruitment effects of the bivalve *Spisula subtruncata* on the assemblage as a whole.

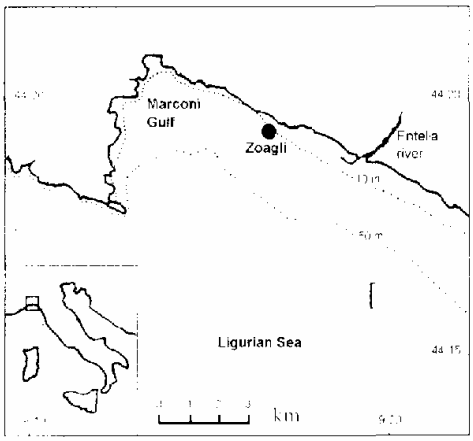

Fig. 1 - Study area.

2. MATERIALS AND METHODS

The study was carried out on a sandy bottom station, located near Zoagli (Ligurian Sea) at 10 m depth (Fig. 1). Samples were collected monthly (bi-monthly in spring months) by SCUBA divers, using a suction device, between March 1990 and February 1992 and from March 1993 lo February 1995. Five to ten replicate samples (each replicate collected each lime randomly, using a net with a 1 min mesh size. Each macrofauna replicate was preserved in 10% buffered formaline, sorted and specimens of all taxa were identified at species level.

Diversity (Shannon & Weaver, 1963) and evenness (Pielou, 1966)

indices were calculated. K-dominance curves (Lambshead *et al.,* 1983) were plotted for each spring period. Finally, cluster analysis using the Bray & Curtis (1957) similarity index was performed on double square root transformed data, removing species with percent abundance lower than 3%, using PRIMER programme of the Plymouth Marine Laboratory. Cluster analysis was performed on the monthly data of the two study periods and on the single replicate data of samples collected in the spring months, in order to evidence spatial uniformity. The individual contribution of the species to the total dissimilarity was assessed with the R-rhode analysis (Clarke, 1993).

3. RESULTS

Macrobenthic community showed wide seasonal and interannual density fluctuations, mainly related to the population dynamic of the bivalve *Spisula subtruncata* (Fig. 2a and b). In the study period *S. subtruncata* recruitment occurred with quite different success. During 1990 no recruitment at all did take place, while two consecutive settlements were observed during 1991 (March and May2).

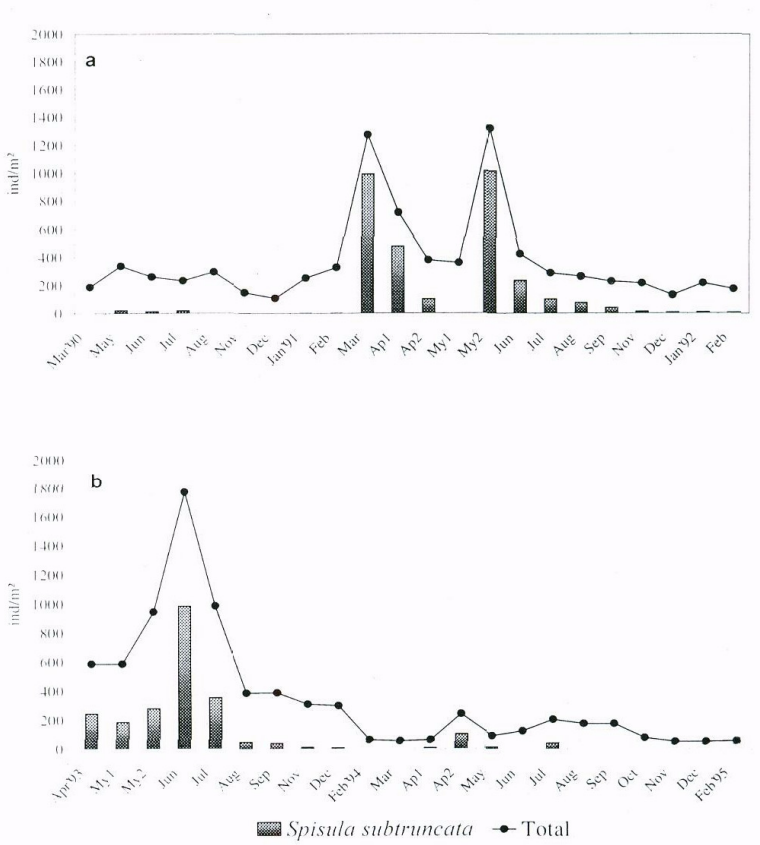

Fig. 2 - Macrobenthic community and *Spisula subtruncata* density trends (ind/m²). a: 1990-1992, b: 1993-1994.

A single settlement was observed during 1993 and finally a lack of recruitment in 1994. In the first period (Fig. 2a) macrobenthic community density reached minimum value at December 1990 (106 ind/m^2) and maximum value at the end of May 1991 (1319 ind/m^2) In the second one (Fig. 2b) the maximum was observed in June 1993 (1771 ind/m^2) and minimum in November 1994 (50 ind/m^2). The influence of the recruitment on the community structure was highlighted by the evenness index (Fig. 3a and b), showing minimum values when the recruitment events were observed (0.3 in March and May2 1991 and 0.5 is June 1993).

The comparison of the community structure between spring months with the k-dominance curves stressed the strong numerical dominance of this bivalve during recruitment (Fig. 4a - March, May2: percentage dominance of *S. subtruncata* 78 and 77.2 % respectively; Fig. 4b - June 1993: 55.7 %). In general no numerical dominance was observed in spring months, when the bivalve recruitment failed (Tab. 1).

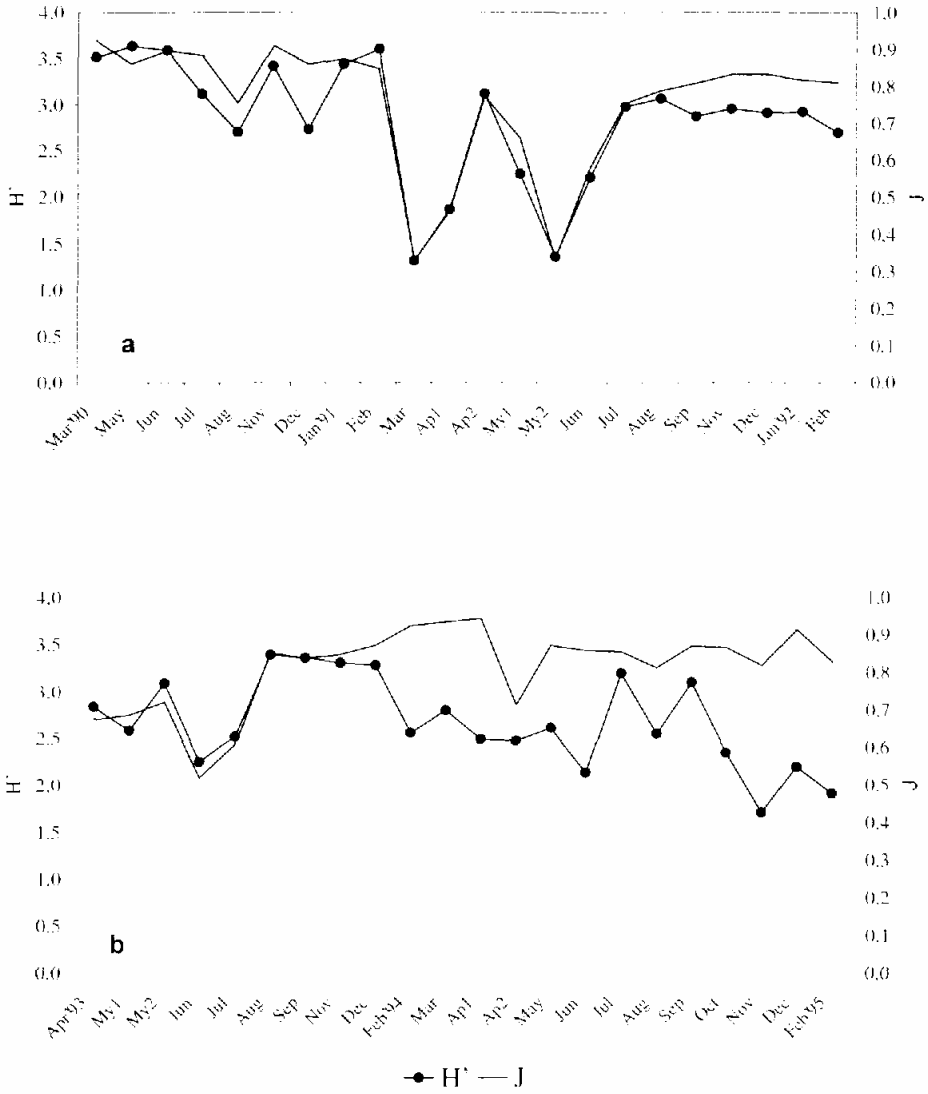

Fig.. 3 - H' and J trends. a: 1990 1992. h: 1993-1994.

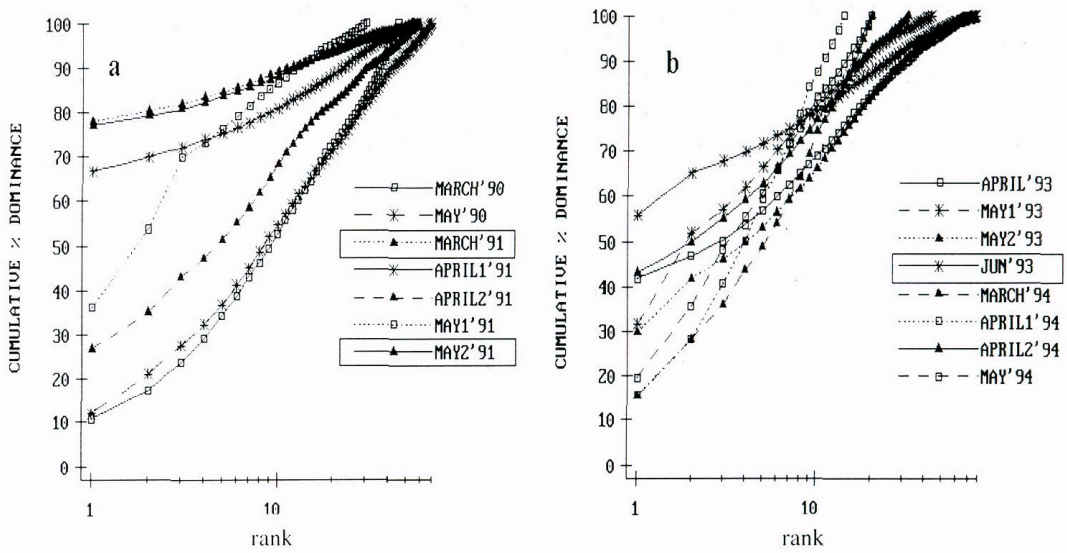

Fig. 4 - k-dominance curves plotted with density values of spring months. a: 1990-1992, b: 1993-1994.

Tab. 1 - Numerical dominance (%) of discriminating species in the spring months.

	Spisula subtruncata	*Acrocnida brachiata*	*Scolaricia typica*	*Siphonoecetes dellavallei*	*Lucinella divaricata*	*Thracia papyracea*
March'90		10.8	6.5	3.2	1.1	
May'90	6.3	4.5	1.5	3.7	0.4	
March'91	78.0		0.2	0.6	2.4	0.2
April1'91	66.7	1.2	3.2	1.0	1.0	
April2'91	26.8	4.2	8.3	1.5	0.4	
May1'91		3.2	0.5	36.1		
May2'91	77.2	1.6	1.5	2.0	0.4	0.1
April'93	41.7	3.2	2.0	2.7	2.0	3.4
May1'93	31.6	3.9	1.0	4.4	5.1	20.2
May2'93	29.8	2.4	0.8	0.9		12.0
June'93	55.7	1.5	1.9	0.6	1.0	9.4
March'94			2.6	5.1		
April1'94	15.6					
April2'94	43.2	3.6	1.2	6.5		
May'94	16.1	5.4		12.5		

Cluster analysis applied on monthly data of the whole data set (Fig. 5) showed a clear clustering of the different years. A central group is composed by months of the two years in which recruitment took place (B) and three other groups are composed by 1990 (A) and 1994 (C-I)) months, respectively. Within each year a spring-summer group may

be evidenced (a, b, c e d for the years 1990, 1991, 1993 and 1994 respectively). The key discriminating species for the clustering of the different years and seasons was *S. subtruncata* (Tab. 2).

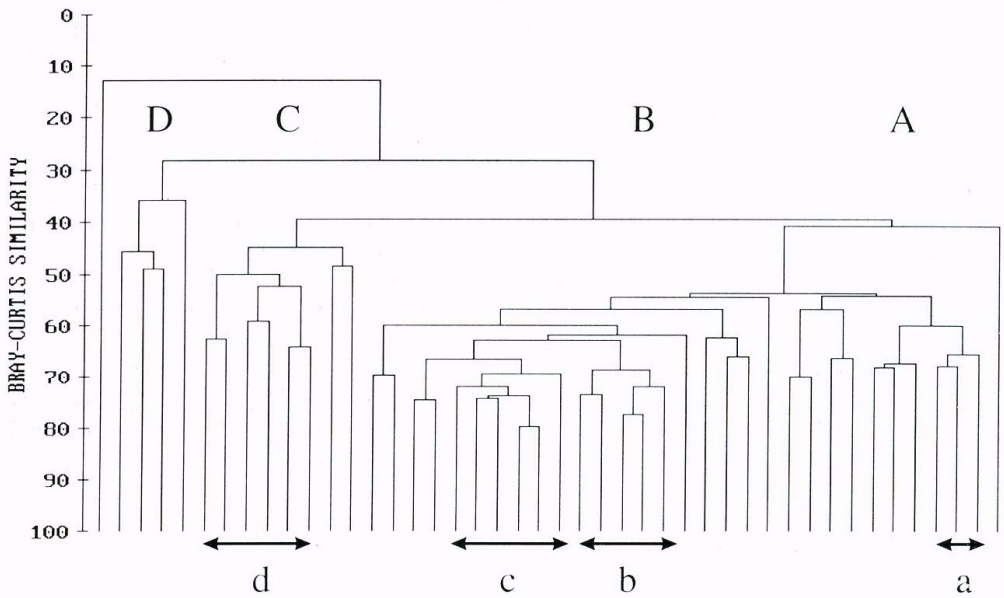

Fig. 5 - Cluster representing the average data of the whole study period.

Tab. 2 - Percent contribute of discriminating species to the dissimilarity between groups of stations.

	A *vs* B	A+B *vs* C	A+B+C *vs* D
Average dissimilarity between groups	53.4	67.4	75.3
Contribute of discriminating species:			
Spisula subtruncata	12.95	9.60	8.57
Acrocnida brachiata			3.49
Scolaricia typica		2.95	4.27
Siphonoecetes dellavallei	2.83	4.01	3.88
Lucinella divaricata	3.57	3.59	3.53
Paradoneis armata	2.61		
Bathyporeia guilliamsoniana		3.82	
Gastrosaccus sanctus		3.14	
Thracia papyracea	3.13		

Cluster analysis applied on each replicate sample of the spring periods (Fig. 6) displayed a notable uniformity of each sampling date, confirming the spatial uniformity of the populations and, at the same lime, the differences existing in the community structure, independent of .S. *subtruncata* numerical dominance. Inside the spring months

group, successful recruitment months constituted group 2, while unsuccessful ones were subdivided into groups 1 (spring 1990) and 3 (spring 1994).

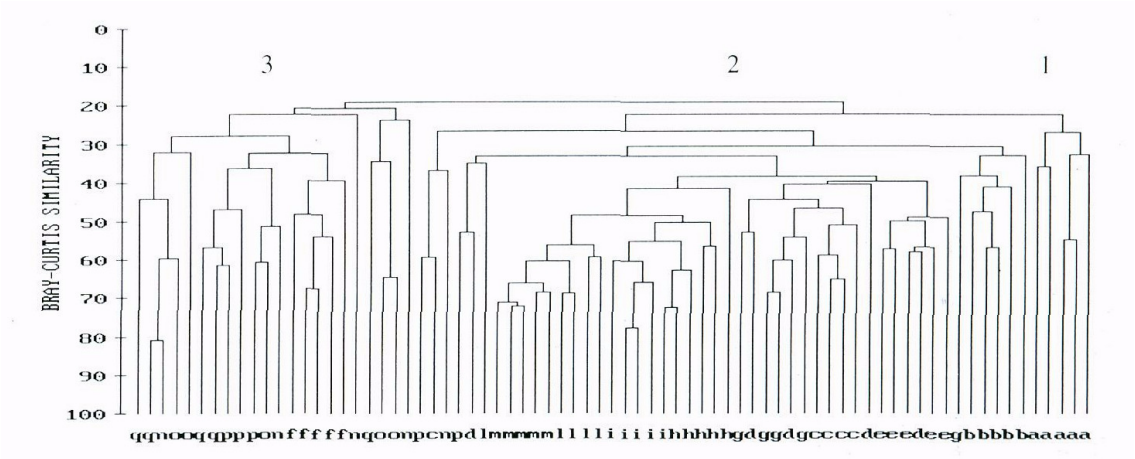

Fig. 6 - Cluster representing all replicates of the spring months for the four years considered. Where a: March 1940. h: May 1990. e: March 1991. ci: April 1991. e: April2 1991. f: May1 1991, g: May2 1991, h: April 1993. i: May1 1993. l: May2 1993. m: June 1993. n: March 1994. o: April1 1994, p: April2 1994. q: May 1994.

4. DISCUSSION AND CONCLUSIONS

The problem of the temporal variability has been widely addressed both at population and at community level in different environments, highlighting that seasonal and interannual fluctuations in abundances and/or composition of species are very common in nature (Brazeiro & Defeo, 1996; Pearson & Mannvik, 1998; Sala *et al.,* 1998; Jackson & Jones, 1999).

In our case, the macrobenthic community shows a strong variability, in both the considered temporal scale: seasonal and interannual, in terms of density and structure.

Seasonal variations were observed in all the considered years. In fact, spring months every year are isolated from the others as results in the cluster analysis. In general, this seasonality is due to a spring increase, both in term of number of individuals and species richness. In particular, the seasonality was more evident in the two years (spring 1991 and 1993) when the recruitment of the bivalve *S. subtruncata* took place successfully (Fig. 2) and the community was characterised by a particularly high abundance and species richness. This confirms the important role of the bivalve *S. subtruncata* in the dynamic of littoral macrobenthic communities (Masse, 1972; Cattaneo & Masse, 1983; Ambrogi & Occhipinti-Ambrogi, 1985 e 1987; Albertelli & Fabiano. 1990; Albertelli & Fraschetti, 1992; Albertelli *et al.,* 1993 e 1994; De Biasi & Bianchi. 1996; Fraschetti *et al.,* 1997).

Similarly. strong interannual variations in density values (Fig. 2) and community composition were observed between years with or without recruitment. In fact, cluster analysis (Fig. 51 shows a central group (B) representing years with successful recruitment. separate to the others (groups A and C-D), and the discriminating species

was *S. subtruncata.*

Comparing the two years when bivalve recruitment took place successfully, macrohenthic community showed marked differences in terms of abundance values and community structure. In fact, the trends of H' and J stressed a marked decrease in concomitance with recruitment months of 1991, showing quite similar values in March and late May (Fig. 3a) when the bivalve dominated (Fig. 4a). Conversely, in the second study period, notwithstanding quite similar average density values of S. *subtruncata* during recruitment, H' and J did not show such decrease (Fig. 3b), because of the rather lower dominance of the bivalve on the whole community (Fig. 2b; Fig. 4b).

