
LA BIOLOGIA DELL'ALTO ADRIATICO TRA SCIENZA ED INFORMAZIONE

Giuliano Orel

L'oceanografia, disciplina a cui afferisce la biologia marina, è di origine piuttosto recente. Si suole indicare come sua data di nascita il 1725, anno in cui ad Amsterdam viene pubblicato il libro "Histoire physique de la mer" e l'autore, Ferdinando Marsili, come suo fondatore.

Altre date di nascita ed altri fondatori vengono tuttavia proposti con motivazioni diverse: Edward Forbes (1815-1854), naturalista dell'isola di Man, Mattheu-Fontaine Maury (1806-1873), ufficiale di marina americano,....

In effetti, intesa in senso moderno, l'oceanografia si occupa principalmente di ciò che succede alle interfacce mare-atmosfera, mare-organismi, mare-fondali e non ultime mare-uomo e mare-società. Ecco quindi che la comprensione di qualsiasi fenomeno marino richiede l'apporto di conoscenze prodotte in differenti settori della ricerca: fisica, chimica, geologia, biologia, medicina, ecc., ed ecco perché i veri avanzamenti della conoscenza del mare si sono verificati quando le diverse discipline coinvolte negli studi oceanografici avevano raggiunto, nel loro complesso, un sufficiente grado di sviluppo. In tal senso, allora, la nascita dell'oceanografia moderna deve esser fatta coincidere con la crociera del "Challenger", una pirocorvetta britannica che con un viaggio di 69.000 miglia nei tre maggiori oceani tra il 1872 ed il 1876 ha accumulato per tutti i settori delle scienze del mare un patrimonio ancora oggi ineguagliato. Ancora oggi i 50 volumi dei "Challenger reports" sono un'indispensabile strumento di lavoro per molti di coloro che si occupano di cose marine o comunque sono la testimonianza più evidente che l'oceanografia e le discipline ad essa collegate, come la biologia marina, sono discipline di contesto.

La storia dell'oceanografia è ricca di esempi di come analogie e generalizzazioni, ardite estrapolazioni o, più recentemente, specializzazioni troppo spinte, non sorrette da sufficiente cultura o da congrui apporti multidisciplinari, non sostenute cioè da conoscenze contestuali, abbiano prodotto miti la cui tenace persistenza ha condizionato a lungo il lavoro della razionalità scientifica.

Già dalla nascita dell'oceanografia descrittiva, l'osservazione di MARSILI del decrescere della temperatura del mare all'aumentare della profondità, estrapolata a profondità via via maggiori, aveva suggerito a PERON (1775-1810) l'idea che i fondi oceanici fossero occupati da ghiacci eterni. Forse anche in base a ciò, ma soprattutto in seguito all'insuccesso di alcune dragate effettuate tra 300 e 700 metri nel Mar Egeo, un ricercatore di grande autorità, FORBES (1815-1854), aveva maturato la convinzione che i fondali marini fossero azoici a partire da queste profondità. Il fatto appariva del tutto ovvio poi, considerata l'assenza di luce e quindi di vegetali e le enormi pressioni che caratterizzano il sistema profondo. Nonostante l'accumularsi di prove contrarie, non ultima la constatazione della presenza di Foraminiferi ed altri Protozoi a circa 3000 metri di profondità nel corso della posa del primo cavo transatlantico, i partigiani della teoria di FORBES obiettarono che soltanto gli organismi più primitivi potevano vivere a tale profondità, rimandando di un po' la soluzione del problema. L'occasione arrivò nel 1860 quando un terremoto interruppe il cavo telegrafico tra la Sardegna e l'Algeria: su una delle due estremità, recuperata da 2000 metri, MILNE-EDWARDS determinò dei Molluschi e degli Antozoi viventi. Troppo facile. Anche dopo un'ulteriore raccolta di organismi bentonici a 3600 metri di profondità nel Golfo di Guascogna, durante la crociera del Porcupine (1869), gli irriducibili della sterilità dei fondali oceanici dichiararono che, in fin dei conti, tutte queste testimonianze provenivano da zone poste relativamente vicino alla costa e che certamente per i fondali dell'oceano aperto le cose non stavano così. Tra gli altri meriti della crociera dello Challenger c'è anche quello di aver posto fine a questa polemica consegnando alla ricerca circa 4500 nuove specie, provenienti da tutte le profondità oceaniche, il cui studio era lo scopo principale dell'impresa. Il mito della sterilità delle profondità oceaniche era però sopravvissuto per circa vent'anni dalla sua prima dimostrazione "sperimentale".

Anche la mitica profezia di COUSTEAU, formulata nel 1977: "Tra vent'anni il Mediterraneo sarà un mare morto!" ha compiuto più di vent'anni. Ovviamente COUSTEAU paventava gli effetti dell'inquinamento e dell'eutrofizzazione, ma probabilmente non aveva presente il funzionamento del mare a cui si riferiva. In effetti l'oceanografia fisica del Mediterraneo è governata dal clima agente sul bacino; le perdite d'acqua per evaporazione, sono maggiori dei guadagni dovuti alle piogge ed ai contributi dei fiumi: il Mediterraneo è quindi un bacino di concentrazione che appiana il suo deficit con acque atlantiche. A scala umana dei tempi il suo livello e la sua salinità rimangono costanti. Per mantenere questo bilancio il Mediterraneo deve trasformare l'acqua atlantica

entrante, diluita dalle precipitazioni e dagli apporti dei fiumi, ma concentrata e raffreddata per evaporazione, in un'acqua densa e salata che si forma principalmente in inverno in alcune zone limitate del Mar Egeo, dell'Adriatico e del settore settentrionale del bacino occidentale. Quest'acqua, tipicamente mediterranea, si scarica nell'Atlantico con una corrente profonda attraverso lo stretto di Gibilterra.

