

Un tast de canvi global
(Cèlia Marrasé i Josep Enric Llebot, ed.)

Treballs de la SCB. Vol. 54 (2003) 51-64

INTERACCIONS ENTRE LA TURBULÈNCIA DE PETITA ESCALA I ELS ORGANISMES I PROCESSOS PLANCTÒNICS EN EL MARC DE CANVIS GLOBAIS

FRANCESC PETERS

Institut de Ciències del Mar (CMIMA-CSIC).

Adreça per a la correspondència: Francesc Peters. Institut de Ciències del Mar (CMIMA-CSIC). Passeig Marítim de la Barceloneta, 37-49. 08003 Barcelona. Adreça electrònica: cesc@icm.csic.es.

RESUM

La turbulència de petita escala és ubiqüa a l'oceà i afecta de maneres diverses les relacions dels organismes planctònics amb el medi i entre si, amb resultats finals visibles al sistema. Globalment, es preveu la continuació d'una sèrie de tendències, tant des del punt de vista climàtic com en altres aspectes, que poden fer variar la freqüència dels esdeveniments amb pics de turbulència o la intensitat mitjana d'aquesta turbulència. En aquest treball es fan unes breus pinzellades sobre com aquests canvis poden afectar l'estructura i dinàmica del plàncton i la funció del sistema planctònic.

SUMMARY

Small-scale turbulence is ubiquitous in the ocean. It affects interactions of planktonic organisms with the surrounding medium and among each other in a number of ways, with results visible at the system level. A series of trends, both climatic and otherwise, are foreseen to continue at a global scale, which may vary the frequency of events with turbulence peaks and/or the average intensity of turbulence. In this paper I give a few glimpses on how these changes may affect the structure and dynamics of plankton and the functioning of the planktonic system.

INTRODUCCIÓ

En aquest article es fan una sèrie de reflexions sobre com diferents aspectes rela-

cionats amb el canvi global poden afectar les interaccions entre la turbulència de petita escala al mar i els organismes i processos planctònics. S'ha de tenir en compte que

l'estudi dels efectes de la turbulència sobre el plàncton és un camp relativament nou que només en els últims cinc-deu anys ha rebut una certa atenció de la comunitat científica. Així, els coneixements que es tenen no es poden considerar fermes i són encara susceptibles de canvi en funció de noves dades o interpretacions. Si a això s'afegeixen els interrogants que la comunitat científica té sobre els processos, magnituds i fins i tot signes de diferents aspectes de canvi global, s'entendrà que les interpretacions i els escenaris desenvolupats en aquest treball porten associats un alt grau d'incertesa i en cap cas no pretenen ser una revisió de l'estat del coneixement, sinó més aviat un exercici intel·lectual de reflexió sobre les relacions d'una sèrie de fenòmens i processos. Part de la incertesa prové del poc coneixement que encara es té de la turbulència, sobretot a les escales més petites, anomenades *escales de la dissipació*. Però de la mateixa manera que la societat no pot esperar a tenir un coneixement científic exacte del canvi global per a començar a prendre mesures de correcció antropogènica (com es destil·la de *Climate change 2001: Synthesis report*), els científics no podem esperar a tenir un coneixement complet de la turbulència des del punt de vista físic per a començar a estudiar-ne els efectes sobre el plàncton. Dins d'aquest marc ara podem procedir a discutir el tema que ens ocupa de la manera més objectiva possible.

LA TURBULÈNCIA

La turbulència de petita escala és ubiqüa a l'oceà. Es genera sobretot a partir d'entrades d'energia provinents del fregament del vent sobre la superfície del mar i a partir del trencament de les ones. També les ones internes, les marees, la morfologia del fons en zones costaneres, i d'altres, són fonts addicionals d'energia que alimenten

la turbulència de petita escala. Ja es veu, doncs, que és a la capa de barreja de l'oceà i en zones costaneres on la turbulència de petita escala presenta uns valors més alts. Aquesta turbulència es caracteritza per la isotropicitat, és a dir, perquè el moviment no té una direccionalitat característica, i perquè s'acaba dissipant per la viscositat de l'aigua del mar. La turbulència de petita escala es visualitza en remolins de totes les mides entre les escales d'entrada d'energia i les escales de dissipació. El conjunt de remolins porta associat un camp de velocitats que fluctua en el temps i en totes les direccions de l'espai a l'atzar, com a mínim amb el coneixement i la tecnologia actuals, de manera que només es poden caracteritzar estadísticament. Els remolins més petits tenen unes característiques de mida, velocitat i de vida mitjana donades per la intensitat de la turbulència i per la viscositat del medi, que s'anomenen *escales de Kolmogorov*. Per a l'espai, l'escala de Kolmogorov (λ_K) es calcula com a $\lambda_K = \sqrt[4]{\nu^3/\epsilon}$, on ν és la viscositat del medi i ϵ és la taxa de dissipació d'energia turbulenta cinètica, una mesura de la intensitat de turbulència. Al mar trobem una mitjana global de 10^{-3} a 10^{-4} $\text{cm}^2 \text{s}^{-3}$. A la capa de barreja, sobretot a la zona propera a la superfície, en zones costaneres i quan hi ha tempestes, la turbulència arriba a valors de 10^{-1} $\text{cm}^2 \text{s}^{-3}$ i més alts (vegeu la figura 1), mentre que a les capes fondes de l'oceà es calcula que es presenten uns valors de 10^{-5} a 10^{-6} $\text{cm}^2 \text{s}^{-3}$, que s'agafen com a valors de fons.