The success of *S. subtruncata* recruitment plays an important role in the community structure in terms of density, species richness and diversity (De Diasi, 1994). Yet, the link between community structure and bivalve recruitment does not follow a completely repeatable pattern each year. In fact, the recruitment months constitute a clear group in cluster analysis (Fig. 5), but each recruitment event presents particular features that make it stand apart from the others, both in terms of average data and of single replicates (Figg. 5-6). Consequently, the community consists of a nucleus of permanent species *(Nephtys cirrosa, Prionospio caspersi, Scolaricia typica, Diogenes pugilator, Bathvporeia guilliamsoniana, Perioculodes longimanus, Siphonoecetes dellavallei, Urothoe pulchella, Acrocnida brachiata, Echinocardium cordatum),* representing the persistent component of the community structure and of a group of species (eventually different from year to year in terms of composition or abundance), following *S. subtrucata* (among which the bivalves *Lucinella divaricata* and *Thracia papyracea)* and representing the resilient component of the community (De Biasi, 1994).

From our results we can conclude that: a) the macrobenthic community is composed of "permanent" species which are present on the whole studied period and "opportunistic" species present when environmental features are propitious (es. food availability). b) the wideness of the variability is linked to the success of the spring recruitment of the bivalve .S. *subtruncata.*

REFERENCES

Albertelli C., Bonomi A., Covazzi A., Della Croce N. & Fraschetti S. 1993. Macrobentos y parámetros ambientales en fondos arenosos del Mar de Liguria, Italia. *Publ. Espec. Inst. Esp. Oceanogr.,* I 1: 305-312.

Alhertelli G., Chiantore M. & Fraschetti S. 1994. A one-year study of a sandy bottom community: seasonal fluctuations compared to a previous sampling period. *Atti X A.I.O.L.:* 529-542.

Albertelli G. & Fabiano M. 1990. Caratteristiche trofiche di una stazione costiera in Mar Ligure. Atti Vili A.I.O.L: 59-66.

Albertelli G. & Fraschetti S. 1992. Observations on the structure of three communities of the continental shelf in the Ligurian Sea. Atti IX A.I.O.L.: 351-362.

Ambrogi R. & Occhipinti-Ambrogi A. 1985. The estimation f secondary production of the marine bivalve *Spisula subtruncata* (da Costa) in the area of the Po river delta. *P.S.Z.X.1: Mar. Ecol.,* 6 (3): 239-250.

Ambrogi R. & Occhipinti-Ambrogi A. 1987. Temporal variations of secondary production in the marine bivalve *Spisula subtruncata* off the Po river delta (Italy). *Estuar. Coast. Shelf Sci.,* 25: 369-379.

Ambrogi R.. Bedulli D. & Zurlini G. 1990. Spatial and temporal patterns in structure of macrobenthic assemblages. A three-year study in the northern Adriatic Sea in front of the Po river delta. *P.S.Z.N.I: Mar. Ecol.,* 11 (I): 25-41.

Austen M.C. & Warwick R.M. 1989. Comparison of univariate and multivariate aspects of estuarine meiobenthic community structure. *Estuar. Coast. Shelf. Sci.,* 29: 23-42.

Bianchi C.N. 1997. Climatic change and biological response in the marine benthos. Atti XII A.I.O.L.: 3-20.

Bray J.R. & Curtis J.T. 1957. An ordination of the upland forest community in Southern Wisconsin. *Ecol. Monog.,* 27: 325-349.

Brazeiro A. & Defeo O. 1996. Macroinfauna zonation in microtidal sandy beaches: Is it possible to identify patterns in such variable environments?. *Estuar. Coast. Shelf Sci.,* 42: 523-536.

Caswell H. 1982. Life history theory and the equilibrium status of populations. *Am. Nat.*, 120 (3): 317-339.

Cananeo M. & Masse II. 1983. Importance du recrûtement de *Spisula subtruncata* (da Costa) sur la structura et les fluctuations d'un peuplement benthique. *Oceanol Acta., N.* SP.: 63-67.

Clarke K.R. 1993. Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure. *Aust. J. Ecol.* 18:117-143.

De Biasi A. 1994. Variabilità interannuale di una comunità sabulicola del Mar Ligure orientale. Atti X A.I.O.L.: 555-562.

De Biasi A. 1997. Stability in a fine-sand community: seven years of observations. Atti XII A.I.O.L., 1: 255-263.

De Biasi A. & Bianchi C.N. 1996. Dinamica interannuale di comunità bentiche lungo l'estuario del Magra (Mar Ligure Orientale). Atti XI A.I.O.L.: 449-457.

Fraschetti S., Covazzi A., Chiantore M. & Alberlelli G. 1997. Life-history traits of the bivalve *Spisula subtruncata* (da Costa) in the Ligurian Sea (North Western Mediterranean): the contribution of newly settled juveniles. *Sci. Mar.,* 61 (2): 25-32.

Gray J.S., Aschan M., Carr M.R., Clarke K.R., Green R.H.. Pearson T.H., Rosenberg R. & Warwick R.M. 1988. Analysis of community attributes of the benthic macrofauna of Frierfjord/Langesundfjord and in a mesocosm experiment. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 66: 285-299.

Gray J.S.. Clarke K.R. Warwick R.M. & Hobbs G. 1990. Detection of initial effects of pollution on marine benthos: an example from the Ekofisk and Eldfisk oilfields, North Sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 66: 285-299.

IbanezF. & Dauvin J.C. 1988. Long-term changes (1977 lo 1987) in muddy fine sand *Abra alba-Melinna palmata* community from the Western English Channel: Multivariate time-series analysis. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 49: 65-81.

Jackson G. & Jones G.K. 1999. Spatial and temporal variation in nearshore fish and macroinvertebrate. assemblages from a temperate Australian estuary over a decade. *Mar. Ecol. Prog. Ser,* 182: 253-268.

Lambshead P.J.D., Piati H.M. & Shaw K.M. 1983. The detection of differences among assemblages of marine benthic species based on an assessment of dominance and diversity.*J. Nat. Hist.* 17: 859-874.

Massé H. 1972. Quantitative investigations of sandy-bottom macrofauna along the Mediterranean north-west coast. *Mar. Biol.,* 15: 209-220.

Papathanassiou B. & Zenetos A. 1993. A case of recovery in benthic communities following a reduction in chemical pollution in a Mediterranean ecosystem. *Mar. Environ. Res.,* 36. 131-152.

Pearson T.H. & Mannvik H.P. 1998. Long-term changes in the diversity and faunal structure of benthic communities in the northern North Sea: natural variability or induced instability? *Hydrobiologia,* 376: 317-329.

Pielou C.C. 1966. The measurement of diversity in different types of biological collections. *J. Theor. Biol.,* 13: 131-144.

Sahade R.. Tatián M., Kowalke J., Kühne S. & Esnal G.B. 1998. Benthic faunal associations on soft substrates at Potter Cove. King George Island. Antarctica. *Pol. Biol.,* 19:85-91.

Sala *E.,* Ribes M. Hereu B., Zabala M.. Alva V., Coma R. & Garrabou J. 1998. Temporal variability in abundance of the sea urchins *Paracentrotus lividus* and *Arbacia lixula* in the northwestern Mediterranean: Comparison between a marine reserve and an unprotected area. *Mar. Ecol. Prog. .Ser.,* 168: 135-145.

San Vicente C., Ramos A., Jimeno A. & Sorbe J.C. 1997. Suprabenthic assemblages from South Shetland Islands and Bransfield Strait (Antarctica): preliminary observations on faunistical composition. bathymetric and near-bottom distribution. *Pol. Biol..* 18: 415-422.

Shannon C.C. & Weaver W. 1963. The mathematical theory of communication. University of Illinois Press. Urbana: 111 pp.

Warwick R.M. & Clarke K.R. 1991. A comparison of some methods for analysing changes in benthic community structure. *J. Mar. Biol. Ass. UK.,* 71: 225-244.

Lavoro presentato al XIII Congresso A. I. O. L, Portonovo (Ancona), 28-30 settembre 1998

Atti Associazione Italiana Oceanologia Limnologia, 13 (2), pp. 307-315, luglio 2000

A 3D WATER QUALITY MODEL: DEVELOPMENT AND NUMERICAL TESTS

Gabriella DE MARTINO

Consorzio Inter-Universitario per la Previsione e Prevenzione dei Grandi Rischi,
Università di Salerno - Università di Napoli

ABSTRACT

This work presents a numerical three-dimensional finite-difference, rectangular grid mesh model designed to analyse water quality. The model is an original combination of a newly developed advection-diffusion block with a hydrodynamic model coupled with a modified reaction sub-model.

The model is able to assure no-negative, conservative solutions and numerical stability. Each constitutive part is tested. A final comprehensive simulation, that shows the capability of the model to catch the basic characteristics of inter-annual changes of the physical and bio-chemical features in a realistic basin, modulated by hydrodynamics and by advection and diffusion processes, is presented.

RIASSUNTO

Questo lavoro presenta un modello numerico tridimensionale alle differenze finite, su grigliato a maglia rettangolare sfalsata sviluppato per studiare la qualità dell'acqua. 11 modello è una realizzazione originale ottenuta accoppiando un nuovo modello di avvezione e diffusione a un preesistente modello idrodinamico e a un sub-modello opportunamente modificato di reazioni biochimiche.

Si illustrano mediante simulazioni numeriche le caratteristiche fondamentali di ciascun blocco del modello. Le simulazioni finali mostrano la capacità del modello di cogliere le caratteristiche basilari della variabilità stagionale nella concenti-azione delle componenti biochimiche e della temperatura, modulate dalle caratteristiche dinamiche e dai processi di avvezione e diffusione presenti in un bacino realistico.

1.INTRODUCTION

Oxygen depletion, eutrophication, acidification, toxic pollution, poor hygienic state and excess suspended matter are among the issues usually included in the concept of water quality. Mathematical models are now an established tool in environmental studies. A water quality model should devote its attention not only to the bio-chemical

reactions but also to the hydrodynamic features.

This work presents the main features of a numerical three-dimensional, finite-difference, rectangular grid mesh model developed to analyse water quality (Fig. 1). The model is able to assure no-negative, conservative solutions, and numerical stability.

In the hydrodynamic model (Cheng *et al,* 1993) the three-dimensional primitive equations, with the hydrostatic approximation, are solved; in the same part the wind and the bottom stresses are also considered; the model can take in account both the vertical and (he horizontal viscosity as well as a tidal forcing. Numerical implications have suggested adopting a semi-implicit method to all but the advective terms, to which the Eulero-Lagrangian method was applied. The output of the hydrodynamic model is the velocity field in each wet point of the mesh, as well as the updated position of the free surface.

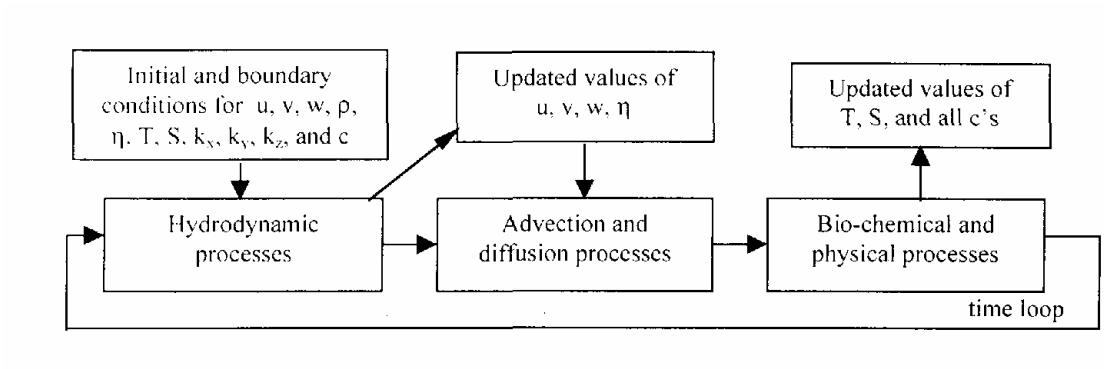

Fig. 1 - The water quality model flow chart.

In the bio-chemical part relationships between the biological components, the natural environment. and the processes of advection and diffusion of the bio-chemical constituents in the water are studied and the related equations solved. The preliminary analysis of the typical values of reaction rates and of limiting factors has suggested the use of an explicit discretization method to solve the set of equations for the reactions and of a semi-implicit upwind scheme to compute the advective-diffusive processes. The updated values of concentration are the output of the bio-chemical part of the model.

1. ADVECTION AND DIFFUSION

In each cell of the computational grid, the concentration of the bio-chemical compounds changes as a result of the chemical and biological reactions and of the advection and diffusion processes. The developed model has the bottom diffusion set to zero. The model takes into account the heat exchanges between the water top layer and the above atmosphere (Canale, 1976; .Jørgensen & Gromiec. 1989); oxygen exchange between water and air is provided for a parametric equation (Orlob, 1983). The compounds are taken as passive tracers and included in the advection-diffusion equation

$$\frac{\partial c}{\partial t}+u\frac{\partial c}{\partial x}+v\frac{\partial c}{\partial y}+w\frac{\partial c}{\partial z}=u\frac{\partial}{\partial x}\left(\kappa_x\frac{\partial c}{\partial x}\right)+v\frac{\partial}{\partial y}\left(\kappa_y\frac{\partial c}{\partial y}\right)+w\frac{\partial}{\partial z}\left(\kappa_z\frac{\partial c}{\partial z}\right) \quad (1.1)$$

where u, v, w are the velocity components along the coordinate axis, c is the generic bio-chemical compound concentration and K the eddy diffusion coefficients. To obtain conservative numerical solutions, the equation (1.1), in its conservative form

$$(dzc)_t+(dzuc)_x+(dzvc)_y+(wc)_{k+1/2}+(wc)_{k-1/2}=$$
$$=\frac{\partial \nu^{orizz}}{\partial x}\left(dz\frac{\partial c}{\partial x}\right)+\frac{\partial \nu^{orizz}}{\partial y}\left(dz\frac{\partial c}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(dz\nu^{vert}\frac{\partial c}{\partial z}\right)$$

has been discretized by using an upwind semi-implicit method (De Martino, 1998). In details, terms including horizontal velocities were evaluated explicitly, while terms involving vertical speed, implicitly. The hydrodynamic model provides the velocity field. The numerical scheme used in this part of the model assures mass conservation.

1.1. Numerical simulations

Figure 2 (a-b) schematically reproduces a multi-layer basin with bays and capes, and no-flat bottom. To test the numerical implementation of the advection-diffusion equation, a close domain without any inflow or outflow has been adopted. The equation

$$z(x,y)=x^2+y^2,$$

supplies the initial surface condition for both simulations reported in this paragraph.

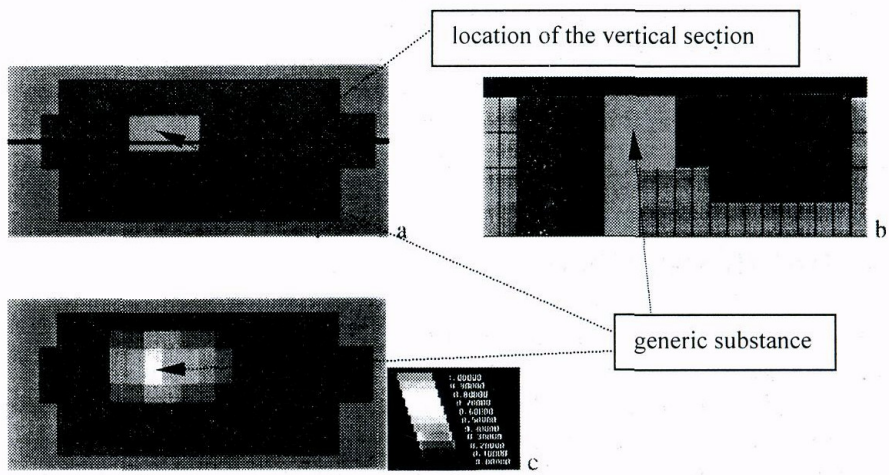

Fig. 2 - Multi-layer basin with bays and capes and no fiat bottom: horizontal advection and diffusion test, a) plant: top layer at t=0;b) vertical section at t=0; e) plant: top layer al t=5h.

Horizontal and vertical diffusion coefficients, water temperature and salt content are assigned as initial conditions. The latter two items do not affect the advection and diffusion block of the model. Each cell has dimensions $\Delta x=\Delta y=100$m and a variable Δz; the lime step is $\Delta t=12$ sec.

In the first case, to especially test the horizontal (explicit) diffusion and advection routines. a generic component of unitary mass was put at t=0 in a few water columns, from the surface to the bottom layer (Fig.2 a-b). After 5 hours of simulation the spot has enlarged to cover the area shown in Fig. 2c.

To test also the vertical (implicit) diffusion and advection routines, a generic substance was introduced at t=0 as a spot in a single sub-surface layer (Fig. 3 a-b): after 5 hours of simulation the spot has enlarged and moved as shown in fig. 1.2c. Note that in both simulations total mass is conserved.

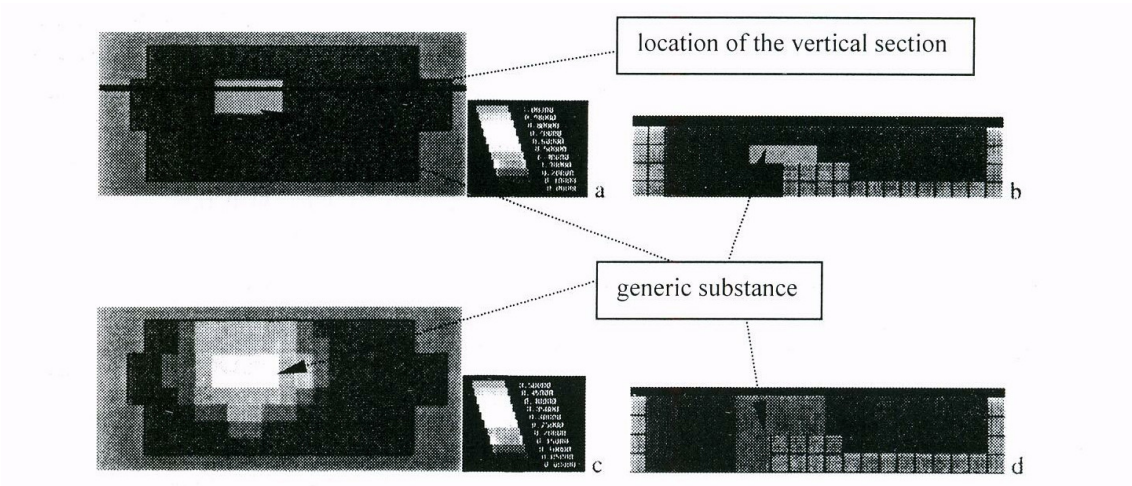

Fig. 3 - Multi-layer basin with bays and capes and no fiat bottom: horizontal and vertical advection and diffusion test, a) plant: sub-surface layer at t=0; b) vertical section at t=0; e) plant: surface layer at t=5h (enlarged scale!); d) vertical section: t=5h.

2. BIOCHEMICAL REACTIONS

The model takes in account 8 different physical and biochemical constituents: temperature, phytoplankton (considered as a single constituent), dissolved oxygen, BOD. nitrate and ammonia, orthophosphate and zooplankton, again as a single constituent. A set of partial differential equations mathematically translates the physical, biological and chemical interactions among the different constituents (Dejak *et al.,* 1990). Specifically, the model considers the processes of growth and decay of biological mass due to photosynthesis, grazing, mortality and respiration, and the consequential changes in nutrients, dissolved oxygen and BOD concentration values. Temperature, influencing the transformation and reaction rates, is evaluated in the model starting from the quantity of solar radiation reaching the water surface (Jørgensen

& Gromiec, 1989); in the water column, temperature decreases basically as a function of the phytoplankton mass present in the upper layers (Nybakken, 1988). Transformation rates, Constant and parameter values used in this part of the model have been taken from literature (U.S. Environmental Protection Agency, 1985) and then, if the case, modified and calibrated for the different conditions.

2.1. Numerical simulations

Curves in Fig. 4 are the lime variations of the 8 compounds considered in the model. This is the result of a run of the program with only the reaction routines. Drawn values are those taken in a fixed point of the basin every day at noon for the whole second year of a three-year simulation. The model is forced by meteoclimatic values of air temperature and humidity characteristic of a temperate zone at mid-latitude (U.S. Environmental Protection Agency, 1985); the initial values for the 8 components were all specified in each cell of the computational grid. Note that the numerical simulation adequately reproduces the maximum spring value in the phytoplankton concentration and a secondary peak in late summer, the maximum zooplankton values shifted forward in lime and the related minimum in the nutrient concentrations with a good accordance with typical experimental values for the same climatic conditions, represented in Fig. 5 (Cognetti & Sarà, 1981).