Siccome quest'acqua di profondità ha una concentrazione in Fosforo da ortofosfati più che doppia rispetto all'acqua di superficie che riceve dall'Atlantico ed ha un volume dello stesso ordine di grandezza, si deve dedurre che il Mediterraneo è soggetto ad un continuo drenaggio di nutrienti (Schema). Non è quindi attraverso un moderato incremento di nutrienti delle acque di superficie che il Mediterraneo, conosciuto come il più grande deserto liquido, potrebbe andare incontro alla morte per eutrofizzazione. D'altra parte se, come s'è detto, è il clima il motore principale del sistema è presumibile che le più importanti variazioni del suo funzionamento debbano essere attese in relazione a modificazioni climatiche capaci, ad esempio, di determinare un rapido aumento della temperatura minima delle acque superficiali con produzione di acque invernali meno dense e quindi incapaci di sostituire acque più dense già in soggiorno alle maggiori profondità. Un simile meccanismo sembra aver agito durante il primo olocene (ca. 8000 anni fa) determinando la distruzione per anossia della fauna bentonica della fossa sudadriatica.

Il quadro di morte delineato per il Mediterraneo non avrebbe certo potuto escludere l'Adriatico. Anzi, secondo alcuni ricercatori, gran parte della stampa, certi ambienti politici e quasi tutte le organizzazioni ambientaliste proprio l'Adriatico ed in particolare l'Alto Adriatico, mare fortemente incassato nel continente e quindi (si affermava) poco ricambiato, ricettore di una quota cospicua degli apporti fluviali mediterranei e per di più drenata da una delle zone più popolate ed industrializzate d'Europa, al momento della profezia (1977) aveva già manifestato chiari sintomi di distrofia.

Nell'ottobre-novembre del 1968 e nel maggio 1969 si erano avuti i primi episodi di acque colorate con morie di organismi bentonici lungo le coste dell'Emilia Romagna, fenomeno che diverrà una costante della zona a partire dal 1975 fino alla fine degli anni '80.

Già dal 1970 peraltro si succedevano episodi di acque colorate anche nella Laguna di Venezia e in diverse insenature e porti della costa istriana e dalmata e dal 1974 nel Golfo di Trieste. L'anossia verificatasi nell'ottobre-novembre 1977 nel Golfo di Venezia con estese morie di pesci ed altri organismi bentonici appariva poi la testimonianza più eclatante delle dimensioni sistemiche

dell'eutrofizzazione, testimonianza rafforzata in seguito dalla successione di fenomeni biologici abnormi e distrofie che caratterizzarono la Laguna di Venezia per tutti gli Anni '80: bibliche invasioni di chironomidi, anossie e morie di pesci, acque lattiginose sulfuree, esalazioni di idrogeno solforato, acque colorate planctoniche, massicce produzioni di macroalghe...

Nel contempo, proprio a partire dagli anni '70 l'Alto Adriatico, oltre a riproporre con maggiore o minore regolarità i fenomeni già indicati, era stato teatro di altri fatti, alcuni dei quali ugualmente vistosi, altri meno: estrema rarefazione dello stock di sgombri, comparsa massiccia di ricci di mare nel Golfo di Trieste, comparsa infestante delle meduse urticanti, comparsa di specie di indole subtropicale come *Sardinella aurita*, *Balistes carolinensis*, *Ranzania laevis*, *Creseis acicula*, non ultima la ricomparsa del fenomeno del mare sporco a partire dal 1988.

Poiché in certe zone alcuni dei fenomeni nominati come acque colorate, anossie e morie di organismi, esalazioni di idrogeno solforato, proliferazione di macroalghe, ecc... possono rappresentare espressioni di inquinamento o di eutrofizzazione culturale, la gran parte degli eventi abnormi registrati nell'Alto Adriatico e nella Laguna di Venezia a partire dall'inizio del 1970 sono stati considerati tali; non solo, ma anche per fenomeni che con l'inquinamento c'entrano poco o niente, si è cercata una collocazione in tale quadro. In tal modo, nonostante oggi (ma soltanto da poco) la maggior parte degli studiosi di questioni adriatiche sia arrivata a conclusioni omogenee riguardo questi fatti, l'opinione pubblica, molte associazioni ambientaliste e alcuni ambienti politici sono ancora convinti che:

- a) Tutto l'Adriatico o almeno l'Alto Adriatico sarebbe eutrofizzato o sottoposto a rischio di eutrofizzazione;
- b) Il responsabile di tale situazione sarebbe il Po e quindi per liberare l'Adriatico da questi fenomeni bisognerebbe ridurre il carico di nutrienti convogliati dal Po o da altre fonti terrigene.
- c) Questo recupero richiederà diverse decine di anni.

Riguardo alla prima asserzione si è già detto che, come COUSTEAU, anche molti altri sono ancora convinti che addirittura l'intero Mediterraneo corre il rischio di eutrofizzazione. I pochi dati presentati riguardo l'idrologia e il trofismo di questo mare dovrebbero invece convincere che il salasso di acque profonde che esso subisce lo conserverà oligotrofico o addirittura ultraoligotrofico: il fatto si può sintetizzare con lo slogan "l'azzurro in mare è il colore del deserto".