COM AFECTA LA TURBULÈNCIA ELS ORGANISMES I PROCESSOS PLANCTÒNICS?

Per raons òbvies només donaré una pinzellada general d'aquests efectes, que presenten en la bibliografia especialitzada un rang d'individualitats i particularitats molt

més gran. Pel que fa als organismes i processos planctònics, bàsicament el que fa la turbulència és accelerar les taxes de difusió de soluts i partícules. Això ve donat en gran mesura pel moviment característic dels remolins, però també passa en menor grau per efecte del cisallament a escales inferiors a la dels remolins més petits. Així, en termes generals, accelera els processos de captació de nutrients i de relacions tròfiques entre organismes planctònics, i es produeix un increment dels fluxos de matèria i energia entre els diferents components planctònics. En els organismes més complexos del plàncton, com poden ser el zooplàncton, i bàsicament penso en copèpodes i larves de peix, entren a jugar altres factors relacionats amb el comportament. S'ha vist que sovint la turbulència per sobre d'un cert valor mitjà disminueix l'eficiència de creixement d'aquests organismes. Així, l'augment de l'encontre de partícules presa es veu compensat per altres factors. S'ha hipotetitzat que el zooplàncton té mides característiques semblants als remolins més petits i que per aquesta raó es poden veure més afectats per la turbulència. El resultat de totes les interaccions per al sistema sembla dependre de la càrrega de nutrients, de manera que amb pocs nutrients el sistema es torna més heterotròfic, mentre que amb nutrients abundants el sistema es torna més autotròfic (Arin *et al.*, 2002; Peters *et al.*, 2002). Per a informació més extensa sobre els efectes de la turbulència sobre el plàncton podeu consultar, entre d'altres, Dower *et al.* (1997), Kiørboe (1993) i Peters i Marrasé (2000).

A escales més grans la turbulència pot afectar els fluxos verticals de partícules i la redistribució en la capa de barreja, l'entrada de nutrients provinents de les capes fondes de l'oceà i la resuspensió de matèria que sol portar associada nutrients en zones costaneres.

CANVI GLOBAL

Els científics han detectat una sèrie de canvis en el sistema en què ens trobem, el planeta Terra, que s'han produït en temps recents i a una escala molt curta geològicament parlant (vegeu la taula 1). Aquests canvis giren, sobretot, al voltant d'un augment de diòxid de carboni i altres gasos a l'atmosfera i d'un escalfament generalitzat del planeta. Sembla que també hi ha, i es preveu, un increment de la humitat i de les precipitacions, malgrat que no són generalitzades globalment. Tot plegat, genera un augment de la variabilitat meteorològica i la severitat d'alguns fenòmens com les tempestes. Alguns d'aquests canvis sembla que tenen clarament un component d'origen antropogènic. El que es tracta de veure és si l'amplitud d'aquests canvis es pot emmarcar dins dels canvis normals, no antropogènics, del planeta, o bé tenen un signe clar respecte d'aquests. També hi ha qüestions metodològiques de comparació entre dades d'un passat recent i dades geològiques més remotes, ja que els mètodes de detecció són diferents. Entendre l'origen dels canvis és crucial a l'hora d'oferir solucions per canviar-ne el signe, ja que si són antropogènics ho tenim a la nostra mà d'una manera gairebé trivial, científicament parlant, que no pas econòmicament o socialment. Però els canvis no són realment tan importants en si mateixos com les conseqüències d'aquests canvis sobre els diferents organismes, ecosistemes, societats i economies. En aquest treball mirarem com la turbulència de petita escala pot afectar organismes i processos planctònics en l'escenari d'una sèrie de canvis que s'observen globalment, siguin o no climàtics i siguin o no antropogènics, i algunes de les interaccions que es poden donar.