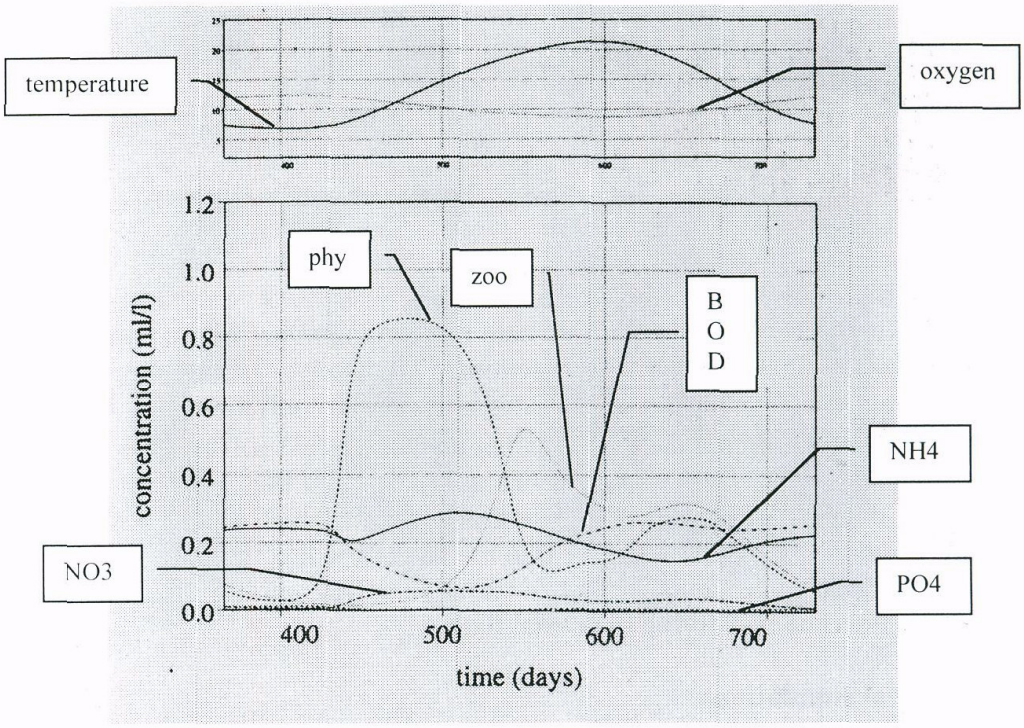

Fig. 4 - Reaction test: time variation of the 8 constituents.

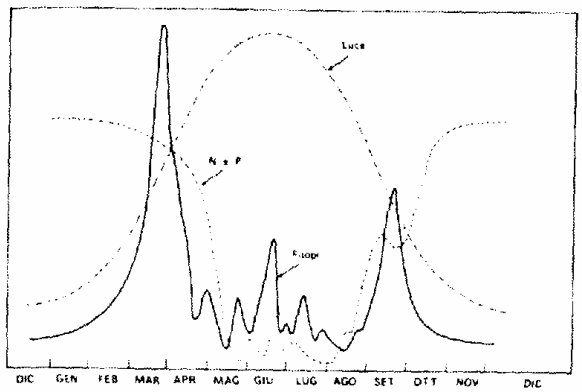

Fig. 5 - Experimental values (from Cognetti & Sarà, 1981).

3. HYDRODYNAMICS

The hydrodynamic part of the model takes in account the processes due to wind stress and tidal forcing; it solves the momentum and continuity equations with the hydrostatic hypothesis in the conservative form (Pedlosky, 1987):

$$u_t + (uu)_x + (uv)_y + (uw)_z = -g\eta_x + (\nu u_x)_x + (\nu u_y)_y + (\nu u_z)_z \tag{3.1}$$

$$v_t + (vu)_x + (vv)_y + (vw)_z = -g\eta_y + (\nu v_x)_x + (\nu v_y)_y + (\nu v_z)_z \tag{3.2}$$

$$\eta_t + \left[\int_{-h}^{\eta} u dz\right]_x + \left[\int_{-h}^{\eta} v dz\right]_y = 0 \tag{3.3}$$

$$u_x + v_y + w_z = 0 \tag{3.4}$$

where *u(x, y, z, t), v(x, y,* z, *t), w(x, y, z, t)* are the horizontal velocity components along the *x* (east), *y* (north) and *z* (vertical) directions respectively; *t* is the lime; η*(x, y, t)* the free surface elevation; *g* is the gravity; v is a viscosity coefficient and *h(x, y)* is the bathymetry. The hydrodynamic model (Cheng *et al.,* 1993) solves (3.1-3.4) together with the free surface and bottom conditions as surface and bottom stresses. Equations (3.1-3.4) are discretized according to a semi-implicit scheme for all but the advective terms solved adopting an Eulero-lagrangian method. Note that the model is able to take in account the tidal fluxes and the relative variations of the surface elevation and it can manage tidal flooding and drying of coastal flats.

3.1. Numerical simulations

Guanabara Bay, RJ, Brazil, has been chosen as test area for the hydrodynamic part. It is a basin 4000km ca. wide, measuring 75x54 km ca. in its widest part. Just a few hydrological, hydrodynamic and biochemical data are available, not enough to

describe the circulation features of the Bay, at least without a numerical model. The computational grid used to simulate a realistic scenario, based on tidal and wind measures, is made of 65x42 cells, whose horizontal dimensions are $\Delta x = \Delta y = 1.200$ m. The vertical structure is made of a variable number of horizontal layers, from 1 to 40, each 1 meter thick, except those on the top layer and on the bottom, whose dimensions depend on the position of the free surface and of the bathymetry, respectively. The numerical test (Fig. 6) shows the effect on the basin of a tidal forcing exerted at the mouth of the Bay and of a Constant wind blowing at the speed of 20 knots during the whole simulation.

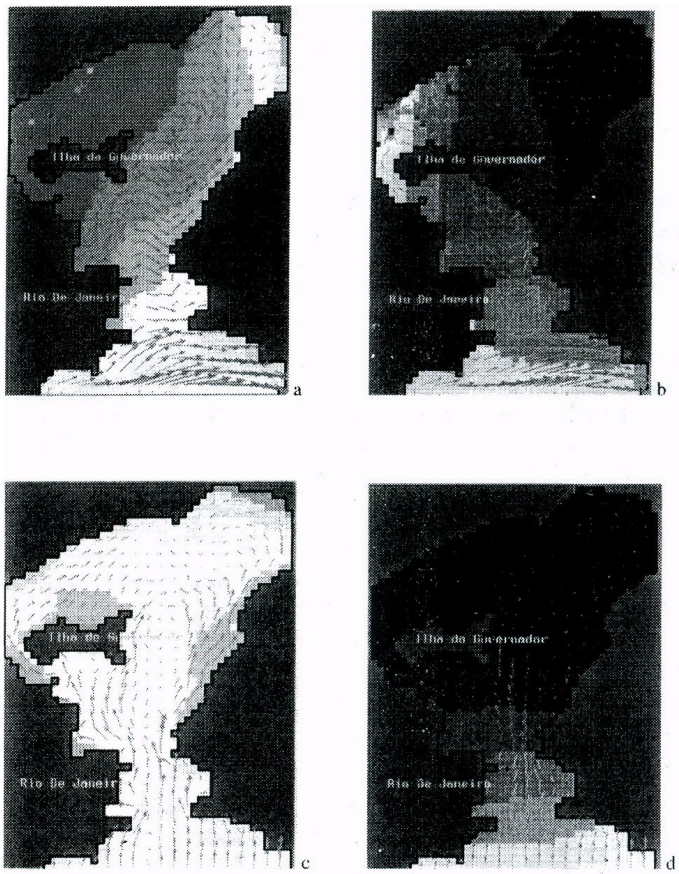

Fig. 6 - Hydrodynamic test at Guanabara Bay, Rio de Janeiro, Brazil: tidal + wind forcing.
Wind blowing perpendicularly to the Bay axis: a) ebb tide; b) flood tide.
Wind blowing parallelly to the Bay axis: a) ebb tide; d) flood tide.

4. WATER QUALITY MODEL: NUMERICAL SIMULATIONS

Simulations reported in this paragraph show model performance when all its blocks are switched on. To make the comparison effective, the same testing basin as in the advective and diffusive processes as well as in the reaction tests (Fig. 2 a-b) was used. In the numerical simulations presented in this paragraph, a time step Δt=900sec assure numerical stability. A sinusoidal wave starting from the western border of the basin gives rise to initial oscillations of the free surface; uniform initial values are given to all 8 physical and bio-chemical components.

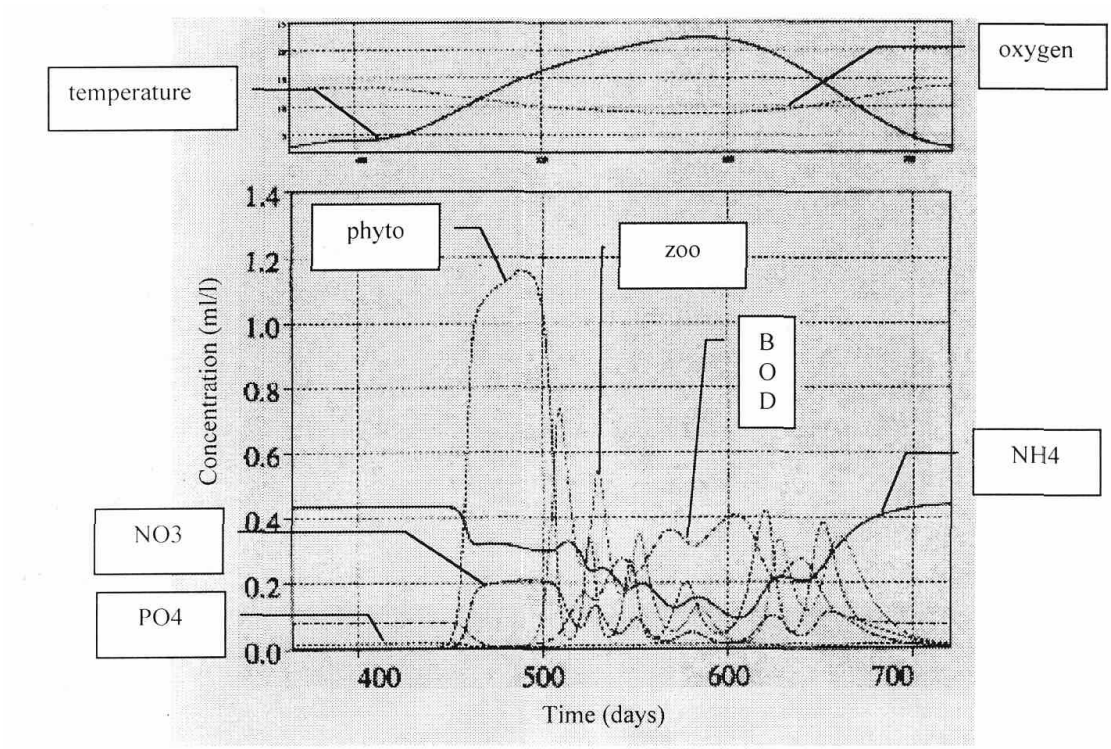

Fig. 7 - Advection, diffusion and reaction test: annual variation of temperature and biochemical components.

Fig. 7 shows the curves of variation in time of substances and temperature, each taken in the same point as in the reaction test. Comparing the results of the bio - chemical block test, without any diffusion and advection process (see Fig. 4) to the results of the model with all its blocks switched on, it is clearly evident that the general trend is basically unchanged (see Fig. 5), but maximum and minimum values are slightly different in time and amplitude and they tend to increase in number. This is mostly due to the presence of advection.

This final comprehensive simulation shows the capability of the model to catch the basic characteristics of inter-annual changes of the physical and bio-chemical features in a realistic basin, modulated by hydrodynamics and by advection and diffusion processes.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author is very grateful to Professor Casulli, University of Trento for his scientific support and to Professor Sansone, Istituto Universitario Navale, for his suggestions.

BIBL1OGRAPHY

Canale R.P. (ed) 1976. Modeling Biochemical Processes in Aquatic Ecosystems. *Ann Arbor Science.*

Cheng R.T., Casulli V. & Gartner J.W. 1993. Tidal, Residual, Intertidal Mudflat (TRIM) Model and its Applications to San Francisco Bay, California. Estuarine, *Coastal and Shelf Science* 36: 235-280.

Cognetti G. & Sarà M. 1981. Biologia marina. Calderini, Bologna.

De Martino G. 1998. Sviluppo di modello numerico di qualità delle acque. Tesi di Dottorato in Scienze Ambientali - ambiente marino. Università di Messina.

Dejak C., Franco D., Pastres R. & Pecenik G. 1990. A 3-D Eutrophication-diffusion Model of the Venice Lagoon: Some Applications. In: Coastal and Estaurine Studies. (Cheng RT. ed) Vol. 38. Springer-Verlag, New York: 526-538.

Jørgensen S.E. & Gromiec M.J. 1989. Mathematical Submodels in Water Quality Systems. Developments in Environmental Modelling, vol. 14, Elsevier.

Nihoul J.C.J. 1995. Modelling of Marine Systems. Elsevier Publ Co, Amsterdam.

Nybakken J.W. 1988. Marine Biology: an ecological approach. Harper & Row, Publischers. New York.

Orlob G.T. (ed) 1983. Mathematical modeling of water quality of streams, lakes, and reservoirs. Wiley & Sons.

Pedlosky J. 1987. Geophysical Fluid Dynamics. Spinger-Verlag.

U.S. Environmental Protection Agency 1985. Rates, Constants. and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling. EPA, Athens, Georgia.

Lavoro presentato al XIII Congresso A.I.O.L, Portauovo (Ancona), 28-30 settembre 1998

Atti Associazione Italiana Oceanologia Limnologia, 13 (2), pp. 317-322, luglio 2000

BACTERIAL ACTIVITY DURING SEA ICE FORMATION IN THE ROSS SEA (ANTARCTICA)

Paola DEL NEGRO[1], Paola RAMANI[1], Paola RIVARO[2]

[1] Laboratory of Marine Biology - Trieste - Italy
[2]Department of Chemistry and Industrial Chemistry - University of Genova - Italy

ABSTRACT

The bacterial response to the development of sea ice was investigated during the XIII Italian-Antarctic expedition to the Ross Sea. Changes in abundance, activity of bacterial communities, and planktonic respiration were determined in grease ice and pancake ice. Bacterial abundance increase with the successional stage of sea ice while the activity of bacteria appears to be reduced during grease ice formation and increased during the consolidation of frazil structure in pancake forms.

RIASSUNTO

Scopo del presente lavoro è stato quello di studiare la risposta batterica alla formazione ed allo sviluppo del ghiaccio marino: Le abbondanze batteriche aumentano passando dal primo stadio di formazione (grease ice) a quello successivo (pancake ice) evidenziando anche un incremento di dimensioni cellulari. La produzione batterica, risulta ridotta nel ghiaccio di nuova formazione. Le elevate concentrazioni di clorofilla *a* rilevate, superiori a quanto osservato nelle acque circostanti, confermano l'effetto di arricchimento microalgale che si verifica nei cristalli di ghiaccio supportando l'ipotesi di una coincorporazione di batteri attaccati alle alghe o aggregati.

1.INTRODUCTION

The prevalent process of sea ice development has been described through a succession of characteristic stages of ice growth i.e. as a frazil-pancake ice cycle (Lange *et al.,* 1989). The sea ice formation appears to have a severe impact on planktonic organisms (Eicken, 1992). The response of phytoplankton and bacterial populations to sea ice formation has been described by Gleitz & Thomas (1993) and Grossmann & Dieckmann (1994) respectively. Microalgae are physically enriched within newly forming sea ice by the "scavenging" effects of frazil ice crystals or by wave fields which pump water through grease ice trapping algae between the ice crystals (Ackley & Sullivan, 1994). In newly formed ice, algal concentration exceeded that in open waters

by a factor of 1.5 to 2.5 (Gleitz & Thomas, 1993) while concentration factors up to 70 have been reported for the foraminifer *Neogloboquadrina pachyderma* (Dieckmann *et al.,* 1991). Grossmann & Dieckmann (1994) reported that bacterial biomass did not substantially enhance in the grease ice compared with biomass found in open waters. Apparently, physical concentration mechanisms are not effective below the bacterial size threshold. During the ice formation bacterial activity was substantially reduced while in thick pack ice the activity increased and secondary production exceeded primary production (Grossmann & Dieckmann, 1994). Taxonomic investigations (carried out by morphological and biochemical tests) on bacterial strains isolated from ice and water habitats, revealed that bacterial communities inhabiting pack ice differ from those of underlying seawater (Delille, 1992; Zdanowski & Donachie, 1993). Alternation of environmental conditions, accompanying the formation and development of sea ice suppresses bacterial population originating from open water and induces the development of new ice adapted assemblages (Grossmann & Dieckmann, 1994).

Up to now all the data available on bacterial response to formation and growth of sea ice are refered to the Weddel Sea (Grossmann & Dieckmann, 1994). In the last years the PNRA (Programma Nazionale di Ricerca in Antartide) has supported the PTED (pack ice ecosystem dynamics) project studying the sea ice communities related to C-N cycles. The aim of this study was to investigate bacterial activity during sea ice development in the Ross Sea.

2. METHODS

This study was conducted in the framework of the C.L.I.M.A. project (Climatic Long-term Interactions for the Mass-balance in Antarctica) during LEG II of the XIII Italian Antarctic Expedition carried out by the R/V Italica in the Ross Sea between November 1997 and March 1998.

Different stages of sea ice were sample on 22nd and 23nd February. An initial layer of grease ice (GI) consisting of separate frazil ice crystals was forming at the sea surface of station 1 (75°05.23'S-165°05.75'E). At station 2 (76°32.59'S-169°05.24'E) circular, decimeter-size, ice pancakes (PI) were present (Fig. 1). Grease ice and pancakes were gently collected from the sea surface with a bucket. The samples were immediately drained over a sieve to separate ice crystals from water and stored in insulated containers.

Sea water samples were collected in the same period and in the same area using a Sea Bird Electronics SBE 9/11 plus coupled with a Carousel 'water sampler SBE 32 carrying 24 bottles of 12 L each.

Sea water and dissolved ice samples were submitted to subsequent analyses.

Aliquots (500 mi) of sample were filtered through GF/F filters (Whatmann) for chlorophyll *a* determination. Filters were frozen at -20°C until extraction. In laboratory, 1 mo after sampling, filters were extracted in 90% acetone and analyzed fluorometrically following the method of Panella & Magazzù (1978).

For determination of bacterial abundance, subsamples (3 ml), preserved with 0.2 µm filtered formaldehyde (0.2% final concentration), were filtered at low pressure (< 50 mm Hg) onto 25-mm-diameter 0.2 µm black Nuclepore filters and subsequently stained

with l µg/ml DAPI (4',6-diamidino-2-phenylindole) (Porter & Feig, 1980). Microscopic analyses were carried out in laboratory 1 mo after sampling using an Olympus BX60 epifluorescence microscope (filter System BP330-385/DM400/BA420, oil immersion objective UplanFL 100). A minimum of 400 bacterial cells were counted (20 fields of a 0.96 μm^2 grid). Cell numbers were converted to carbon biomass using a factor of 20 fg C $cell^{-1}$ (Ducklow & Carlson, 1992).