Per ciò che concerne l'Adriatico c'è da ricordare poi che in esso devono essere distinte almeno tre zone significativamente differenti per i processi idrodinamici e per i fenomeni biogeochimici che ne derivano: le acque dei bacini centrale e meridionale, il bacino settentrionale e le acque della fascia costiera. Queste ultime presentano a loro volta caratteristiche peculiari a seconda del settore considerato. Fatta questa precisazione è ovvio che un fenomeno di acque colorate che interessa la fascia costiera dell'Emilia Romagna non autorizza a dire che l'Alto Adriatico o, a maggior ragione, che l'Adriatico è eutrofizzato. Si tratta in effetti di un fenomeno locale e temporaneo che in qualche caso potrebbe far pensare all'influenza di acque del Po, ma ciò eventualmente al massimo fino a Ravenna; più a Sud eventuali sostegni trofici della fioritura dovrebbero essere cercati in apporti e circostanze locali, a cui il Po è generalmente estraneo.

Analogamente un'anossia interessante il Golfo di Venezia, come quella del 1977 o quella del 1989, pur vaste, non autorizzano a dire che l'Alto Adriatico è eutrofizzato né che la causa è da ricercarsi nel contributo trofico del Po. In entrambi i casi citati infatti, caratterizzati peraltro da apporti padani di entità molto differente, i fattori forzanti del fenomeno devono esser ricercati per gran parte nel ritardo delle condizioni meteomarine che inducono la rottura della stratificazione e il rimescolamento della colonna, cioè in un ritardo nello stabilirsi di condizioni tipicamente invernali sul bacino. Ecco quindi che questi fenomeni, oltre che essere piuttosto localizzati sono anche caratterizzati da breve scala temporale, fatti che devono escludere generalizzazioni del tipo l'Adriatico è eutrofizzato, l'Adriatico è inquinato.

In effetti se l'Alto Adriatico fosse veramente eutrofizzato o inquinato a causa degli apporti del Po, a partire dalla sua foce dovrebbe essere verificabile tutta quella serie di gradienti che caratterizzano le acque e i fondali delle zone di immissione di una fonte inquinante.

Si consideri ad esempio ciò che accade nella Baia di Muggia, presso Trieste, allo sbocco del collettore fognario della città che serve circa 250.000 abitanti e fino a poco tempo fa scaricava in costa senza trattamento o con solo trattamento primario. La trasparenza al Disco di Secchi aumenta ed aumenta l'ossigeno a livello del fondo e il potenziale di ossido riduzione dei sedimenti, man mano che ci si allontana dalla fonte di emissione. L'elevata concentrazione di ortofosfati (PO_4) e quella bassa di ossigeno danno le dimensioni dei fenomeni di ossidazione della sostanza organica portata dallo scarico. I fondali più vicini allo scarico sono spesso privi di organismi di macrofauna e i popolamenti bentonici sono strutturati in modo che il numero di specie aumenta man mano che ci si allontana dallo scarico stesso.

Questo esempio induce due considerazioni di carattere generale:

1- L'influenza dello scarico si attenua man mano che ci si allontana da esso e già a 2000 metri da esso i suoi effetti sulle acque e sui fondali non sono più rilevabili;

2- Spesso, in corrispondenza al periodo di più marcata stratificazione estiva, i valori minimi di ossigeno al fondo si riscontrano nelle stazioni più profonde e più lontane dallo scarico e ai margini della sua portata oppure in stazioni profonde poste fuori dalla Baia di Muggia e sicuramente non influenzate dallo scarico stesso.

Ciò indica che il confinamento di stazioni profonde dovuto a stratificazione e a condizioni di calma idrodinamica può indurre un deficit di ossigeno più acuto di quanto non avvenga in stazioni più superficiali a trofismo appesantito da carichi esogeni in sufficienti condizioni di ricambio. Viene messa cioè in evidenza l'importanza dei forzanti fisici nei fenomeni distrofici.

In effetti, a partire dalla foce del Po, i principali fenomeni idrologici e trofici presentano gradienti molto accentuati, ma la loro influenza sui popolamenti bentonici alla foce è estremamente limitata e percettibile soprattutto in termini di adattamento a condizioni di aumentata sedimentazione. L'azione esplicita più al largo, al centro del bacino, viene fortemente mediata dalle condizioni di stratificazione delle masse d'acqua in soggiorno e dal loro dinamismo, e fatti distrofici possono verificarsi anche in condizioni di apporti padani sensibilmente inferiori alla media. Ad una situazione di questo tipo si deve collegare ad esempio l'anossia del 1989, verificatasi nella zona centro orientale dell'Alto Adriatico con epicentro a circa 10 Km dalla costa dell'Istria con acque a caratteristiche prevalentemente oligotrofiche.

Ma allora, se l'Adriatico non è né inquinato né eutrofizzato, se il risanamento del Po, quantunque auspicabile per se stesso, non risolverà i problemi della fascia costiera della Emilia Romagna né le distrofie di alcune zone centrali del bacino, a quali cause deve essere attribuita la lunga serie di fenomeni abnormi di cui l'Alto Adriatico è stato teatro in questi ultimi vent'anni?