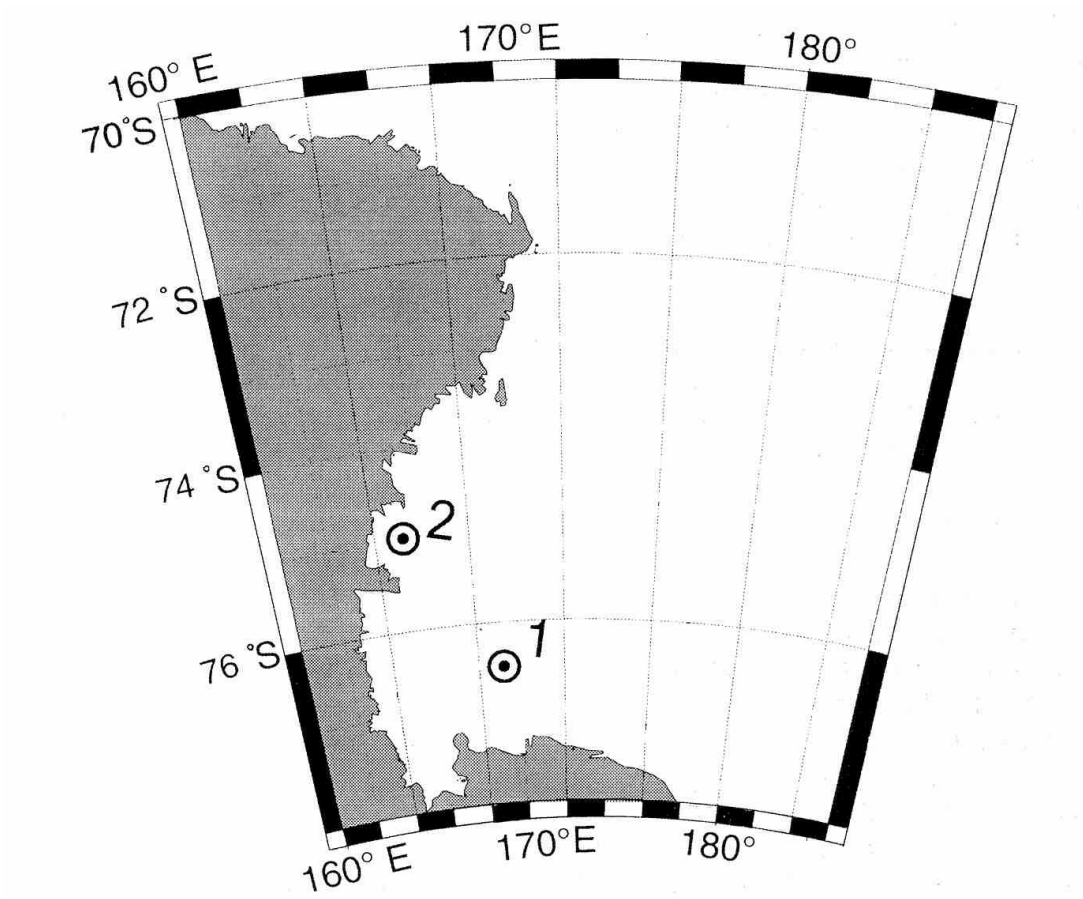

Fig. 1 - location of sampling stations in the Ross Sea.

Calculation of bacterial carbon production (BCP) was based on [^{3}H]thymidine incorporation measured according to the microcentrifuge method (Fuhrman & Azam, 1982; Smith & Azam, 1992). Triplicate 1.5 ml samples were incubated with 20 nM [memyl-^{3}H]thymidine for 4 h at -1°C. The conversion factors of 1.77 x 10^{18} and 1.1 x 10^{18} cells per mole of thymidine incorporated were used for ice and open waters respectively (Grossmann & Dieckmann, 1994) with a carbon content of 20 fg C $cell^{-1}$ (Ducklow & Carlson, 1992).

Planktonic respiration rates were measured by monitoring temporal changes in O_2 concentration of samples incubated in 60 ml glass bottles for 24 h at ambient

temperature (± 2°C). Initial and final oxygen concentrations were measured by Winkler titrations (Strickland & Parson, 1972). Respired carbon was estimated from oxygen utilization assuming a respiratory quotient of 1 (Chin-Leo & Benner, 1992).

3. RESULTS AND DISCUSSION

The open water data reported in this paper corresponded to mean value registered at surface layer in stations close to ice sampling stations

Bacterial abundance increased with the successional stages of sea ice (1.0 x 10^9 cell/L, 1.6 x 10^9 cell/L and 3.5 x 10^9 cell/L in open water, GI and PI respectively) confirming the observations of Grossmann & Dieckmann (1994) in the Weddel Sea.

Bacterial populations in the PI were characterized by considerably larger cells than in the open water and in the.GI. The median volume of these large cells amounted to 0.38 (im^3, comparable to the largest bacterial cells observed in the pack ice (Grossmann & Dieckmann, 1994). The occurrence of large bacteria has frequently been observed in sea ice (Sullivan & Palmisano, 1984). By contrast, observations on algal cells showed a species succession towards smaller forms (Gleiz & Thomas, 1993). Enlarged cell volumes of Artic bacteria have been attributed to both low temperature and high nutrient availability (Wiebe & Hendricks , 1992) and also to low grazing pressure (Turley *et al.,* 1986). Data on the Weddel Sea ice bacteria suggest a change in the composition of bacterial population during sea ice formation (Grossmann & Dieckmann, 1994). The alternation of environmental conditions accompanying the formation and growth of sea ice suppresses bacterial populations originating from open water and induces the development of new assemblages adapted to the ice situation (Grossmann & Dieckmann, 1994). Taxonomic investigations on bacterial strains isolated from ice revealed that bacterial communities inhabiting ice differ from those of underlying seawater (Bowman *et al,* 1997).

Similarly Chl *a* concentration increased from 2 µg L^{-1} in open water to 5.3 and 9.8 µg L^{-1} in GI and PI respectively. The enrichment of bacterial cells in new ice was previously observed associated to algae enrichment (Grossmann & Gleitz, 1993). No bacterial enrichment was observed when phytoplankton concentration was low (Grossmann & Dieckmann, 1994). It has been hypothesized that bacterial enrichment may be due to bacteria attached to algal cell surface or aggregates which are incorporated into sea ice (Grossmann & Dieckmann, 1994).

	B	BCP	Chl *a*	O2
	Cell L^{-1}	µg C L^{-1} h^{-1}	µg L^{-1}	µM h^{-1}
Open water	1.0 x 10^9	0.009	2.0	---
Grease Ice	1.6 x 10^9	0.005	5.3	0.05
Pancake Ice	3.5 x 10^9	0.01	9.8	0.11

Tab. 1 - Bacterial abundance (B), Bacterial Carbon Production (BCP), Chlorophyll *a* concentration (Chl *a)* and Oxygen utilisation (O2) in different environments.

Carbon production of bacteria increased from 0.005 µgC L^{-1} h^{-1} in GI to 0.01 µgC L^{-1} h^{-1} in PI. Intermediate values of BCP were found in surrounding open waters (0.009 µgC L^{-1} h^{-1}) and were similar to those reported by Azam et al. (1991). The BCP value of ice samples was lower than that detected in the Weddel Sea by Grossmann & Dieckmann (1994) but was corroborated by the results of Grossmann & Gleitz (1993) showing reduced activity in newly formed ice. Only in growing young ice such as large pancakes and thick pack ice the BCP increased.

The planktonic respiration rates were maximal in PI corresponding to the highest abundances both of bacteria and phytoplankton.

The marked differences observed between the sea ice communities developed in physically distinct ice environments may reflected organism adaptations to the suite of physicochemical and biological features among different ice habitats (Dieckman *et al.,* 1991). The ice formation processes account for the incorporation of biological matter in pack ice but has a severe impact on planktonic organisms (Lange, 1990). During the grease ice formation the activity of bacterial populations resulted reduced and only during the consolidation of frazil structure in pancake forms the bacterial biomass and activity increased.

ACKNOWLEDGEMENTS

Research was supported by the PNRA, CLIMA project. We are grateful to G. Spezie and A. Cucinotta responsible for the scientific expedition and to S. Fonda Umani for constructive criticism. Thanks are due to N. Donato, L. Langone, E. Liparini and A. Magagnoli for their assistance in the field and to C. De Vittor for the chlorophyll analysis. The help of the crew of the R.V. Italica is kindly acknowledged.

REFERENCES

Ackley S.F. & Sullivan C.W. 1994. Physical controls on the development and characteristics of Antartic sea ice biological communities - a review synthesis. *Deep Sea Reserch,* 41(10): 1583-1604.

Azam F., Smith D.C. & Hollibaugh J.T. 1991. The role of the microbial loop in Antarctic pelagic ecosystems. Proceedings of the PRO-MARE Symposium on Polar Marine Ecology. Trondheim (Norway) 1990 (Sakshaug E., Hopkins C.C.E., Oeritsland N.A. eds). 10(1): 239-243.

Bowman J.P., Brown M.V. & Nichols D.S. 1997. Biodiversity and ecophysiology of bacteria associated with Antartic sea ice. *Antartic Science,* 9 (2): 134-142.

Chin-Leo G. & Benner R. 1992. Enhanced bacterioplankton production and respiration at intermediate salinities in the Mississipi River plume. *Mar. Ecol. Progr. Ser.,* 87:87-103.

Delille D. 1992. Marine bacterioplankton at the Weddell Sea ice edge, distribution of psychrophilic and psychrotrophic populations. *Polar Biol.,* 12: 205-210.

Dieckmann G.S., Spindler M., Lange M.A., Ackley S.F. & Eicken H. 1991. Antarctic

sea ice: a habitat for the foraminifer *Neogloboquadrina pachyderma. J. Foraminiferal Res.,* 21: 182-189.

Ducklow H.W. & Carlson C.A. 1992. Oceanic bacterial production. In: Advances in Microbial Ecology (Marshall K.C. ed). Plenum Press, New York: 113-181.

Eicken H. 1992. The role of sea ice in structuring Antarctic ecosystems. *Palar Biol.,* 12: 3-13.

Furhman J.A. & Azam F. 1982. Bacterioplankton secondary production estimates for coastal waters of British columbia, Antarctica, and California. *Appl. Environ. Microbiol.,* 39 (6): 1085-1095.

Gleitz M. & Thomas D.N. 1993. Variation in phytoplankton standing stock, chemical composition and physiology during sea-ice formation in the southeastern Weddel Sea, Antarctica. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.,* 173: 211-230.

Grossman S. & Dieckmann G.S. 1994. Bacterial standing stock, activity, and carbon production during formation and growth of sea ice in the Weddell Sea, Antartica. *Appl. Environ Microbiol.,* 60: 2746-2753.

Grossman S. & Gleitz M. 1993. Microbial responses to experimental sea-ice formations: implications for the establishment of Antartic sea-ice communities. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.,* 173: 273-289.

Lange M.A. 1990. Development and physical properties of sea ice in the Weddel Sea, Antarctica. In: Sea ice properties and processes, (Ackley S.F. & W.F. Weeks eds), CRREL Monograph 90-1, 300 pp.

Lange M.A., Ackley S.F., Wadhams P., Dieckmann G. S. & Eiken H. 1989. Development of the sea ice in the Weddell sea. *Ann. Glaciol.,* 12: 92-96.

Panella S. & Magazzù G. 1978. Analisi dei pigmenti fitoplanctonici. In: Metodi per lo studio del plancton e della produzione primaria, (Magazzù G. ed.), edizioni GM: 19-33.

Porter K.G. & Feig Y.S. 1980. The use of DAPI for identifying and counting aquatic microflora. *Limnol. Oceanogr.,* 25: 943-948.

Smith D.C. & Azam F. 1992. A simple, economical method for measuring bacterial protein synthesis rates in seawater using H3-leucine. *Mar. Microb. Food Webs,* 6: 107-114.

Sullivan C.W. & Palmisano A.C. 1984. Sea ice microbial communities: distribution, abundance, and diversity of ice bacteria in Mc Murdo Sound, Antartica in 1980. *Appl. Environ. Microbiol.,* 47: 788-795.

Strikland J.D. & Parson T.R. 1972. A practical handbook of seawater analysis. 2nd edn, *Bul1. Fish. Res. Bd. Canada,* 163: 311pp.

Turley C.M., Newell R.C. & Robins D.B. 1986. Survival strategies of two small marine ciliates and their role in regulating bacterial community structure under experimental conditions. *Mar. Ecol. Progr. Ser.,* 33: 59-70.

Wiebe W.J. & Hendricks C.W. 1992. Distribution of heterotrophic bacteria in a transect of the Antarctic Ocean. In: Effect of the ocean environment on microbial activities (Colwell R.R. & Morita R.Y. eds). University Park Press, Baltimore: 524-535.

Zdanowski M.K. & Donachie S.P. 1993. Bacteria in the sea ice zone between Elephant Island and the South Orkneys during the Polish sea-ice zone expedition, (December 1998 to January 1989). *Polar Biol.,* 13: 245-254.

Lavoro presentato al XII! Congresso A.I. O. L, Portonovo (Ancona), 28-30 settembre 1998

Atti Associazione Itallana Oceanologia Limnologia, 13 (2), pp. 323-331, luglio 2000

VARIABILITÀ DEI SEDIMENTI SOSPESI NELLE ACQUE COMPRESE TRA BAIA TERRA NOVA E CAPE ADARE (MARE DI ROSS - ANTARTIDE)

Marco FERRARI, Marco CAPELLO, Alessandra MARTINI

Dipartimento per lo studio del territorio e delle sue risorse,
Università degli Studi di Genova

ABSTRACT

We have analysed data of concentration and dimension of suspended particulate matter related to three oceanographic cruises carried out in the Ross Sea (Antarctica), in the framework of the Italian National Research Program in Antarctica (PNRA). The data have been subdivided in relationship to the geographical distribution (internal and external shelf and shelf break) and the sampling depth (superficial, intermediate and bottom waters). Finally, data have been processed and correlated with the different water masses of the Ross Sea to evaluate the interannual variability of the suspended particulate matter.

RIASSUNTO

In questo lavoro sono stati analizzati i dati di concentrazione e dimensione del materiale particolato sospeso (SPM) relativo a tre campagne oceanografiche, effettuate nel Mare di Ross (Antartide) nell'ambito del Programma Nazionale di Ricerca in Antartide (PNRA). I dati sono stati suddivisi in base alla loro distribuzione geografica (piattaforma, interna ed esterna, e scarpata continentale) ed alla profondità di prelievo (acque superficiali, intermedie e di fondo); successivamente, gli stessi dati sono stati elaborati e correlati con le differenti masse d'acqua presenti nel Mare di Ross per valutare la variabilità interannuale e stagionale del materiale particolato sospeso.

1. INTRODUZIONE

L'Unità Operativa del Dipartimento per lo studio del territorio e delle sue risorse, afferente al Progetto CLIMA (Climatic Long-term Interactions for the Mass-balance in Antarctica) del PNRA, svolge ormai da molti anni studi sul materiale particellato sospeso presente nelle acque del Mare di Ross. Questi studi, rivolti alla determinazione della dinamica del SPM, sono essenzialmente sviluppati lungo due direttrici: la prima è indirizzata alla determinazione delle concentrazioni del materiale particolato sospeso totale (TPM), con differenziazione della frazione organica (OPM) ed inorganica (IPM),

mentre la seconda è centrata sull'analisi dimensionale, con la definizione delle tipologie spettrali e dei principali parametri statistici delle particelle che lo compongono.

In questo studio verranno confrontati i dati relativi a tre campagne oceanografiche effettuate nel Mare di Ross nel periodo estivo australe; lo scopo è descrivere le variazioni delle caratteristiche relative al SPM presente nelle differenti masse d'acqua, anche in funzione del settore morfologico d'appartenenza (Dunbar *et al.,* 1984; Davey, 1987).

2. METODOLOGIA D'INDAGINE

Sono stati quindi indagati i dati relativi alla concentrazione (totale, frazione organica ed inorganica) e dimensione del SPM di tre campagne oceanografiche (Fig. 1).

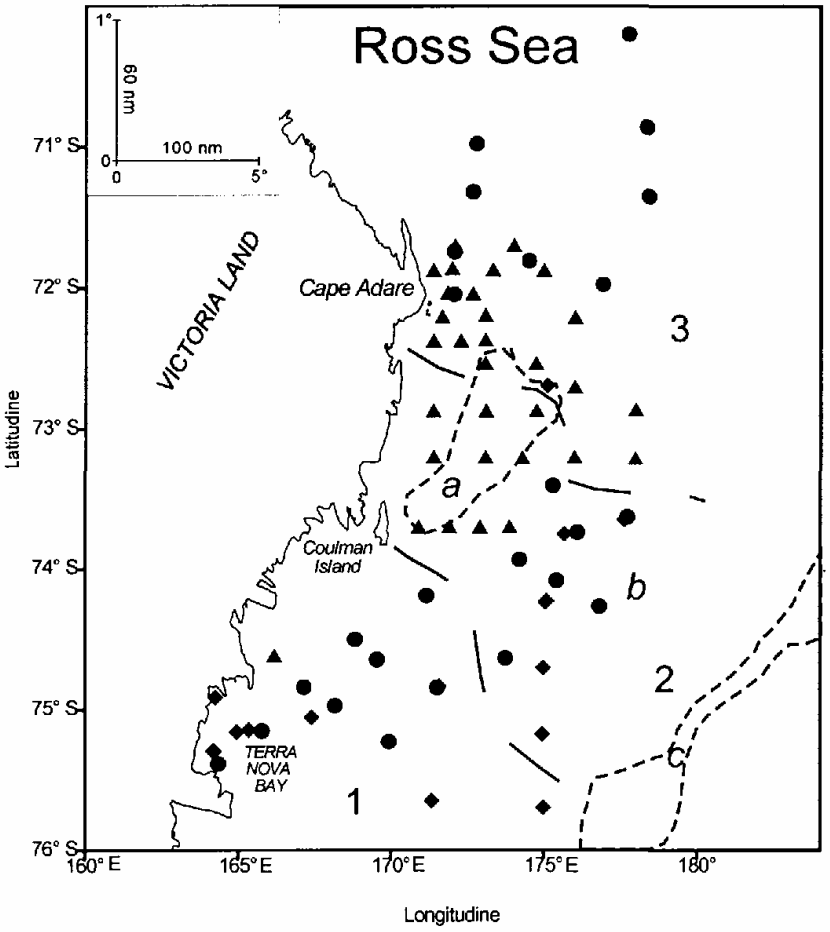

Fig. 1 - Ubicazione delle stazioni di campionamento (relativamente a Cape Adare) e suddivisione nelle tre aree di caratterizzazione: 1 - piattaforma interna, 2 - piattaforma esterna, 3 - scarpata.
● - campagna 90/91 (25 stazioni), ▲ - campagna 95 (38 stazioni), ♦ - campagna 96 (28 stazioni).
a - Mawson Bank, ***b*** - Joides Basin, ***c*** - Pennell Bank.

Per effettuare l'analisi dimensionale del materiale particellato sospeso si è utilizzato un Coulter Counter Multisizer a due stand di campionamento (Coulter® El. Ltd, 1988), seguendo le metodologie proposte Krank & Milligan (1978), mentre per la determinazione delle quantità di materiale particellato sospeso presenti nelle masse d'acqua si è utilizzata la metodologia indicata da Strickland & Parson (1968), modificata da Piccazzo & Tucci (1983).

Nelle stazioni sono stati effettuati campionamenti multipli lungo tutta la colonna d'acqua, con almeno quattro quote di prelievo ubicate a profondità prefissate (superficie, termoclino, acque intermedie ed in prossimità del fondo) e quote aggiuntive, nei casi in cui si presentavano particolari situazioni idrologiche.

L'area d'indagine, compresa tra Baia Terra Nova e Cape Adare, è stata suddivisa in tre aree geografiche. Le prime due, localizzate sulla piattaforma continentale, sono state distinte in piattaforma interna ed esterna; esse sono separate tra loro da alti strutturali quali il Mawson Bank e il Pennell Bank.. Per quanto riguarda i caratteri fisici, un fronte separa le acque tipiche dello shelf, High Salinity Shelf Waters (HSSW) e Ice Shelf Waters (ISW), da quelle di provenienza "esterna", Antarctic Surface Waters (AASW) e Circumpolar Deep Waters (CDW) (Jacobs *et al,* 1970, Bergamasco *et al,* 1997). Infine, la terza area geografica è quella coincidente con la scarpata continentale prossima a Cape Adare.