Si è già detto che l'oceanografia del Mediterraneo è governata dal clima; ovviamente lo è anche quella dell'Adriatico.

Può essere una serie di mutamenti climatici la causa dei fenomeni osservati? Per rispondere a questa domanda devono essere verificate due circostanze:

1 – in che modo i vari fattori climatici possono influenzare ciascun fenomeno preso in esame?

2 – i mutamenti climatici invocati si sono effettivamente verificati?

-
- Verranno presi in considerazione i seguenti argomenti:
- La rarefazione dello stock adriatico di sgombri a partire dal 1970;
 - L'invasione dei ricci di mare, di meduse urticanti e di altri organismi di indole temperata-calda o subtropicale negli Anni '70;
 - Le anossie dei fondali del Golfo di Trieste e dell'Alto Adriatico a partire dal 1973;
 - La comparsa e la generalizzazione a tutto l'Alto Adriatico dei fenomeni di acque colorate a partire dal 1975;
 - Le fasi acute dei fenomeni di proliferazione di Chironomidi, le acque colorate, le anossie e l'invasione delle macroalghe nella Laguna di Venezia nel corso degli anni '80;
 - Il fenomeno del "mare sporco".

Gli sgombri

Fino alla fine degli anni '60 gli sgombri facevano al loro comparsa nel Golfo di Trieste nei mesi di aprile-maggio e vi venivano pescati fino alla fine dell'estate in quantità medie di 1000-1500 quintali l'anno. Dopo il 1970 la produzione di questa specie raggiunge appena qualche decina di quintali riducendosi così di almeno due ordini di grandezza. Il fenomeno è stato attribuito a inquinamenti attorno a Pelagosa, la zona che viene indicata quale unico luogo di riproduzione dello sgombro adriatico, a malattie epidemiche, a competizioni con il congenero *Scomber colias* (Lanzardo)...

Nessuna di queste spiegazioni è però sufficiente a dar ragione di un così grande e improvviso calo della produzione. Per tentare altre spiegazioni del fenomeno è utile richiamare alcuni concetti di biologia delle popolazioni ittiche. Ciascuno stock di pesci con uova e larve pelagiche (la stragrande maggioranza) vive all'interno di un circuito di correnti in cui avviene la riproduzione, lo sviluppo larvale e giovanile e il reclutamento delle nuove leve allo stock di adulti. Siccome in questo circuito esiste una fase di trasporto passivo corrispondente agli stadi planctonici di uova e larve, è ovvio che lo stock mantiene le sue caratteristiche solo se ciascuna fase del ciclo si svolge nel luogo adatto e nel momento adatto. Se dei mutamenti climatici (nel caso specifico: diminuzione degli apporti del Po o spostamento delle fasi di massima e minima in seguito a modificazione del regime di precipitazione; aumento delle advezioni di acque meridionali e aumento dei tempi di soggiorno delle acque nel bacino in seguito a regimi di pressioni livellate su tutto il Mediterraneo e l'Adriatico...) influenzano la velocità o la direzione delle correnti che formano il circuito ecco che la deriva larvale può concludersi in un luogo non adatto a fungere

da nursery, oppure nel luogo giusto ma in un momento inadatto, ad esempio quando la produzione delle possibili prede si è già conclusa. Fallisce così il reclutamento delle nuove leve. Dopo alcuni di questi fallimenti lo stock può addirittura scomparire.

I ricci di mare

Per tutti gli anni 1960 i ricci del Golfo di Trieste potevano esser contati singolarmente. Erano però abbondanti in altri tempi tanto da esser venduti al mercato. Quando comparvero in massa nel 1971 si disse che costituivano un segnale del complessivo miglioramento delle acque del Golfo sulla base della constatazione che sulle coste istriane, dove le acque sono più trasparenti e quindi più pulite, i ricci sono sempre stati abbondanti. Sillogismo errato a causa di una premessa errata e cioè che i ricci esigono acque pulite. E' noto invece che il riccio di mare può prosperare anche nelle acque calme e moderatamente inquinate dei porti e delle rade. E' possibile invece un'altra spiegazione. Il riccio di mare è una specie atlantomediterranea distribuita verso Nord fino all'imboccatura della Manica e lungo il canale d'Irlanda fino alle coste atlantiche occidentali della Scozia. Manca invece sulle coste settentrionali della Scozia, nel Mare del Nord e sulle coste della Norvegia. Questa distribuzione corrisponde all'andamento dell'isoterma invernale dei 7°-8° C. E' possibile quindi che la ricomparsa del riccio nel Golfo di Trieste e l'esplosione delle sue popolazioni lungo le coste dell'Istria sia dovuta ad un incremento della temperatura invernale delle acque dell'Alto Adriatico. Questo stesso incremento può aver spostato verso Nord gli areali di distribuzione di altre specie "meridionali" consentendo loro non soltanto un soggiorno occasionale, ma anche la maturazione dei prodotti sessuali e la riproduzione, fatto sicuramente avvenuto per *Pelagia noctiluca*, la medusa urticante comparsa alla fine degli Anni '70 e *Creseis acicula*, il piccolo mollusco planctonico, la cui conchiglia aghiforme, insinuandosi fra il costume da bagno e il corpo, dà talvolta piccoli fastidi ai bagnanti.

Le anossie dei fondali del Golfo di Trieste e dell'Alto Adriatico.

Già dal 1966, in base a dati macroscopici quali il nuoto in superficie dei pesci strettamente bentonici come *Diplodus annularis* (Sparo) e *Gobius niger* (Guato) e il colore nero nonché l'odore di idrogeno solforato emanato dai sedimenti di alcune zone del Golfo di Trieste, pure in mancanza di dati di misura, era stata espressa l'ipotesi che particolari zone del Golfo potessero essere soggette a fenomeni di anossia. Le morie di organismi bentonici, osservate da

diversi ricercatori nel 1973 e 1974 avvalorarono questa ipotesi. Nel 1979, '80, '81 furono rilevate strumentalmente le prime anossie nella Baia di Muggia e le prime ipossie spinte nel Golfo di Trieste. Tra il 12 e il 26 settembre 1983, un ricercatore austriaco riesce a documentare fotograficamente gli effetti di un'anossia sui popolamenti bentonici del Golfo di Trieste e dal 1986, in base ad un programma di ricerca *ad hoc*, i ricercatori del Dipartimento di Biologia e del Laboratorio di Biologia Marina di Trieste verificano che ogni anno, tra agosto ed ottobre, le parti più profonde del Golfo di Trieste (ca. 25 m) soggiacciono a condizioni di ipossia o di anossia. Anche da alcuni tra gli addetti ai lavori questi fenomeni sono stati talvolta attribuiti ad eutrofizzazione o ad inquinamento generalizzato invocando eventualmente l'azione di fonti di apporto non attive da tempo oppure fonti poste sottocorrente rispetto alle zone teatro dei fatti. In effetti, sulla base dei dati finora disponibili, gli episodi di ipossia o anossia del Golfo di Trieste non sembrano tanto legati a particolari apporti trofici, quanto piuttosto all'azione combinata di fattori morfologici e idrologici. In particolare sembra giocare un ruolo preponderante un fatto messo in adeguata evidenza a questi effetti soltanto nel 1993. La porzione del Golfo di Trieste sotto i 23 metri di profondità, quella caratterizzata dalle più basse concentrazioni di ossigeno, si comporta infatti come un bacino a soglia. Per questa ragione quando il picnoclino scende sotto i 23 metri circa, la soglia posta in corrispondenza alla congiungente P.ta Salvore-Grado, impedisce ricambi da advezione laterale e il picnoclino rende minime le possibilità di ricambio verticale. In particolari condizioni di trasparenza (circa 9 metri o meno di Disco Secchi) è possibile inoltre che il livello di compensazione si porti al di sopra del picnoclino e gli strati di fondo rimangano privi dell'apporto di ossigeno fotosintetico.

Notevole importanza sembra poi risiedere nell'epoca di formazione del picnoclino. Un picnoclino precocemente stabilito isola infatti per un più lungo periodo gli strati di fondo.

Nelle anossie della zona centrale dell'Alto Adriatico, tra l'Istria e la costa italiana, le caratteristiche morfologiche del bacino hanno un'importanza minore. In ogni caso le minori concentrazioni di ossigeno vengono in genere misurate nelle porzioni più profonde e più confinate (ad es. la "Fossa"). Si è già visto che i due più importanti episodi riscontrati negli ultimi venticinque anni, quello del 1977 e quello del 1989, corrispondono a due condizioni diametralmente opposte quanto al comportamento del Po e quindi alle condizioni trofiche del bacino. Nei primi nove mesi del 1977 il Po scaricò infatti 62 Km cubi di acqua contro una media di 37 per i sei anni precedenti, fatto che indus-

se una elevatissima produzione fitoplanctonica. Lo strato superficiale, torbido per materiali di provenienza continentale e di origine biologica, impediva la produzione di ossigeno fotosintetico sotto il picnoclino. Nel 1989 invece gli apporti del Po furono nella media o sotto la media, ma anche in questo caso si verificò un'anossia con massicce morie di organismi bentonici a partire da metà novembre.

Il lineamento unificante di ambedue i casi, per altri versi così differenti, consiste nelle condizioni meteorologiche tardo estive, caratterizzate da tempi calmi e caldi e pressioni livellate e quindi nel ritardato avvio durante l'autunno del meccanismo invernale di riattivazione della circolazione: raffreddamento degli strati superficiali tanto per semplice inversione del ciclo termico quanto per le perdite di calore dovute ad evaporazione per ventilazione a causa della bora. La bora stessa può determinare anche correnti superficiali e profonde e quindi facilitare il ricambio.

I fenomeni di acqua colorata

Il fenomeno delle acque colorate è noto fin dai tempi biblici. Darwin ne riporta alcuni esempi nel suo "Viaggio di un naturalista intorno al mondo". Altri autori ne hanno trattato abbondantemente in modi diversi. Non è pertanto il fenomeno in sé che deve essere considerato, quanto il fatto che dal 1968 al 1988 esso si sia verificato nell'Adriatico, ma sembra anche in altre parti del mondo, con una frequenza molto maggiore. Quali condizioni possono essersi modificate nel periodo considerato per indurre questo aumento di frequenza? Con riferimento a modelli continentali o addirittura agricoli si è spesso pensato che un arricchimento dell'ambiente marino in nutrienti, soprattutto fosfati, potesse di per sé determinare una produzione elevata. Il fatto che l'evoluzione dell'agricoltura, della zootecnia e dell'estensione dell'uso dei detersivi, contenenti polifosfati, determinassero un contributo via via più cospicuo di fertilizzanti nell'ambiente marino ha fatto quindi ritenere che fosse questo incremento la variabile impazzita, responsabile del ripetersi dei fenomeni di acqua colorata in Alto Adriatico e che una riduzione di questo input potesse servire a controllarli. Lunghi dal negare il ruolo essenziale dei nutrienti in questi fenomeni, è tuttavia importante ricordare che i fenomeni di acqua colorata si verificano soltanto con tempo sereno, mare calmo e calma di vento, condizioni queste ultime più facilmente realizzabili in insenature, baie, anse costiere, porti e in genere in tutte le situazioni di ridosso o di ambiente confinato. E' proprio in questi luoghi, in cui è in genere più lento il ricambio delle acque, e minore la turbolenza dovuta alle onde, che i fenomeni considerati