Anche la colonna d'acqua è stata suddivisa in tre strati, tenendo conto degli studi oceanografici condotti sulle masse d'acqua (Jacobs & Fairbanks, 1985). Il primo strato si estende dalla superficie al termoclino e comprendente le Shallow Ice Shelf Waters (SISW) e le AASW, il secondo è relativo alle acque intermedie, definite dalle Clear Waters, Low Salinity Shelf Waters (LSSW) e Warm Gore Waters (WMCO e $WMCO_m$) sulla piattaforma continentale e CDW nell'area di Capo Adare. Il terzo strato, prossimo al fondo, è altresì caratterizzato dalle Deep Ice Shelf Waters (DISW) e dalle HSSW (Biscaye & Eittreim, 1977; Spezie *et al,* 1993).

3. ANALISI DELLE CONCENTRAZIONI DI MATERIALE PARTICOLATO SOSPESO

Le concentrazioni di materiale sospeso totale, espresse attraverso i valori medi, evidenziano una sostanziale uniformità dei valori registrati nelle diverse campagne. Esse registrano concentrazioni di 1-2 mg/l e cioè valori intermedi tra quelli registrati negli oceani (Oceano Atlantico, valori <1 mg/l; Biscaye & Eittrem, 1977) e quelli nei mari chiusi (Mar Mediterraneo, 2-3 mg/l; Monaco *et al.,* 1990).

3.1. Strato superficiale

Le acque "superficiali" (Fig. 2) presentano i valori più elevati in concentrazioni di TPM; questi aumentano passando dalla scarpata continentale alla piattaforma interna, fortemente influenzata dagli apporti delle lingue glaciali di origine continentale. Nella piattaforma interna, durante la campagna 1990-91, si sono registrati i massimi valori assoluti (8.71 mg/l): questa situazione anomala è presumibilmente dipendente da fenomeni stagionali, dovuti al periodo di campionamento, avvenuto all'inizio della stagione estiva. In questo periodo si determina localmente una maggior ricchezza di

materiale in parte imputabile allo scioglimento del ghiacci ed in parte alla notevole attività biologica (bloom algali).

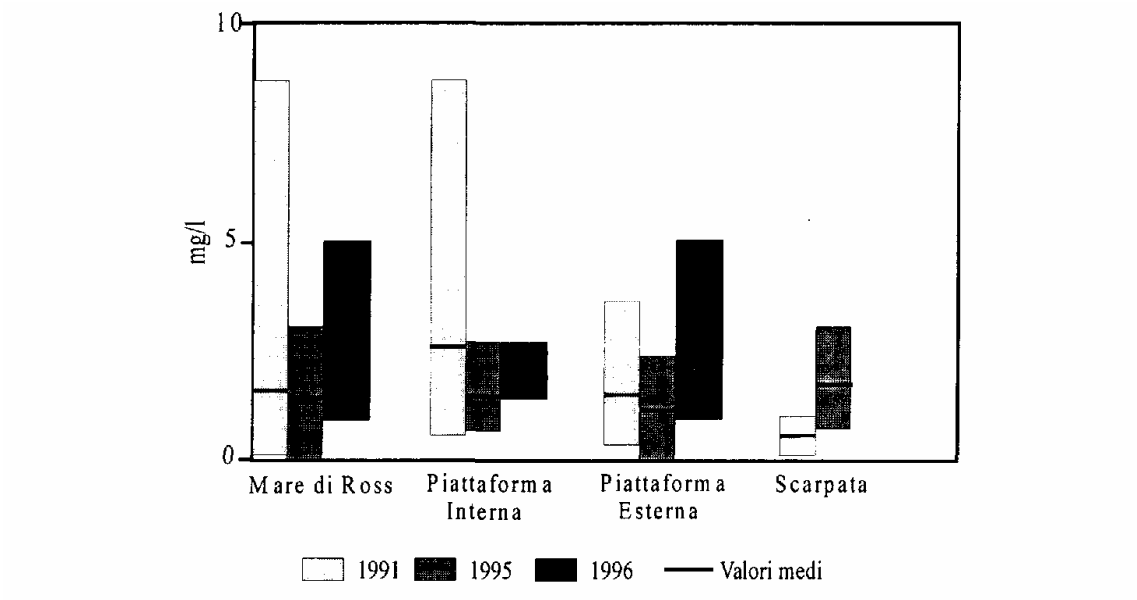

Fig. 2 - Grafico relative alla quantità di TPM totale (in mg/l) presente nei campioni superficiali (vengono rappresentati per ogni colonna i valori minimo, medio e massimo).

La Figura 3 (valori percentuale di OPM) mostra valori costanti superiori al 50% in tutta 1'area d'indagine; costituisce eccezione la campagna 1995-96, che presenta valori medi di poco inferiori al 30%. Si osserva inoltre una forte variabilità, in particolare nelle acque della scarpata, con massimi prossimi al 100% e minimi inferiori al 10%.

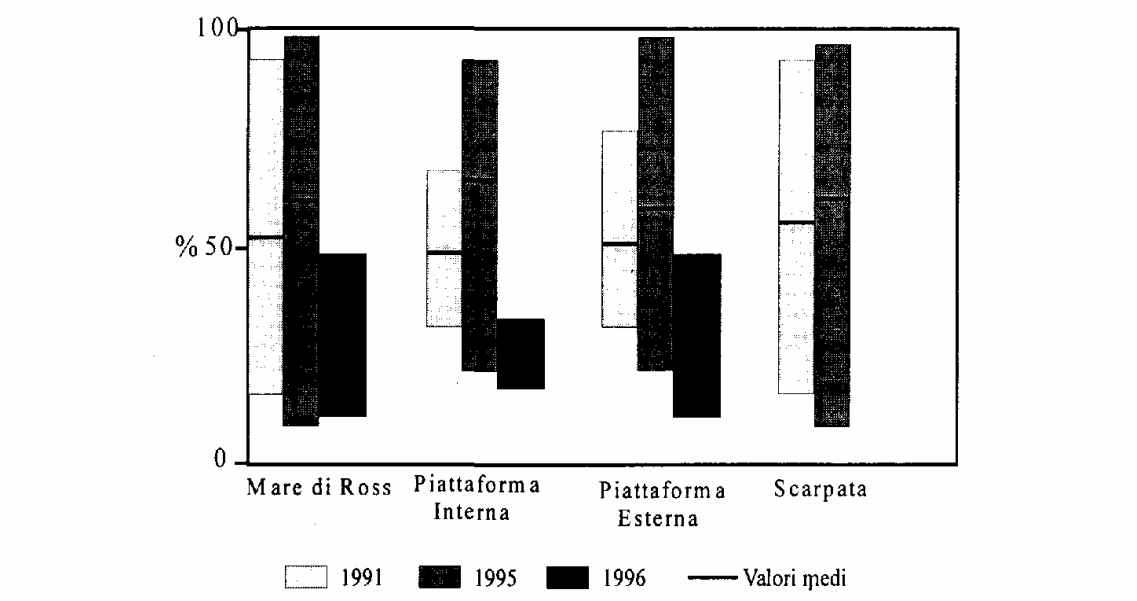

Fig. 3 - Grafico relative alla percentuale di OPM presente nei campioni superficiali (vengono rappresentati per ogni colonna i valori minimo, medio e massimo).

3.2. Strato intermedio

Subendo una minore influenza dall'ambiente esterno, le acque dello strato intermedio (Fig. 4) presentano una maggiore uniformità dei valori con scarti tra i minimi e massimi generalmente inferiori ai 2 mg/l. Le concentrazioni medie sono pressoché costanti in tutti i settori d'indagine (valori 1-1.5 mg/l) ed in tutti i periodi di campionamento. Un'osservazione più accurata permette di osservare la presenza di valori medi inferiori nell'area relativa alla piattaforma esterna (TPM <1 mg/l), cioè nel settore interessato dalle Clear Water, a favore dell'area di scarpata continentale influenzata dalla CDW, che registra valori leggermente superiori (mediamente >1 mg/l)

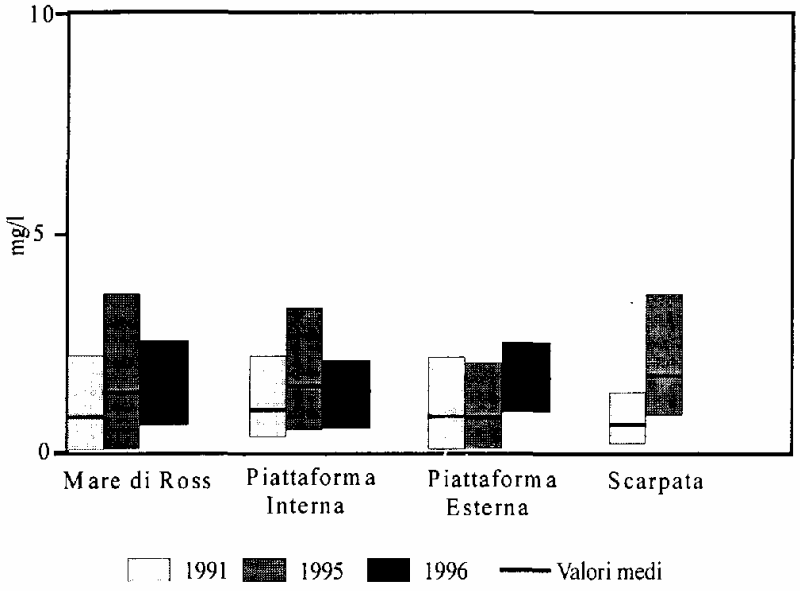

Fig. 4 - Grafico relative alla quantità di SPM totale (in mg/l) nei campioni intermedi (vengono rappresentati per ogni colonna i valori minimo, medio e massimo).

In Figura 5 sono rappresentate le quantità di TPM, espresse in percentuale, riferite alla totalità dell'area di studio e suddivise nei tre settori d'indagine, per le campagne 1990-91 e 1994-95; questa figura evidenzia quanto espresso in precedenza con un sostanziale aumento delle concentrazioni nei settori della piattaforma interna e della scarpata continentale a scapito della piattaforma esterna.

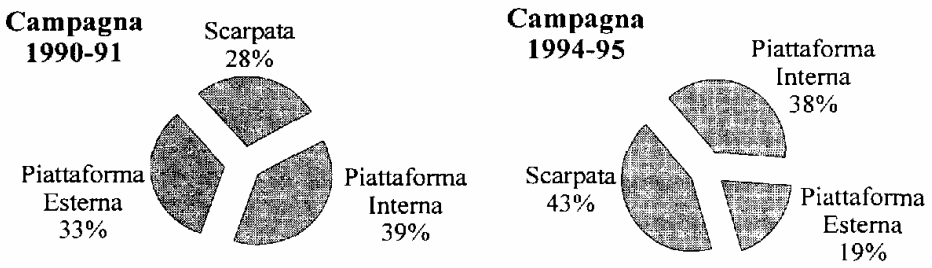

Fig. 5 - Valori percentuali del TPM per i tre settori d'indagine nelle acque intermedie.

3.3. Strato di fondo

Per quanto riguarda lo strato di fondo (Fig. 6), le acque, come gia osservato in quelle intermedie, presentano una variabilità notevolmente ridotta con valori medi simili a quelli individuati nelle acque intermedie (1-1.5 mg/l). Si discostano pero da queste ultime per una differente distribuzione areale.

Sulla piattaforma interna il TPM presenta un lieve incremento coincidente con la presenza delle shelf waters contrariamente alla piattaforma esterna dove si registra una lieve diminuzione dei valori; la scarpata continentale presenta altresì un leggero incremento dei valori di TPM, specie nella campagna 1990-91, a causa della presenza di WMCO.

La percentuale di OPM registra un decremento della frazione organica, pur mantenendosi sempre su valori prossimi al 50%, nei settori di piattaforma, mentre risulta costante nella zona dello shelf break. Come gia osservato per le concentrazioni di TPM, la variabilità dei dati e molto più contenuta rispetto a quanto osservato in superficie.

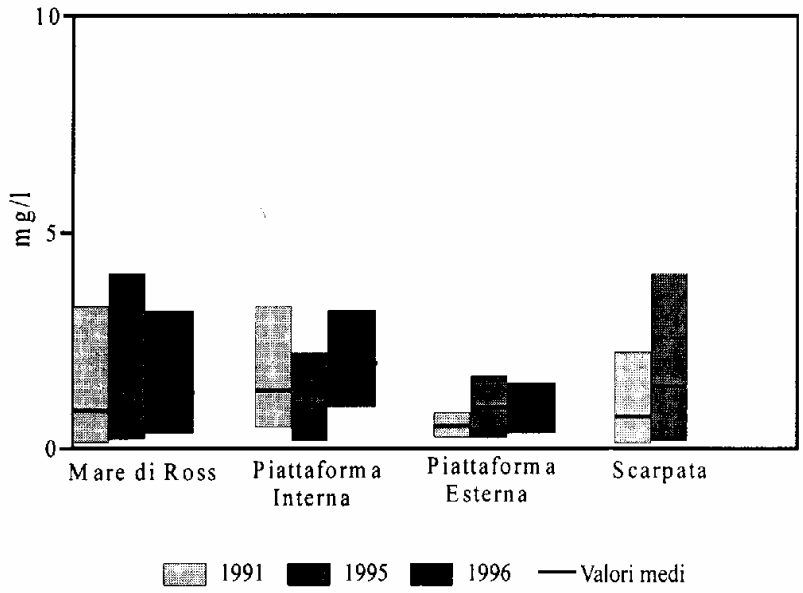

Fig. 6 - Grafico relative alla quantità di TPM totale (in mg/l) nei campioni di fondo (vengono rappresentati per ogni colonna i valori minimo, medio e massimo).

4. ANALISI DELLE TIPOLOGIE SPETTRALI DIMENSIONALI

Gli spettri dimensionali, determinati attraverso 1'analisi al Coulter, sono stati studiati in base alle loro tipologie spettrali e separati in quattro classi (a, b, c, d), risultate le più rappresentate nelle tre campagne (Fig. 7).

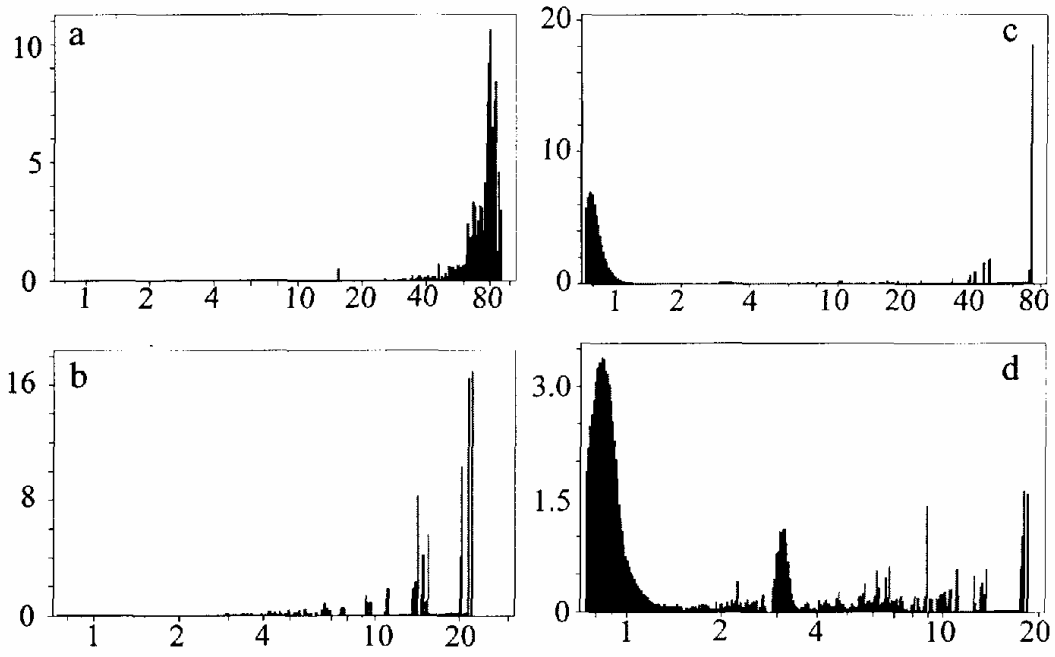

Fig. 7 - Spettri dimensionali esemplificativi delle principali tipologie spettrali (le ascisse rappresentano le dimensioni in µm delle particelle e le ordinate il volume %).

a) Spettro unimodale «L» - questa tipologia e contraddistinta dalla presenza di una sola classe modale, costituita da particelle di grande taglia, con valori compresi tra 60 e 90 µm.
b) Spettro unimodale «S» - una sola classe modale, come la tipologia precedente, ma e caratterizzata da una moda centrata su valori inferiori (20 - 30 µm).
c) Spettro bimodale asimmetrico - presenta due mode: la prima centrata nell'intorno di 1 µm, la seconda compresa tra 60 - 80 µm, con punte a 90 µm.
d) Spettro plurimodale - e caratterizzato da due mode evidenti, con caratteristiche analoghe alla classe precedente, alle quali si sommano altre mode secondarie comprese tra 5 e 30 µm.

L'analisi degli spettri dimensionali mostra, contrariamente a quanto osservato per le concentrazioni di TPM, una notevole variabilità nell'arco dell'anno nelle tipologie degli spettri. Infatti, nelle campagne effettuate nell'estate australe avanzata si registrano soprattutto tipologie spettrali unimodali, mentre la campagna 90-91, effettuata ad inizio stagione, presenta tutte le tipologie spettrali riscontrate. Infine si osserva la presenza di spettri plurimodali nelle acque superficiali della piattaforma interna, probabilmente dovuti agli apporti delle lingue glaciali continentali, e nelle acque di fondo poste, sulla piattaforma interna e sulla scarpata continentale, legate a presunti fenomeni di risospensione.

5. CONSIDERAZIONI FINALI

Il confronto dei dati raccolti nelle tre campagne oceanografiche permette di trarre alcune considerazioni generali sulla distribuzione del SPM nel Mare di Ross e sulla sua variabilità stagionale. Le acque superficiali sono ovviamente le più ricche in TPM, con i massimi valori di concentrazione distribuiti nei settori di piattaforma interessati dalle SISW e dalle ISW. Si osservano, inoltre, interessanti mutamenti stagionali a carattere locale; in particolare, nelle zone condizionate dai ghiacci, si registrano alti valori della concentrazione di TPM ed OPM mentre le tipologie spettrali presentano caratteristiche plurimodali. Infine le concentrazioni di OPM sono decisamente superiori nelle campagne relative al secondo periodo dell'estate australe.

Le acque intermedie presentano in assoluto i minori valori di concentrazione, in particolare nella piattaforma esterna, in coincidenza con le Clear Water, mentre i valori risultano leggermente maggiori nella piattaforma interna e nella scarpata continentale. Per quanto riguarda la variabilità stagionale si segnala solo un leggero incremento delle concentrazioni di TPM nelle campagne relative al secondo periodo estivo.

Le acque di fondo registrano un incremento della concentrazione nei settori della piattaforma interna e della scarpata continentale, mentre si mantengono su valori inferiori ad 1 mg/l nella piattaforma esterna. Presumibilmente quest'incremento è da imputare alla: presenza di correnti di fondo dipendenti dalle DISW e dalle HSSW sulla piattaforma, e dalla CDW in scarpata che, oltre al trasporto di materiale, generano fenomeni di risospensione (Tucci *et al.,* 1999); queste sono evidenziate dalla presenza di tipologie dimensionali plurimodali e/o bimodali a fronte di campioni essenzialmente unimodali presenti nelle acque circostanti. II confronto stagionale indica una sostanziale uniformità delle concentrazioni di TPM e di OPM.

BIBLIOGRAFIA

Bergamasco A., Carniel S. & Caldesi Valeri L. 1997. Reconstructing the general circulation of the Ross Sea (Antarctica) using a robust diagnostic model. The Oceanography of the Ross Sea - Antarctica. Springer Verlag Eds.

Biscaye P.E. & Eittreim S.L. 1977. Suspended Particulate loads and transports in the nepheloid of the abyssal Atlantic Ocean. *Marine Geology,* 23: 155-172.

Coulter® Electronics Ltd. 1988. Fine Particle Application. Notes for Coulter® Counter Instruments. ISSUE.

Davey F.J. 1987. Geology and structure of the Ross Sea Region. Antarctic Continental Margin: Geology and Geophysics of the Western Ross Sea. CPCEMR, *Earth Science Series,* v. 5B: 1-15.

Dunbar R.B., Anderson J.B., Domack E.W. & Jacobs S.S. 1984. Oceanographic influences on sedimentation along the antarctic continental shelf. In: Oceanology of the Antarctic Continental Shelf (Jacobs S.S. ed.), American Geophysical Union, Washington DC: 291-312.

Jacobs S.S., Amos A.F. & Bruchhausen P.M. 1970. Ross Sea oceanography and antarctic bottom water formation. *Deep Sea Research,* 17: 935-962.

Jacobs S.S. & Fairbanks R.G. 1985. Origin and evolution of water masses near the antarctic continental margin: evidence from $H_2{}^{18}O/H_2{}^{16}O$ ratios in seawater. In: Oceanology of the Antarctic Continental Shelf (Jacobs S.S. ed.), American Geophysical Union, Washington DC: 59-85.

Krank K. & Milligan T. 1978. The use of the Coulter Counter in studies of particle size-distribution. Aquatic Environment, Bedford Institute of Oceanography-Dartmouth, Canada, Report Series, BI-R-79-7.

Monaco A., Biscaye P., Soyer J., Pocklington R. & Heussner S. 1990. Particle flux and ecosystem response on a continental margin: the 1985-1988 Mediterranean ECOMARGE experiment. *Continental Shelf Research,* Vol. 10, n° 9-11: 809-839.

Piccazzo M. & Tucci S. 1983. Distribuzione e trasporto di materiale particolato sospeso nei canyons di Genova. Atti V Congresso Aiol, Stresa: 675-690.

Spezie G., Tucci S., Budillon G., Corradi N., Piccazzo M., Fanucci F., Firpo M., Mirabile L. & Ferrari M. 1993. Water masses characteristics, sediment dispersal and seismic stratigraphy in the continental margin of the Ross Sea (Antarctica). *Annali Facolta Scienze Nautiche,* I.U.N. Napoli, Vol LX.

Strickland J.D.H. & Parson T.R.. 1968. A practical handbook of seawater analysis. *Bull. Fish. Res. Board of Canada,* 167, 311 pp.

Tucci S., Ferrari M. & Capello M. 1999. Actual sedimentation on the antarctic continental shelf (Southern part of the Ross Sea). Oceanography of the Ross Sea - Antactica. Springer Verlag: 197-208.

Lavoro presentalo al XIII Congresso A. I. O. L, Portonovo (Ancona), 28-30 settembre 1998

Atti Associazione Italiana Oceanologia Limnologia, 13 (2), pp. 333-341, luglio 2000

VARIAZIONIINTERANNUALI DEL LIVELLO DI EUTROFIZZAZIONE LUNGO UN TRANSETTO POSTO ALL'ALTEZZA DI SENIGALLIA (ADRIATICO-SETTENTRIONALE): 1988-1994

Mauro MARINI[1], Cecilia TOTTI[2], Antonio ARTEGIANI[1]

[1]Istituto di Ricerche sulla Pesca Marittima - CNR, 60125 ANCONA
[2]Istituto di Scienze del Mare Università degli Studi, 60131 ANCONA

ABSTRACT

The TRIX index was applied to a 7 years data set recorded along a transect off Senigallia (Northern Adriatic Sea) to evaluate the trophic level at 3 stations located along a trophic gradient. Dissolved Inorganic Nitrogen (DIN) and Dissolved Inorganic Phosphorus (DIP) were used and TRIX index showed a significant positive correlation with DEN. In the 1994 higher trophic level expanded up to 15 nM., in an area usually external to the coastal front which confines a more eutrophic area and we correlate this phenomenon with meteo-climatic conditions of the period. The TRIX index was confirmed to be a valid method in the assessing the trophic level in coastal waters.

RIASSUNTO

L'indice TRIX per la valutazione del livello di eutrofizzazione e stato applicato alla serie storica (1988-1994) dei dati rilevati lungo il transetto di Senigallia (Adriatico settentrionale), su 3 stazioni caratterizzate da un differente grado di trofia. I parametri utilizzati per il calcolo dell'indice sono: azoto inorganico disciolto (DIN), fosforo inorganico disciolto (DIP) come PO_4, clorofilla ed ossigeno disciolto. L'indice TRIX e correlate significativamente, in modo positive, soltanto con il DIN.

Nel 1994 si e manifestata la tendenza ad una espansione del fronte della zona a maggiore trofia verso il largo fino a 15 Mn, dove solitamente non si riscontravano livelli elevati di eutrofia.

L'indice si e rivelato un valido strumento per il monitoraggio del livello trofico dell'Adriatico ed il fenomeno individuate dal TRIX nel 1994 trova un riscontro anche negli eventi meteo-climatici registrati in quel periodo.

1. INTRODUZIONE

Il bacino settentrionale del Mare Adriatico rappresenta una delle regioni più produttive del Mediterraneo, per la sua particolare morfologia e per 1'elevato carico trofico

che riceve attraverso i fiumi che vi sfociano, sia sul versante orientale che occidentale, tra cui il più importante per portata e il Po (Buljan & Zore-Armanda, 1976; Degobbis & Gilmartin 1990; Artegiani & Azzolini, 1981; Raicich, 1994; Zoppini *et al.,* 1995).

La circolazione caratteristica dell'Adriatico centre settentrionale e anticiclonica e convoglia le acque continentali da nord-ovest verso sud-est lungo la costa occidentale. Tale corrente determina un fronte termoalino più o meno pronunciato a seconda della stagione, che tende a separare le acque costiere da quelle del largo mediante un sistema frontale. II transetto di Senigallia si trova nell'Adriatico settentrionale ad una latitudine ove la corrente costiera e ben formata (Artegiani *et al,* 1997) ed ove dal 1988 l'IRPEM-CNR conduce osservazioni a cadenza mensile, in alcuni periodi bimestrale rilevando parametri idrologici, chimici e biologici.

Il livello di eutrofizzazione può essere espresso in vari modi: concentrazione di clorofilla, carico di nutrienti o densità fitoplanctonica (Ghirardelli, 1981; Giovanardi, 1992).

Vollenweider *et al.* (1998) proposero 1'impiego dell'indice TRIX utilizzando parametri legati alla produzione (clorofilla ed ossigeno) con quelli nutritivi disciolti (azoto e fosforo disciolti). Nell'applicazione dell'indice e stato scelto di utilizzare i sali nutritivi maggiormente analizzati, per una maggiore diffusione di tale equazione anche in altre zone della costa italiana. I parametri usati sono azoto inorganico disciolto (DIN) ricavato dalla somma di nitrati, nitriti ed ammoniaca c fosforo inorganico disciolto (DIP)'come PO_4.

Mediante 1'applicazione dell'indice TRIX si e voluto valutare il livello di eutrofizzazione in aree che solitamente non sono interessate da tale fenomeno, per controllarne spazialmente 1'estensione e valutare eventuali variazioni stagionali e interannuali. Scope del presente lavoro e quello di analizzare i dati del transetto di Senigallia, considerando 3 stazioni a differente distanza dalla costa, per valutare se 1'indice trofico TRIX può essere utilizzato anche in aree adriatiche meno influenzate dal Po.

Per meglio interpretare la risposta dell'indice TRIX si e effettuato un confronto con i valori di densità fitoplanctonica, analizzando cosi 1'influenza di uno dei parametri inseriti nella struttura del TRIX, la clorofilla *a.*

Il monitoraggio, chimico e biologico dell'Adriatico, rappresenta uno degli obiettivi del prossimo futuro, in quanto, data la sua particolare morfologia ed il suo elevato carico trofico può essere facilmente sottoposto a condizioni di stress dovute anche a particolari condizioni climatiche.

2. MATERIALI E METODI

Nel periodo aprile 1988 - dicembre 1994 sono state effettuate lungo il transetto di Senigallia crociere oceanografiche aventi cadenza bi-trimestrale negli anni 1988-92 e mensile negli anni 1993-94.

Nel transetto sono state considerate le stazioni SG01 (1.2. Mn, prof. 11m), SG03 (6 Mn, prof. 18 m) e SG05 (15 Mn, prof. 55 m) (Fig. 1).

I parametri fisici, dopo il 1990, sono stati rilevati con CTD del tipo SBE 9/11, fino ad allora sono stati utilizzati termometri a mercurio a rovesciamento per la misura della temperatura, mentre la salinità e stata determinata con un salinometro, analizzando in

laboratorio i campioni d'acqua prelevati alle quote di rovesciamento dei termometri; le analisi dell'ossigeno disciolto sono state effettuate secondo il metodo Winkler (1888), rivisto secondo Strickland & Parsons (1968); i sali nutritivi e la clorofilla *a* sono stati analizzati con il metodo spettrofotometrico secondo Strickland & Parsons (1968). L'analisi quali-quantitativa del fitoplancton e stata effettuata al microscopio rovesciato secondo il metodo Utermöhl, su campioni fissati con formaldeide allo 0.8% (Throndsen, 1978).

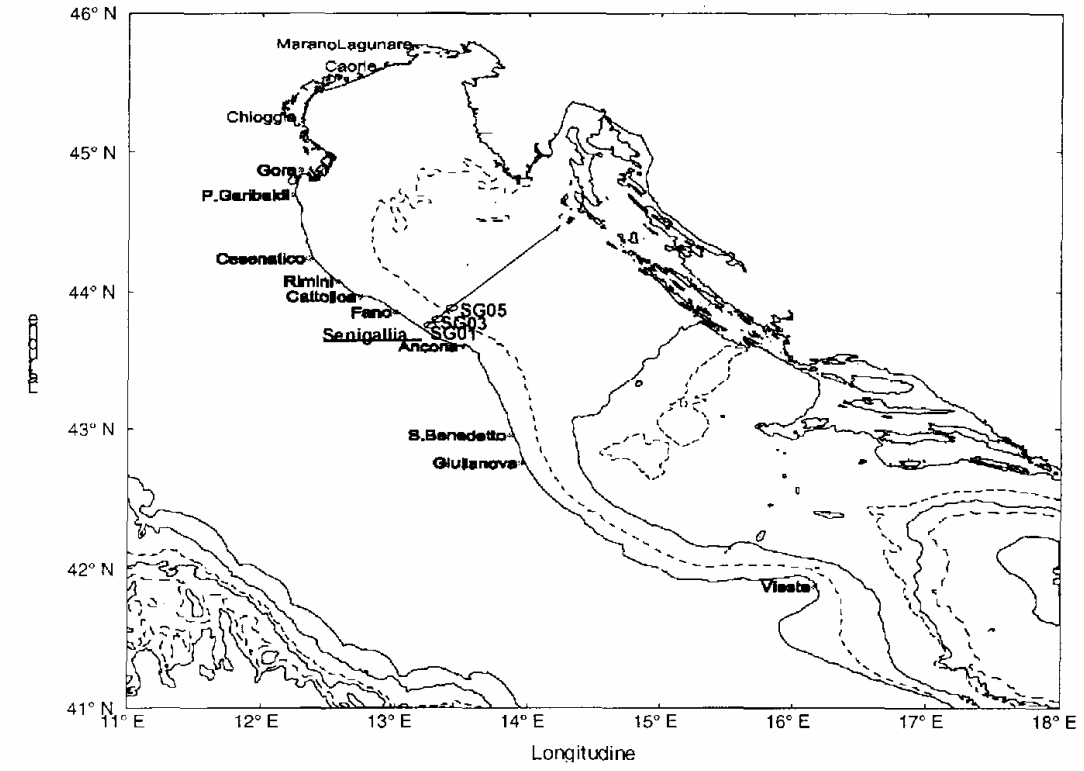

Fig. 1 - Area di studio: stazioni SO01, SG03 e SG05 sul transetto di Senigallia.

L'equazione applicata per 1'analisi del livello di eutrofizzazione secondo 1'indice trofico TRIX (Vollenweider *et al.,* 1998) utilizzando i valori di azoto totale disciolto e fosforo totale disciolto e:.

$$[\log(Ch \cdot aD\%O \cdot N \cdot P)-(-1,5)]/1,2$$

dove Ch = clorofilla *a* (µg 1^{-1}), aD%O = scarto dalla saturazione della percentuale di ossigeno disciolto in valore assoluto, N = azoto minerale disciolto: NO_2 + NO_3 + NH_3 (µg 1^{-1}), P = fosforo minerale disciolto (µg 1^{-1}).

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

Nella Figura 2 e rappresentata la correlazione tra 1'indice TR1X e DIN. L'analisi del valori, tutti insieme (42 dati), mostra un coefficiente di regressione di 0,3611 (0,1304, al quadrato) che e significative al 95%, un'analisi fatta scartando i dodici dati del 1994, (su 30 dati) mostra un coefficiente di regressione di 0,5525 (0,3053, al quadrato), che e significative al 99%. Nella Figura 3 si può notare che c'è correlazione tra TRX e DIP soltanto per un breve periodo (maggio 1992-gennaio 1994) dove si raggiunge una correlazione al 95%, con 9 dati, mentre non c'è correlazione analizzando tutti gli altri dati. Tra i sali nutritivi che più condizionano 1'indice TRIX 1'azoto appare correlato direttamente; mentre con il fosforo non c'e correlazione.

Nelle Figure 4 e 5 sono riportati gli andamenti temporali dei valori di.TRIX nella stazione SG01 confrontati con gli andamenti dell'azoto e fosforo inorganici.

Per quanto riguarda 1'azoto nei periodi di aprile 88, gennaio 90, maggio 91, febbraio 92 e maggio 93, si osserva una relazione diretta tra massimi di azoto e massimi di TRIX. Per ciò che riguarda il DIP non si evidenzia un analogo comportamento ad eccezione del febbraio 1992 in cui ad un picco ben marcato di DIP corrisponde un picco secondario di TRIX (vedi Fig. 5).

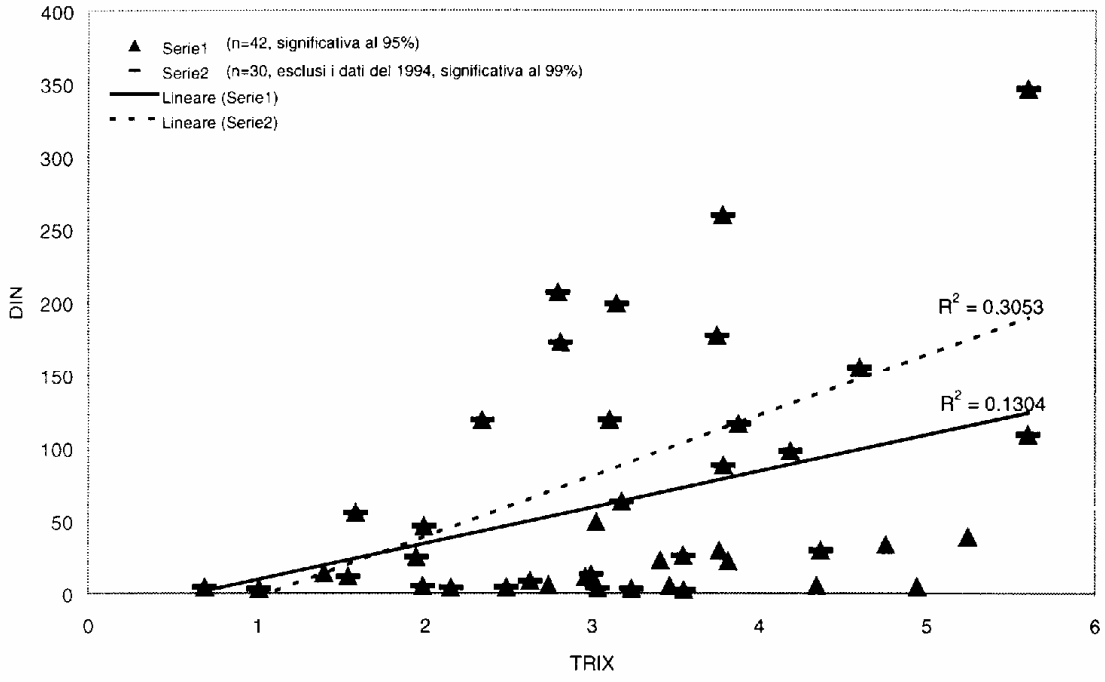

Fig. 2 - Correlazione tra azoto inorganico disciolto ($\mu g\ l^{-1}$) e TRIX.

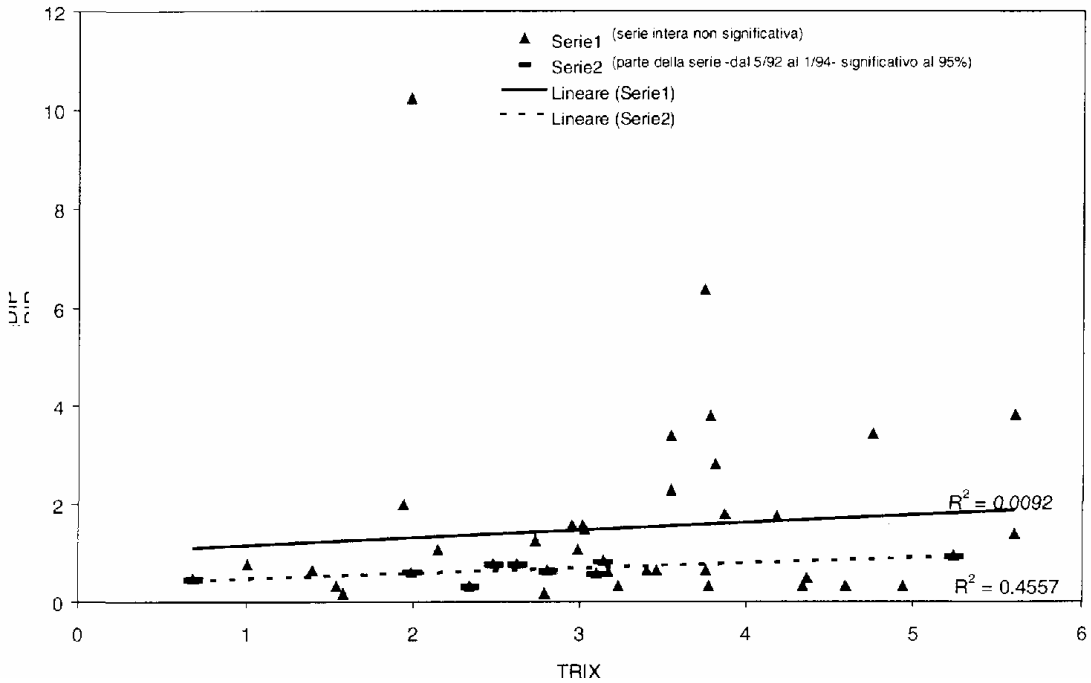

Fig. 3 - Correlazione tra fosforo inorganico disciolto (µg l^{-1}) e TRIX.

Nella Figura 6 sono riportati i valori di clorofilla *a.* Si nota come ai massimi di clorofilla *a,* ben evidenti, di febbraio 1989, gennaio 1991 e dicembre 1994 corrispondono livelli massimi dell'indice TRIX, ma non del DIN o del DIP, a parte il calo di gennaio 1991 ove si nota un massimo relative di DIP.

In altri casi (agosto 1989; gennaio, febbraio, luglio 1994), in concomitanza a valori di azoto, fosforo e clorofilla non particolarmente elevati si osservano alti valori di TRIX. Nell'agosto 1990 (Fig. 5) con un valore particolarmente alto di fosforo non si riscontra un alto valore di TRIX, ciò a conferma che il fosforo da solo non condiziona i valori di TRIX.

Il confronto dei dati di fitoplancton (cell. l^{-1}), Figura 7, con i valori di TRIX sono stati utilizzati come controllo dell'andamento dell'indice. Ad esempio il dato osservato il 22 gennaio 1991, dove si osserva un alto valore di TRIX anche senza elevate concentrazioni di nutrienti, e giustificato dall'elevato valore di clorofilla *a.*

Il confronto tra la concentrazione di fitoplancton totale e diatomee evidenzia che le diatomee sono la classe più rappresentata come gia riportato da Totti *et al.,* (1996).