vengono osservati più spesso. Un efficace ricambio delle acque tende infatti a isolare e disperdere le zone d'insacco della fioritura creando inoltre turbolenza ai contorni.

La turbolenza verticale, cioè il rimescolamento dovuto alle onde, ha un'azione inibente di altro tipo. Se viene indicata con **P** la produzione fotosintetica complessiva di una popolazione algale e con **R** la sua respirazione, la moltiplicazione delle cellule che formano la popolazione sarà possibile solo finché **P** sarà maggiore di **R**, cioè la produzione fotosintetica sarà maggiore dei consumi respiratori e sarà così possibile una produzione netta. Ciò avverrà soltanto se le cellule algali si manterranno al di sopra di una certa profondità critica, **D_c**, a cui arriva energia luminosa tale per cui **P** possa essere maggiore di **R** nell'arco delle 24 ore (Sverdrup, 1953). E' evidente che **D_c** sarà tanto maggiore quanto maggiore sarà l'altezza del sole sull'orizzonte e la trasparenza dell'acqua. Se però c'è una turbolenza dello strato superficiale tale che la popolazione algale sia mantenuta, omogeneamente distribuita, in uno strato di mescolamento, **D_m**, di spessore opportunamente maggiore a **D_c**, accadrà che i consumi respiratori sostenuti dalla popolazione durante il periodo trascorso a profondità maggiore di **D_c**, non siano compensati dalla produzione totalizzata durante il periodo trascorso a profondità minore di **D_c**. E' evidente che ciò è tanto più facilmente realizzabile quanto maggiore è **D_m** e quanto minore è il rapporto **D_c/D_m**, cioè quanto più forte è l'azione delle onde e del vento che le genera. Ne consegue che, anche in condizioni di ricchezza in nutrienti, un efficace ricambio e una sufficiente turbolenza possono rappresentare fattori limitanti per la produzione fitoplanctonica. Talvolta nei bacini-riserva di acque potabili viene indotta una circolazione forzata proprio per impedire o contenere la produzione di fitoplancton. Si basa in parte su questo principio la proposta di risolvere il problema dello smaltimento delle acque urbane convogliandole al largo, cioè in zone di maggior ricambio, dopo un adeguato trattamento primario. Nelle zone costiere, a profondità ridotta, dove **D_m** corrisponde alla profondità locale, la turbolenza determina torbidità dell'acqua e quindi una diminuzione di **D_c**. Sulle coste basse quindi, questo tipo di inibizione può intervenire anche con una turbolenza piuttosto ridotta. In genere però le zone costiere sono più riparate, quindi meno battute dalle onde, ma in esse la turbolenza può essere indotta anche dalle maree. Nelle zone costiere perciò il rapporto tra **D_c/D_m** si complica, ma rimane complessivamente valido il principio secondo cui il ricambio e la turbolenza limitano la produzione.

In definitiva perciò l'aumento della frequenza dei fenomeni di acqua colorata, verificato in Alto Adriatico negli anni 1970-1990, potrebbe essere dovuto

non ad un aumento dell'apporto di nutrienti in generale e di fosfati in particolare, ma ad una diminuzione del ricambio e della turbolenza al cui ruolo, quali fattori inibenti la produzione, si è già accennato. In altre parole, tale aumento di frequenza potrebbe esser dovuto ad una modificazione del clima capace di agire in tal senso.

Le distrofie della Laguna di Venezia

Nel corso degli Anni '80 la Laguna di Venezia è stata teatro di tutta una serie di fenomeni distrofici: sfarfallamenti massicci di chironomidi, iperproduzione di macroalghe, acque colorate, crisi anossiche e morie di pesci ed altri organismi bentonici, esalazioni di idrogeno solforato,...

Fino a metà degli Anni '80, gran parte degli addetti ai lavori e tutta l'opinione pubblica propendevano per attribuire questa situazione ad un complesso di azioni antropiche capaci di determinare inquinamento o eutrofizzazione cioè ad immissioni di sostanze o energia capaci di determinare modificazioni indesiderate dell'ambiente tali da limitare o impedirne l'uso a cui era destinato.

C'è da dire tuttavia che i fatti distrofici ricordati costituiscono in maggiore o minore misura connotati specifici di ambienti a ricambio attenuato come le lagune.

Si pensi ad esempio che oltre il 95 % dello zolfo presente sulla crosta terrestre si è formato in questi ambienti attraverso reazioni di solfato riduzione e successiva ossidazione a zolfo molecolare dell'idrogeno solforato così sviluppatosi.