Il valore dell'indice TRIX nella stazione a 15 Mn (SG05), dal dicembre 1993 fino a dicembre 1994, e aumentato fino a raggiungere i livelli delle stazioni più costiere.

Nel luglio del 1994 si sono raggiunti valori massimi di TRIX pari a 4,5 (Fig. 8).

Questo fenomeno concorda con 1'analisi dei dati idrologici di temperatura, salinità e densità (Artegiani *et al.,* 1996) che evidenziano 1'esistenza in quel periodo di acqua

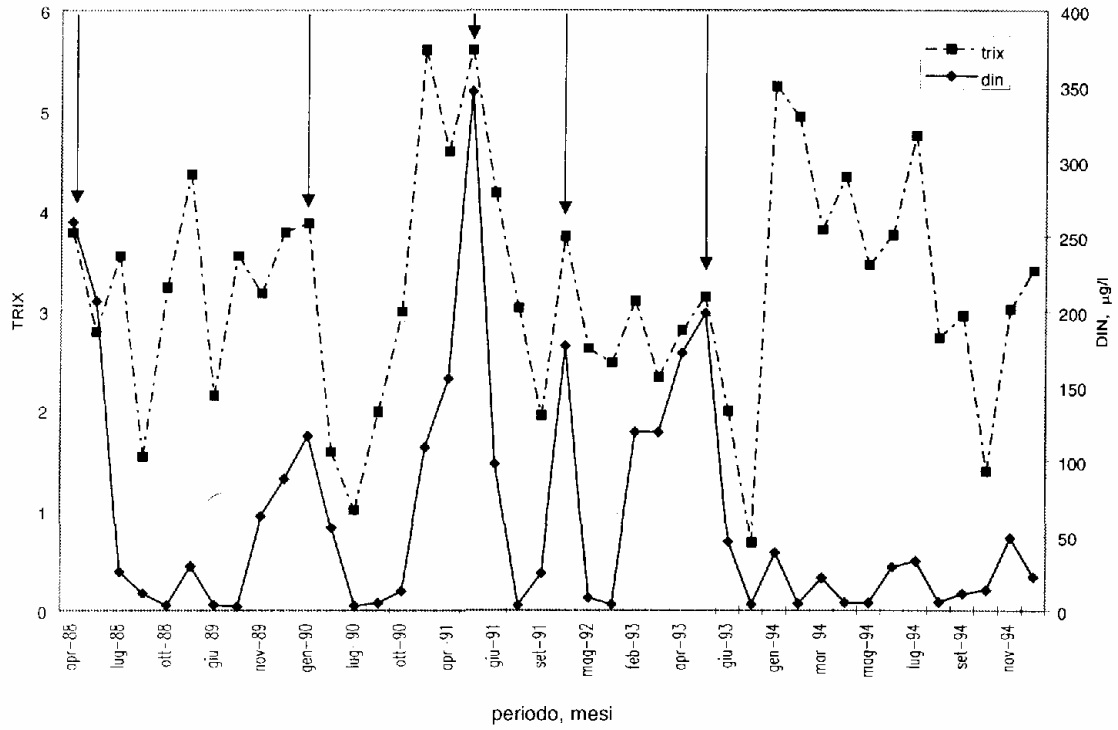

Fig. 4 - Stazione SG01 0,5 m, confronto tra dati di azoto e TRIX.

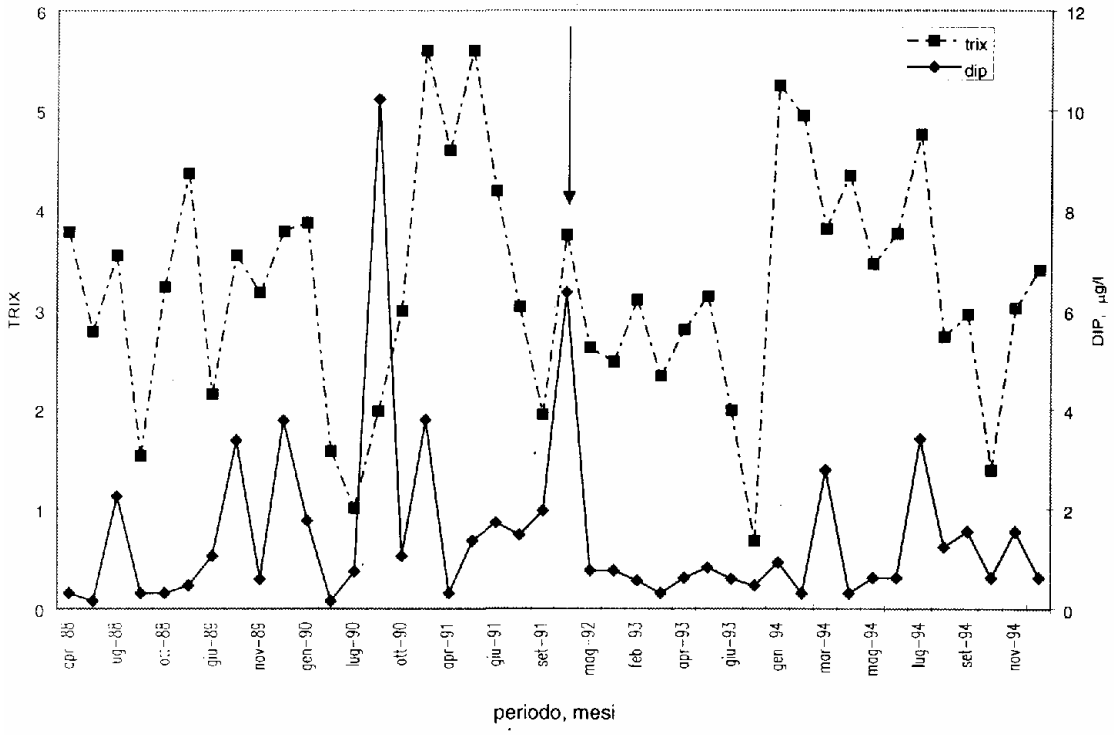

Fig. 5 - Stazione SG001 0,5 m, confronto tra dati di fosforo e TRIX.

più dolce di provenienza continentale che permane per molto tempo nell'Adriatico settentrionale a causa dell'andamento del principali venti (debole Bora e forte Scirocco).

Conseguentemente si ha una scarsa formazione di acqua densa e una maggiore estensione della distribuzione superficiale d'acqua dolce.

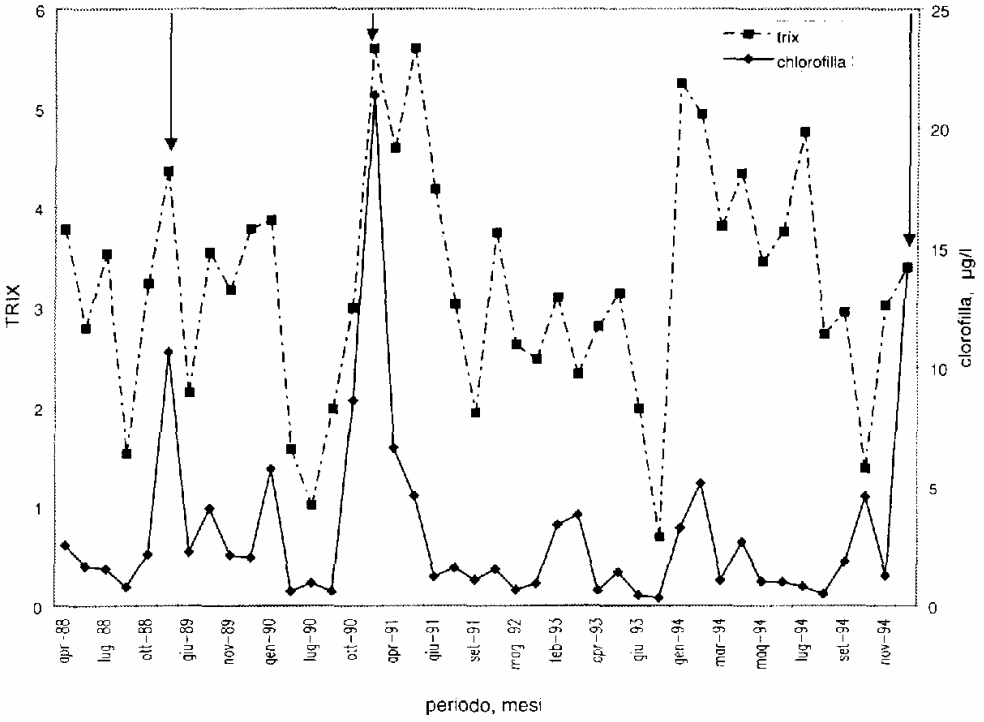

Fig. 6 - Stazione SG01 0,5 m valori di clorofilla *a*.

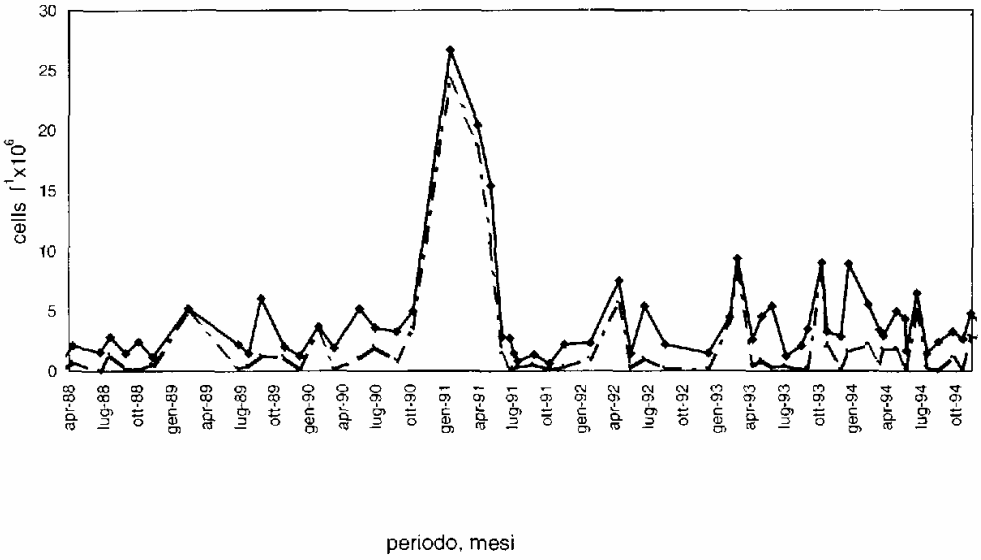

Fig. 7 - Stazione SG01 0,5 m valori di fitoplancton (linea piena) e valori di diatomee (linea spezzata).

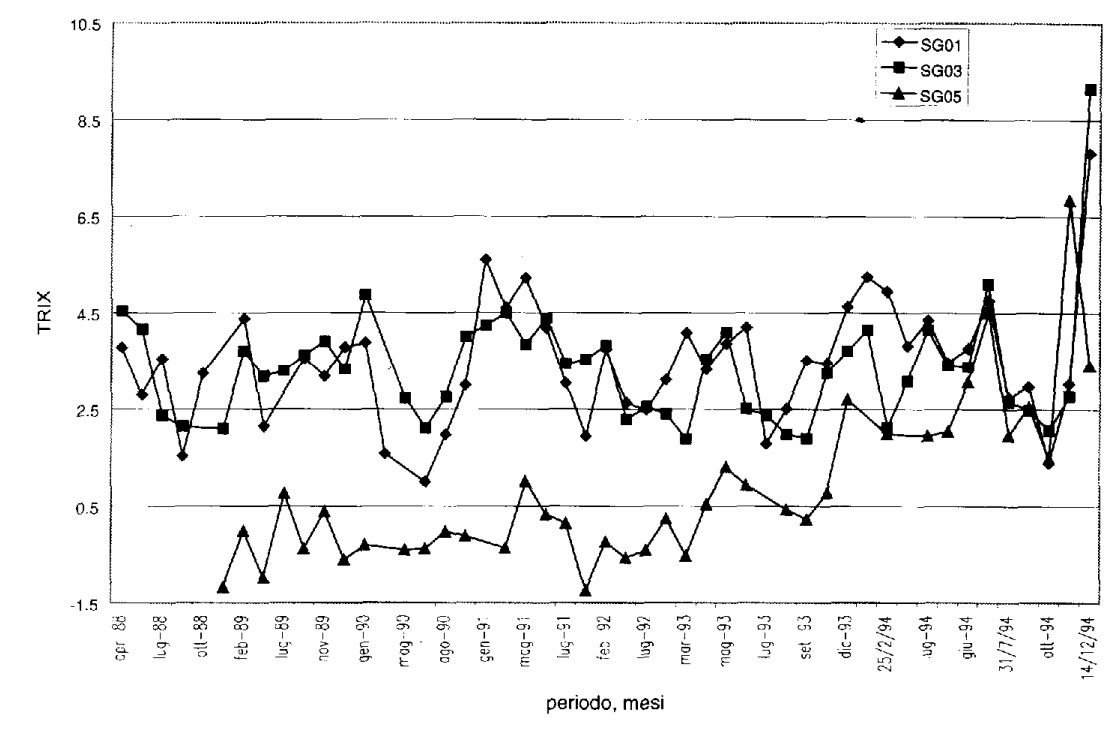

Fig. 8 - Valori di TRIX a confronto.

4. CONCLUSIONI

L'applicazione dell'indice TRIX si e rivelata particolarmente valida per 1'area meridionale dell'Adriatico settentrionale entro la fascia costiera. Nelle zone più al largo 1'indice esprime valori negativi, quindi non validi, questo a giustificazione di una applicazione non idonea per zone a bassa trofia.
Anche in aree apparentemente non adatte per 1'uso di questo indice, si e potuto constatare che dal dicembre 1993 fino ad ottobre 1994 si e osservato un aumento del livello di trofia nella stazione più al largo, distante dalla costa 15 Mn.

Questo fenomeno potrebbe essere un evento sporadico e legato alle condizioni meteorologiche particolari che si sono verificate nel 1994, con venti di direzione prevalente da Sud-Est (Scirocco) e con un inverno mite (con debole Bora), che hanno causato una diminuzione dell'intensità delle correnti marine verso Sud che allontanano velocemente le acque dolci di origine continentale.

Se 1'analisi dei dati degli anni successivi confermerà questo andamento potremmo trovarci di fronte ad una espansione del fenomeno di eutrofizzazione della fascia costiera della zona meridionale dell'Adriatico settentrionale verso zone più al largo, caratterizzate da profondità superiori ai 40 m.

BIBLIOGRAFIA

Artegiani A. & Azzolini R. 1981. Influence of the Po floods on the western Adriatic coastl water up to Ancona and Beyond. Commission International pour L'exploration scientifique de la mer Mediterranee, 26: 115-119.

Artegiani A., Bregant D., -Paschini E., Pinardi N., Raicich F. & Russo A. 1997. The Adriatic sea general circulation. Part II: Baroclinic circulation structure. *J. Phys. Oceanogr.,21:* 1515-1523.

Artegiani A., Pariante R., Paschini E., Russo A.& Totti C. 1996. Seasonal evolution of the physical water properties observed from the Senigallia transect. Proceedings of the Workshop: Physical and Biogeochemical Processes of the Adriatic Sea., (Artegiani A., Hopkins T.,Cauwet G., Degobbis D. & Maiej A. eds.), UER 18834: 59-63.

Buljan M., Zore-Armanda M. 1976. Oceanographical properties of the Adriatic sea. *Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev.* 14: 11-89.

Degobbis D. & Gilmartin M 1990. Nitrogen, Phosphorus and biogenic silicon Budgets for the northern Adriatic Sea. *Oceanol. Acta,* 13: 31-45.

Ghirardelli E. 1981. La vita nelle acque. Utet, 610 pp.

Giovanardi F. & Tromellini E. 1992. Statistical assessment of trophic conditions. Application of the O.E.C.D. methodology to the marine environment. In: Marine Coastal Eutrophication. (Vollenweider R.A., Marchetti R. & Viviani R. eds.), Elsevier, 1310 pp.

Raicich F., 1994. Note on the flow rates of the Adriatic rivers. CNR ITT Techn. Rep. RF 02/94, 8 pp.

Strickland J.D.H. & Parson T.R. 1968. A practical handbook of seawater analysis. *Fish. Res. Ed. Can. Bull,* 167, 310pp.

Throndsen J. 1978. Preservation and storage. In: Phytoplankton Manual (Sournia A. eds.). UNESCO Paris: 69-74.

Totti C. Barletta D. Solazzi A. 1996. Temporal variation and seasonality of selected Diatom species in Northen Adriatic sea. *Giorn. Bot. It.,* 130 (1): 253.

Volenweider R. A., Giovanardi E., Montanari G. & Rinaldi 'A. 1998. Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters with special reference to the NW Adriatic sea: proposal for a trophic scale, turbidity and generalized water quality index. *Environmetrix,* 9*:* 329-357.

Winkler L.W. 1888. Die Bestimmung des im wasser gelosten sauerstoffes. *Chem. Ber.,* 21:2843-2855.

Zoppini A., Pettine M., Totti C., Puddu A., Artegiani A. and Pagnotta R. 1995. Nutrients, Standing Crop and primary production in Western coastal waters of the Adriatic Sea. Estuar. *Cstl. Shelf sci.,* 41: 493-513.

Lavoro presentato al Xlll Congresso A.I.O.L, Portonovo (Ancona), 28-30 settembre 1998

Atti Associazione Italiana Oceanologia Limnologia, 13 (2), pp. 343-350, luglio 2000

STUDIO INTEGRATO DELLE CARATTERISTICHE DEI SEDIMENTI DELL'IMBOCCATURA NORD DEL PORTO DI LIVORNO

Claudia VIRNO LAMBERTI[1], Marina PULCINI[1], Fulvio ONORATI[1], Anna Maria DE BIASI[2], Massimo GABELLINI[1], Antonella AUSILI[1], David PELLEGRINI[1]

[1] Istituto Centrale per la Ricerca scientifica e tecnologica Applicata al Mare, Roma
[2] Centro Interuniversitario di Biologia Marina, Livorno

ABSTRACT

A multidisciplinary approach is a suitable tool to evaluate the sediment quality of dredging bottoms. In the present work chemical-physical, ecotoxicological and biological analyses were carried out in an area close to the Livorno Harbour before dredging activities. Grain size, organic content and abundance of benthic species are the most important factors related to the gradient from outside to inside the harbour.

The benthic communities did not detect such a linear gradient. Anyway, clear signs of disturbance were recorded in stations inside harbour where only few tollerant species can survive.

RIASSUNTO

E' stata investigata, mediante un approccio multidisciplinare (chimico-fisico, ecotossicologico e biologico) un'area del porto di Livorno da sottoporre a dragaggio. I parametri fisico-chimici mostrano un andamento concorde con 1'esistenza di un gradiente interno-esterno porto mentre tale gradiente non appare altrettanto chiaro dai risultati ottenuti dallo studio delle comunità bentoniche. Queste ultime mostrano tuttavia evidenti segni di degrado nelle stazioni più interne del porto, dove il popolamento risulta dominate da poche specie tolleranti notoriamente in grado di colonizzare gli ambienti disturbati.

1. INTRODUZIONE

L'approccio multidisciplinare e particolarmente idoneo per caratterizzare aree dove la contaminazione dei sedimenti e responsabile del degrado degli ecosistemi e per monitorare gli effetti a medio e lungo termine delle attività di origine antropica (Chapman, 1990; Power & Chapman, 1992; Chapman *et al.,* 1996; Diaz & Rosenberg,

1996; Ausili *et al.,* 1998b).

Per ottenere una corretta valutazione della qualità dei sedimenti e opportune integrare analisi di tipo fisico-chimico, biologico ed ecotossicologico, poiché ognuno di questi approcci fornisce differenti tipi di informazioni. Infatti, 1'approccio tradizionale di tipo fisico-chimico individua valori assoluti che descrivono la tessitura e il contenuto di contaminanti inorganici ed organici del sedimento, senza tuttavia dare informazioni di tipo predittivo sul reale rischio ambientale. L'ecotossicologia, mediante l'applicazione di saggi biologici, consente di superare parzialmente il principale limite dell'approccio chimico-fisico, fornendo indicazioni relative alla biodisponibilità dei contaminanti e quindi alla loro effettiva potenzialità tossica nei confronti del biota (Landrum & Robbins, 1990; Power & Chapman, 1992). Lo studio degli aspetti compositivi e strutturali delle comunità bentoniche, infine consente di individuare eventuali alterazioni (Pearson & Rosenberg, 1978; Diaz & Rosenberg, 1996) a carico della componente biologica.

Le imboccature portuali, i porti, le aree di scarico, cosi come tutti quegli ambienti marini condizionati sia da variabili di origine antropica sia naturale, costituiscono situazioni per le quali e auspicabile 1'applicazione di tale approccio integrate.

Nel presente lavoro e stata caratterizzata tramite un approccio multidisciplinare, seppur semplificato, 1'imboccatura Nord del porto di Livorno (Mar Ligure), al fine di descrivere la situazione ambientale antecedente le operazioni di dragaggio, con la prospettiva di intraprendere un monitoraggio periodico dal termine delle attività di movimentazione dei fondali.

2. MATERIALI E METODI

Le indagini sono state effettuate nel gennaio 1997 prelevando, mediante una benna Van Veen da 2,5 litri, campioni di sedimento superficiale in 9 stazioni ad una profondità compresa tra 4,5 e 13 m (Fig. 1). Sono stati analizzati i seguenti parametri fisico-chimici: granulometria, sostanza organica (SO), idrocarburi policiclici aromatici (IPA), e metalli in traccia (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb e Zn).

La tessitura del sedimento e stata definita tramite le tre frazioni principali (ghiaia, sabbia e pelite), ottenute dopo trattamento con soluzione di H_2O_2, vagliatura su setacci ASTM (2 mm e 63 µm) ed essicamento delle frazioni.

La sostanza organica e stata determinata in doppio per via gravimetrica dopo calcinazione in muffola a 450 °C per 6 ore (Byers *et al.,* 1978).

Tra gli TPA sono stati ricercati i 16 composti molecolari indicati dall'EPA come contaminanti di rilevante importanza tossicologica (USEPA, 1986) secondo le metodiche riportate in Pinto *et al.* (1995).

L'analisi dei metalli in tracce e stata eseguita mediante mineralizzazione acida totale (HCl s.p. + HNO_3 s.p. + HF s.p.) in forno a microonde e successiva lettura con spettrofotometro ad assorbimento atomico (AAS), ad eccezione del Hg analizzato tramite la melodica dei vapori freddi dopo riduzione con $SnCl_2$.

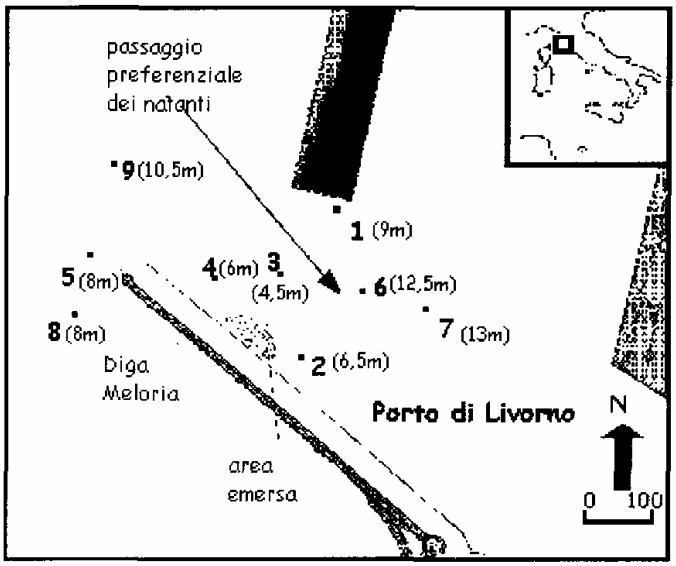

Fig. 1 – Imboccatura nord del Porto di Livorno.

I limiti di rilevabilità e le percentuali di recupero, rispetto a standard internazionali certificati relativi alle metodiche adottate, sono riportati nella tabella 1.

Tab. 1 - Limite di rilevabilità e percentuale di recupero rispetto a standard certificati relativi alle metodiche adottate nelle analisi chimiche.

Parametro	**Limite di rilevabilità** ($\mu g\ kg^{-1}$ p.s.)	**Recupero** (%)
IPA (singola specie)	1	70-80
As	4,00	107
Cd	0,08	106
Cu	0,15	102
Hg	3,01	114
Pb	3,61	93
Ni	3,01	90
Zn		71

E' stato applicato il saggio biologico Microtox® basato sulla riduzione della bioluminescenza naturale del batterio *Vibrio fisheri.* I saggi sono stati applicati alla fase solida e all'acqua interstiziale ottenute per centrifugazione (8.000 rpm per 30 minuti a 4 °C). Sono stati applicati i protocolli standard (Azur Environmental, 1994a e 1994b), con le modifiche relative al diluente/controllo e adottando il criterio di normalizzazione pelitica per quanto riguarda l'interpretazione del risultato del test in fase solida riportate in Onorati *et al.,* (1999).

I dati fisici, chimici ed ecotossicologici standardizzati [$X = (X_n$ - media) / dev. std.] sono stati elaborati tramite analisi delle componenti principali (PCA).

Per lo studio delle comunità bentoniche sono state effettuate 4 repliche per sta-

zione, vagliando il sedimento su setaccio da 0,5 mm. L'analisi strutturale del popolamento e stata limitata al calcolo del numero totale di specie (S) e di individui (N).

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

I risultati delle analisi fisico-chimiche sono riportati in tabella 2.

Tab. 2 - Dati fisico-chimici del sedimenti dell'area indagata (granulometria e sostanza organica sono espressi in %, metalli e IPA in mg kg^{-1} p.s.).

Parametro	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4	St. 5	St. 6	St. 7	St. 8	St. 9
Ghiaia	0,00	17,54	0,00	0,00	11,83	0,00	0,13	8,05	2,30
Sabbia	51,81	67,09	74,89	87,91	87,76	30,09	14,64	91,11	59,14
Pelite	48,19	32,17	25,11	12,09	0,41	69,91	85,23	0,84	38,56
Sost. Org.	5,20	5,89	4,45	1,77	0,90	9,86	9,14	1,37	2,40
As	12,42	11,19	14,68	9,85	27,92	16,44	20,27	19,22	27,25
Cd	0,35	0,157	0,746	0,39	0,06	0,281	0,31	0,065	0,25
Cu	32,42	29,13	19,92	10,67	6,67	43,13	50,36	7,04	19,07
Cr	146,02	118,23	123,26	110,19	19,89	151,52	173,00	28,73	112,59
Hg	0,11	0,11	0,08	0,06	0,03	0,19	0,18	0,03	0,06
Ni	64,57	49,69	51,69	41,46	19,33	79,31	87,35	21,2	53,18
Pb	24,5	40,4	27,1	19,9	17,1	36,5	42,6	16,6	22,9
Zn	98,58	104,88	113,64	83,80	29,15	124,93	143,43	40,35	72,25
ΣIPA	1,075	1,016	1,261	0,303	0,074	0,995	0,569	0,087	0,139

La tessitura del sedimenti risulta sostanzialmente grossolana nella porzione esterna al porto (sabbia > 50%), in particolare a ridosso della diga Meloria dove si verifica un accumulo di sedimenti sabbiosi i quali, in un'area ristretta, affiorano (Fig. 1). Le stazioni 6 e 7, più interne al porto, presentano una elevata frazione pelitica.

La sostanza organica, variando in funzione della tessitura del sedimento, segue un andamento crescente dall'esterno verso 1'interno del porto, con valori massimi nelle stazioni 6 e 7.

Per quanto riguarda il contenuto in metalli pesanti, salvo qualche eccezione (Cd nella stazione 3 e As nelle stazioni 5 e 9), non si riscontrano valori particolarmente elevati o comunque confrontabili a quelli tipici delle aree portuali più interne (Pellegrini *et al.,* 1997; Ausili *et al.*, 1998ae 1998b).

I livelli di IPA risultano relativamente elevati solo nelle stazioni 1, 2, e 3, nonostante la tessitura sostanzialmente grossolana dei sedimenti.

Nelle tabelle 3 e 4 vengono riportati i dati tossicologici rispettivamente per l'acqua interstiziale e per la fase solida. La natura grossolana del sedimento, l'abbondanza di residui vegetali e il basso grado di idratazione hanno impedito 1'esecuzione dei saggi nelle stazioni 5 e 8. Per esprimere la lieve tossicità acuta dell'acqua inter-

stiziale e stato necessario il calcolo della EC20, anziché della EC50, ovvero la concentrazione del campione corrispondente alla inibizione della bioluminescenza del 20% anziché del 50%.

Tab. 3 - Risultati del saggio biologico Microtox® applicato all'acqua interstiziale.

Stazione	Incubazione minuti	Tossicità (EC20)	Limiti conf. 95 % (EC20)	R^2* (%)
1	5	> 90	-	-
	15	> 90	-	-
	30	> 90	-	-
2	5	> 90	-	-
	15	63,15	58,91 - 67,69	90,4
	30	41,20	38,12 - 44,53	94,1
3	5	> 90	-	-
	15	55,89	48,88 - 63,90	66,1
	30	37,83	34,33 - 41,69	96,5
4	5	70,26	69,91 - 70,61	100
	15	67,70	63,84 - 71,80	97,6
	30	39,85	33,62 - 47,24	91,5
6	5	> 90	-	-
	15	> 90	-	-
	30	> 90	-	-
7	5	> 90	-	-
	15	> 90	-	-
	30	> 90	-	-
9	5	> 90	-	-
	15	> 90	-	-
	30	> 90	-	-

*: Coefficiente di determinazione.

Tab. 4 - Risultati del saggio biologico Microtox® applicato alla fase solida centrifugata.

Stazione	Tossicità (TU)	Limiti conf. 95 % (TU)	R^2 (%)	Tox Nat. (TU)	Soglia Tox. (TU)	S.T.I.*	Giudizio
1	329	284 - 380	99,4	138	175	1,88	Liev. tox
2	307	289 - 326	99,9	95	138	2,23	Liev. tox
3	107	97 - 119	100	74	123	0,87	Non tox
4	10	9 - 11	99,9	39	98	0,10	Non tox
6	1940	1813 - 2076	100	198	241	8,05	Tox
7	1005	798 - 1267	99,0	115	154	6,53	Tox
9	512	464 - 564	99,7	240	295	1,74	Liev. tox

*: Sediment Toxicity Index.

La tossicità acuta dell'acqua interstiziale e risultata generalmente lieve o assente (EC20 > 90 %); mentre nella fase solida essa e risultata significativa solo nelle stazioni 6 e 7, indice di una biodisponibilità di contaminanti a carattere prevalentemente

idrofobico.

La distribuzione ad arco delle stazioni nel piano della PCA (Fig. 2) suggerisce 1'esistenza di un gradiente interno-esterno porto lungo il quale sono disposte le stazioni. Fa eccezione la stazione 9 che, a causa dell'elevata tossicità relativa, tende ad essere simile alle stazioni più interne.

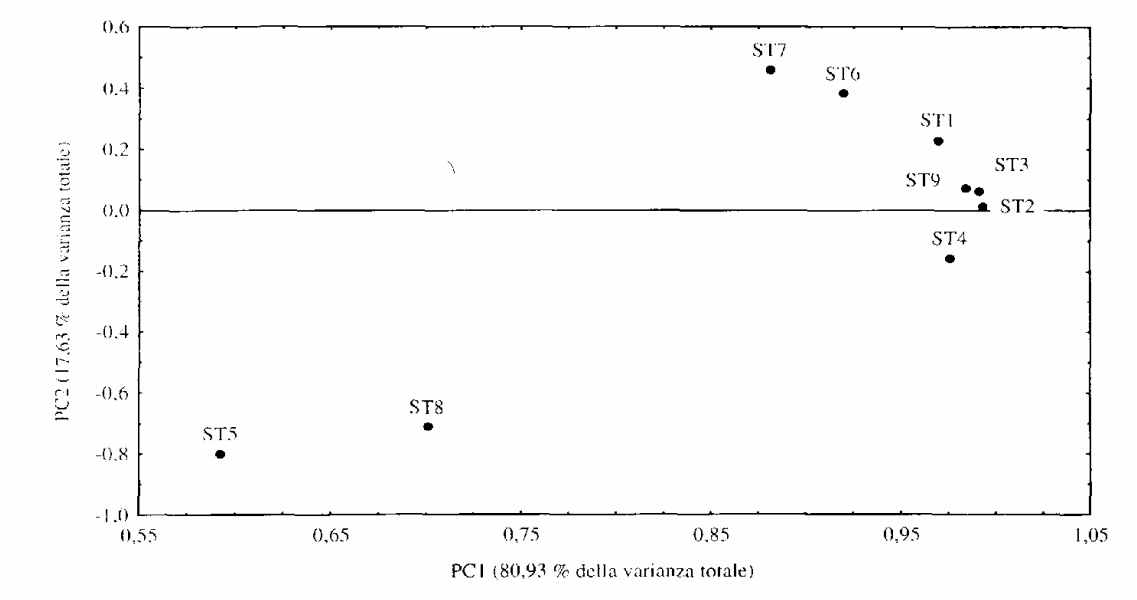

Fig. 2 - PCA relativa ai dati fisico-chimici ed ecotossicologici.

I parametri maggiormente responsabili della varianza totale risultano essere, relativamente alla prima componente, il Cr (25,19%) e lo Zn (15,76%), mentre la seconda componente e spiegala prevalentemente dalla composizione granulometrica.

In particolare le stazioni esterne 5 c 8 si distinguono nettamente a causa sia del basso livello dei metalli sopra citati che per la tessitura grossolana dei sedimenti.

L'indagine biologica ha permesso di identificare 51 specie, con un totale di 232 esemplari (84% policheti, 10% crostacei, 4% molluschi, 2% echinodermi). I parametri S ed N sono riportati in figura 3.

L'area investigata risulta colonizzata da un popolamento povero di specie, nel quale non e possibile rilevare un gradiente lineare di rarefazione delle specie dall'esterno verso 1'interno del porto.

Si riscontra, invece, una generale tendenza all'incremento dell'abbondanza media di individui verso 1'interno del porlo. In particolare, nella zona più interna sono stati campionati numerosi esemplari di specie opportuniste *(Phylo phoetida* Claparéde, *Cirrophorus furcatus* Hartman) tipiche di ambienti di decantazione (Pearson & Rosenberg, 1978), indicando 1'ingresso repentino nell'ambiente perturbato del porto.

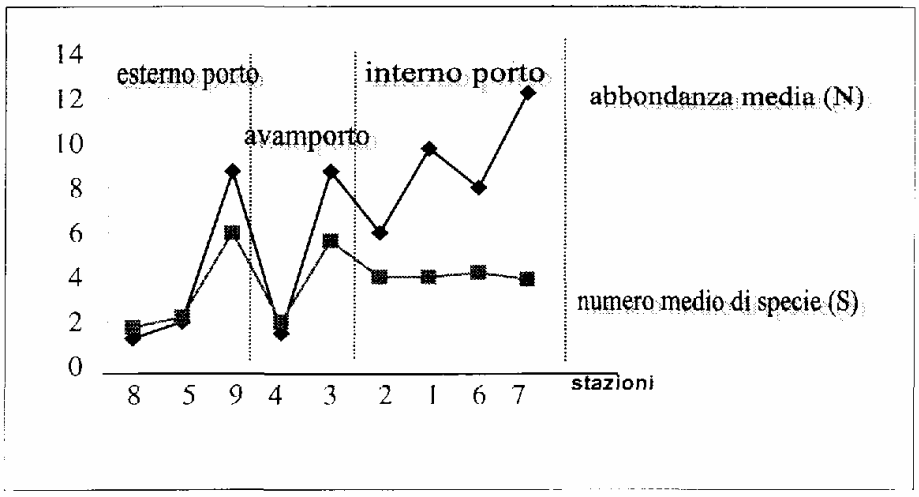

Fig. 3 - Andamenti di S e N nell'area investigata.

4. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Tra i parametri considerati la composizione granulometrica, la sostanza organica, la tossicità acuta e 1'abbondanza degli individui del macrozoobenthos risultano i fattori maggiormente discriminanti 1'interno dall'esterno del porto.

Tutti questi fattori sono notoriamente interconnessi, in particolare il progressive aumento della frazione pelitica verso 1'interno del porto incrementa le potenzialità di accumulo da parte del sedimento di sostanza organica e di contaminanti, la cui biodisponibilità e testimoniata dal grado di tossicità acuta.

La componente bentonica, pur non mostrando caratteristiche chiaramente relazionabili al gradiente interno-esterno porto, mostra evidenti segni di alterazione nelle stazioni più confinate. Qui il popolamento si presenta povero di specie, ma con un discrete numero di individui, situazione tipica di ambienti disturbati dove poche specie tolleranti a rapido turn-over sono in grado di insediarsi (Pearson & Rosenberg, 1978) e per la scarsa competizione, diventano gli elementi dominanti il panorama faunistico.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano F. Mellara (C.I.B.M., Livorno) e G. Ciuffa (ICRAM, Roma) per aver effettuato le analisi chimiche.

B1BLIOGRAFIA

Ausili A., Mecozzi M., Gabellini M., Ciuffa G. & Mellara F. 1998a. Physico chemical characteristics and multivariate analysis of contaminated harbour sediments. *Wat. Sci. Tech.,* 37: 131-139.

Ausili A., Pellegrini D., Onorati F. & De Ranieri S. 1998b. Valutazione della qualità di sedimenti del Porto di Viareggio da sottoporre ad escavo. *Acqua & Aria,* gennaio: 67-71.

Azur Environmental. 1994a. Microtox® Acute Toxicity Solid-Phase Test Procedure, 20 pp.

Azur Environmental. 1994b. Microtox® Acute Toxicity Basic Test Procedures, 63 pp.

Byers S.C., Mills E.L. & Stewart P.L. 1978. A comparison of methods of determining organic carbon in marine sediments, with suggestions for a standard method. *Hydrobiologia,* 58: 43-47.

Chapman P.M. 1990. The Sediment Quality Triad approach to determine pollution-induced degradation. *Sci Tox. Environ.,* 97(8): 815-825.

Chapman P.M., Paine M.D., Arthur A.D. & Taylar L.A. 1996. A Triad study of sediment quality associated with a major, relatively untreated marine sewage discharge. *Mar. Poll. Bull,* 32 (1): 47-64.

Diaz R.J. & Rosenberg R. 1996. The influence of sediment quality on functional aspects of marine benthic communities. In: Development and progress in sediment quality assessment: rationale, challenges, techniques & strategies (Munawar M. & Dave G. eds.). SPB Academic Pub.: 57-68.

Landrum P.F & Robbins J.A. 1990. Bioavability of sediment-associated contaminants to benthic invertebrates. In: Sediments: chemestry and toxicity of in-place pollutants. (Baudo R., Gesy J. & Muntan H, eds.). Lewis Publishers Inc.: 237-263.

Onorati F., Pellegrini D., & Ausili A. 1999. Valutazione della tossicità naturale nel saggio Microtox® in fase solida: la normalizzazione pelitica. *Acqua & Aria, 6:* 83-91.

Pearson T. & Rosenberg R. 1978. Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution in the marine environment. *Oceanog. Mar. Biol. Ann. Rev.,* 16:229-311.

Pellegrini D., Quirici F., De Ranieri S. & Romano E. 1997. Destination of different polluted harbour dredging sediments: an Italian case. International Conference on Contaminated Sediments, preprints 2: 704-709.

Pinto B., Pellegrini D., Gabellini M. & Ausili A. 1995. Harbour and coastal sediment chemistry and toxicity: a preliminary assessment of dredging activities. *J. Aquatic Ecosyst. Health,* 4: 249-255.

Power E.A. & Chapman P.M. 1992. Assessing sediment quality. In: Sediment toxicity assessment (Alien Burton Jr. ed.), Lewis Publishers Inc., 1: 1-18.

USEPA. 1986. Test methods for evaluating solid waste (sw-846). Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, D.C., 1b: 125 pp.