Per ciò che concerne la proliferazione delle macroalghe, già nel 1662 le navi della Serenissima rimasero bloccate fuori Malamocco perché le alghe ne impedivano l'ingresso in laguna, essendo il mare cosparso di relitti "come foglie di lattuga". Alcuni Autori che si sono occupati del problema negli Anni '40 e all'inizio degli Anni '80 riferiscono di produzioni unitarie simili a quelle riscontrate nel 1986-'87 e '88, considerate abnormi. Da molti anni i botanici marini sanno peraltro che ambienti ad idrodinamismo attenuato e scarso ricambio vengono colonizzati da specie come *Ulva* ed altre dette "galenofile" (amanti di ambienti tranquilli).

E' perciò opportuno chiedersi se le distrofie osservate in questi ultimi anni non siano state prima di tutto l'effetto di fattori naturali capaci di determinare un aumento del confinamento dell'ambiente lagunare, piuttosto che di un aumento degli input terrigeni di nutrienti o inquinanti. Il confinamento è il tempo intercorrente tra due ricambi successivi su un medesimo punto della laguna e può essere considerato il reciproco del ricambio (Guelorget et Perthuisot, 1983).

Ci si deve chiedere perciò quali fatti possono aver attenuato il ricambio della Laguna in questi ultimi anni. Il ricambio di una laguna dipende in primo luogo dalle maree e poi dall'azione dei venti, dalle oscillazioni bariche locali, dall'evaporazione e dagli apporti di acque dolci. Tutte queste azioni vengono poi mediate dalla morfologia lagunare. Non si può pensare che le maree siano diventate meno ampie. Si dovrebbe quindi pensare che il loro effetto si sia mantenuto costante nel tempo. C'è da rilevare tuttavia che l'escavazione del canale dei petroli ha determinato lo spostamento dello spartiacque verso Venezia, determinando una caduta del ricambio sulla velma compresa tra il Canale di S. Spirito e il Canale delle Scoasse, zona in cui la produzione algale degli anni di emergenza pare sia stata tra le più cospicue ed ha determinato effetti indesiderati conseguenti alla sua degradazione. E' questo un esempio di come un intervento sulla morfologia lagunare possa avere conseguenze sul ricambio garantito dalle maree. Riguardo la morfologia lagunare c'è però da tenere presente un altro fatto e cioè l'aumento pressoché generalizzato della profondità dei bacini, dovuto all'aumento del livello del mare, alla subsidenza e all'erosione. L'incremento del tirante d'acqua, rimanendo costanti i dislivelli di marea, ha comportato una minor diluizione dei volumi in soggiorno, quindi una generalizzata diminuzione del ricambio e perciò l'allargamento degli areali favorevoli all'impianto di macroalghe galenofile. Queste, a loro volta, con le loro grandi fronde si oppongono al dinamismo delle acque diventando elementi morfologici di confinamento e innescando così un meccanismo di retroazione positiva, capace, fino ad un certo punto, di favorire ulteriormente l'iperproduzione.

Come si è detto, anche il vento, la pressione e le precipitazioni agiscono sul confinamento e favoriscono il ristagno dell'ambiente lagunare. La mancanza di ossigeno, legata al ristagno, si accompagna ad un abbassamento del pH e quindi aumentano le possibilità di rilascio di nutrienti da parte dei sedimenti. Oltre a ciò, la concomitante instaurazione di una attività solfato riduttrice, messa più volte in evidenza in quegli anni dalle esalazioni di idrogeno solforato e dalla produzione di acque bianche solforose, è accompagnata da azotofissazione ad opera di uno dei più comuni batteri solforiduttori, *Desulforibri desulfuricans*. D'altra parte, una grande biomassa algale immobilizza in tempi lunghi le pur basse concentrazioni di nutrienti in flusso, restituendoli poi con episodi impulsivi alla fine del periodo vegetativo o comunque all'avvio della degradazione della sostanza organica così prodotta. Ecco quindi che, anche a prescindere da apporti esterni di nutrienti, un'attenuazione del ricambio può essere di per sé fattore di eutrofizzazione, tanto facilitando la liberazione di

vecchie riserve trofiche contenute nelle biomasse e nei fanghi delle velme e dei canali, quanto attraverso i guadagni netti in sali d'azoto causati dall'attività batterica anaerobia. E' perciò possibile che i rilasci e i guadagni netti di nutrienti su vastissime superfici, conseguenti ad un aumento del confinamento siano più importanti degli input esogeni nel determinare la iperproduzione algale e le altre distrofie osservate fino all'inizio degli anni '90.

Fatte quindi salve eventuali influenze antropiche localizzate, gli equilibri dell'ecosistema lagunare appaiono ancora oggi prevalentemente correlati alle vicissitudini meteorologiche stagionali e al loro andamento nel tempo e cioè al clima. E' necessario però verificare questo modello, relativamente nuovo, sulla base di serie storiche di misure, adeguate ai tempi di evoluzione dei fenomeni, in cui utilizzare tanto vecchi dati quanto nuovi dati ambientali raccolti negli stessi luoghi e negli stessi modi.

Il "mare sporco"

Anche quello del "mare sporco" non è un fenomeno nuovo per l'Adriatico. Esso consiste nella massiccia comparsa di materiali mucilluginosi sotto forma di fiocchi, filamenti, nastri e nubi, prodotti essenzialmente da Diatomee; tali materiali, dopo una fase in sospensione o in galleggiamento superficiale, calano al fondo dove vengono degradati.

Dopo un primo episodio osservato nel 1729, il fenomeno si è ripetuto una quindicina di volte fino al 1991, con frequenza maggiore tra il 1872 ed il 1932, rispetto al periodo di pari ampiezza 1932-1992.

Tale fatto, la circostanza che spesso gli episodi registrati avessero innesco o riguardassero esclusivamente le acque oligotrofiche del Quarnero, nonché il verificarsi del fenomeno anche nel Mar Tirreno, ad acque ugualmente oligotrofiche e nelle quali la disponibilità di nutrienti è controllata esclusivamente da forzanti naturali, mettono in evidenza che i nutrienti ed in particolare quelli di origine antropica non possono ragionevolmente esser considerati la causa primaria del fenomeno. Tanto le osservazioni di campagna, quanto gli esperimenti di laboratorio mettono invece in evidenza come il "mare sporco" debba essere considerato soprattutto una risposta degli organismi implicati a stress legati alla variabilità ambientale tipica dell'Alto Adriatico e particolarmente accentuata alla fine degli Anni '80 e all'inizio degli Anni '90.

L' Alto Adriatico e il clima

L'elevata latitudine, la scarsa profondità e l'influenza di cospicue masse continentali fanno sì che le acque dell' Alto Adriatico siano caratterizzate da

un ciclo termico la cui ampiezza può eccedere i 20° C. Oltre a ciò, maree di oltre un metro di ampiezza e un considerevole apporto di acque continentali rendono la biologia di questo bacino estremamente particolare nell'ambito del Mediterraneo. In quanto precede si è visto in che modo singoli elementi del clima come la temperatura, particolari eccessi ambientali in rapporto con il clima o particolari andamenti climatici possono essere collegati ad alcuni fenomeni abnormi che hanno interessato l'Alto Adriatico in questi ultimi vent'anni. Perché è stata suggerita la via della spiegazione climatica?

C'è da dire intanto che quando dei fenomeni biologici si presentano in serie o a grappoli interessando simultaneamente differenti luoghi dello stesso bacino o differenti componenti dello stesso ecosistema, le cause di tali fenomeni devono essere piuttosto generali, in altre parole esse devono essere capaci di agire a livello di bacino. Ci deve essere una congruità di scala tra causa ed effetto. Tra questi fattori i più generali sono i fattori meteorologici e la loro evoluzione nel tempo, cioè il clima. C'è da stare attenti però che, mentre è abbastanza facile dimostrare come particolari fattori meteorologici possono favorire, ad esempio, condizioni di stagnazione e quindi anossie e mortalità di organismi, è molto difficile correlare in modo convincente cambiamenti climatici e presenza, assenza o abbondanza di specie animali o vegetali senza che sia possibile dimostrare indipendentemente che il clima influenza direttamente l'accrescimento, la mortalità, la fecondità o le abitudini di queste stesse specie. E' tuttavia possibile un approccio di tipo statistico. Si supponga, ad esempio, che un certo numero di specie sia stato soggetto a cambiamenti simili nella distribuzione e che questi cambiamenti tanto in direzione che in ampiezza siano in accordo con un certo cambiamento climatico (ad esempio un miglioramento). Se ciò accade, anche in assenza di una prova dettagliata dell'esistenza di un rapporto di causa ed effetto sulla biologia delle singole specie, sembra ragionevole dedurre che è stato il clima a determinare questi cambiamenti perché nessun altro fattore avrebbe potuto determinarli simultaneamente. Ebbene, come si è visto, la totalità dei più discussi fenomeni biologici osservati in Alto Adriatico in questi ultimi vent'anni è riconducibile a cause climatiche e in particolare ad un incremento delle temperature medie invernali del mare e ad altri elementi climatici capaci di attenuare il ricambio e la turbolenza e favorire il ristagno delle acque.

In effetti, la temperatura media invernale del Golfo di Trieste è aumentata di circa un grado a partire dal 1951. A partire dal 1970 i giorni con temperatura del mare inferiore a 6,5° son passati da una media di 35 a meno di 10.

La velocità media annuale di scorrimento della Bora ha registrato una

diminuzione del 35 % tra il 1951 e il 1975 e, dopo il 1965, c'è stata una consistente riduzione della frequenza dei venti dal primo quadrante, con un incremento dei venti da Sud. Questa situazione è stata favorevole ad un aumento della advezione superficiale verso Nord e ad una più lunga permanenza delle acque nel nordadriatico.

Accanto all'influenza diretta della Bora sulla turbolenza e sul ricambio nonché sul raffreddamento delle acque superficiali e perciò della produzione di acque fredde, capaci di ricambiare le acque profonde, questo parametro può anche essere considerato un segnale delle mutate relazioni tra le masse atmosferiche che concorrono a determinare il tempo su scala più ampia.

Durante gli anni '80 si sono inoltre ridotti gli apporti di acque dolci, che per l'Alto Adriatico sono il principale fattore di circolazione.

Dal 1980-'84 al 1985-'89 la radiazione globale è aumentata da 107.500 cal/cm² per anno a 109.500 cal/cm² per anno.

Già senza ulteriori approfondimenti, questi dati rendono più che plausibile l'ipotesi che i fenomeni discussi siano, almeno in parte, risposte biologiche al cambiamento climatico centrato sugli anni '80, a detta di tutti i più caldi, i più secchi e, per le nostre regioni, i meno ventosi del secolo.