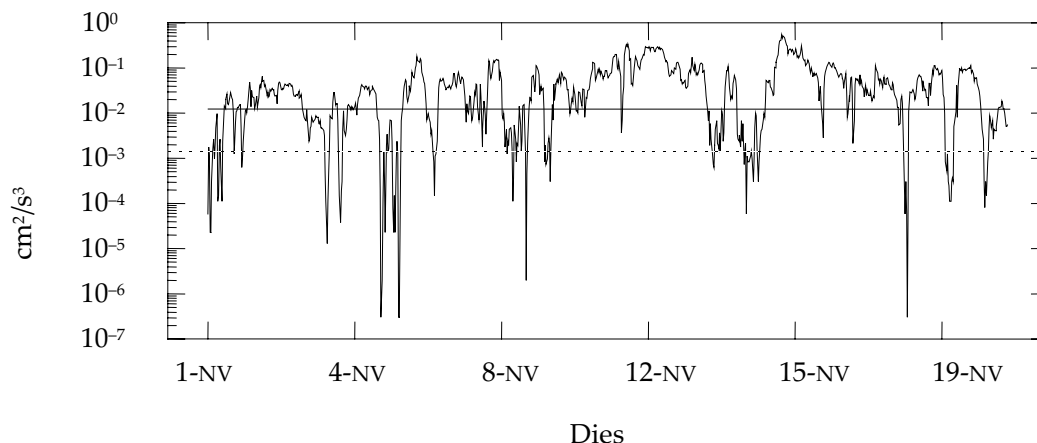


FIGURA 1. Sèrie temporal de la taxa de dissipació de l'energia turbulenta cinètica calculada a partir de dades d'intensitat de vent durant uns dies de tempesta de llevant a la costa de Barcelona el mes de novembre de l'any 2001. La línia horitzontal contínua és la mitjana logarítmica de les dades, i la discontinua, la mitjana logarítmica anual.

CANVIS DE VISCOSITAT DE L'AIGUA

L'escala de dissipació de la turbulència i , per tant, l'escala més petita on encara podem trobar remolins és afectada directament per la viscositat del medi ($\lambda_K \propto \nu^{3/4}$). La viscositat de l'aigua, al seu torn, és afectada per la temperatura i la salinitat. Mentre que la salinitat només augmenta la viscositat molt lleugerament, la temperatura la fa disminuir considerablement (vegeu la figura 2). Això fa que un augment de la temperatura de l'aigua permeti que, per a un determinat nivell de turbulència, els remolins puguin existir fins a escales més petites. Per tant, organismes que no estaven exposats a remolins, per la seva mida petita, ho poden estar a partir d'un increment determinat de temperatura. Projectar quines relacions tròfiques poden canviar en un escenari com aquest és agosarat. Hi ha mecanismes físics que actuen a escales per sota de l'escala dels remolins amb efectes semblants sobre organismes i processos planctònics, si bé amb intensitat menor i, de fet, no sabem quina és l'escala concreta de tall, que pot ser

un múltiple de λ_K entre 0,1 i 10. Però sí que podem dir que, sigui quin sigui el multiplicador, l'escala de tall serà més petita a més temperatura. Si fem servir un multiplicador d'1, podem projectar que hi haurà una quantitat més gran d'algues, com diatomees i cadenes de dinoflagel·lades, que podran estar afectades pels remolins. Si l'efecte de la turbulència d'aquests remolins és positiu, com ho serà en el cas d'augmentar el flux de nutrients per a les diatomees, hi haurà un increment de la producció o almenys una acceleració d'aquesta producció. I això amb independència dels efectes que l'augment de la temperatura pugui tenir sobre els processos metabòlics i l'activitat enzimàtica. En canvi, si es projecta un efecte negatiu, com pot ser la inhibició del creixement d'algunes dinoflagel·lades, llavors aquest efecte arriba a cèl·lules o cadenes més petites i, per tant, els esdeveniments de turbulència poden arribar a ser més eficaços a l'hora de mitigar formacions algals nocives, per exemple. Hi ha projeccions d'augment de la temperatura global de l'aire en superfície d'1,4 a 5,8 °C en cent anys, segons el model que es faci servir.

Aquest augment ja pot tenir un efecte significatiu sobre la mida dels organismes que es poden veure afectats pels remolins, si bé cal veure que aquest augment de temperatura es tradueix en un augment similar a l'aigua, com a mínim a la capa superficial dels oceans. En aquest sentit, potser els efectes més grans es poden donar regionalment o localment a les zones que normalment no estan sotmeses a grans variacions de temperatura diària i estacional, com poden ser les regions polars i les tropicals.

AUGMENT DE VOLUM D'AIGUA LÍQUIDA

Hi ha signes que el nivell del mar ha pujat d'1 a 2 mm per any. Això és degut bàsicament al que es coneix com a *expansió tèrmica* (Llebot, 1997), que es produeix en augmentar la temperatura i, en menor grau, pel desglac de masses de gel continentals, sobretot a l'hemisferi nord. Sembla que aquest augment del volum d'aigua líquida anirà acompanyat d'una disminució de la capa de barreja segons els models que preveuen els balanços tèrmics globalment. La disminució de la capa de barreja combinada amb un augment de la intensitat i freqüència dels esdeveniments de turbulència podria augmentar la quantitat de nutrients inorgànics que de la capa fonda es barregen amb la capa superficial per fer-se disponibles per al fitoplàncton. Els nutrients inorgànics que limiten la producció primària a l'oceà tenen la potencialitat d'augmentar la fixació de CO₂ en forma de matèria orgànica particulada. També, amb fenòmens turbulents més freqüents però menys predictibles, una part més gran d'aquesta matèria orgànica fixada podria sedimentar fora de la zona fòtica perquè el zooplàncton que se n'hauria d'aprofitar, en tenir una dinàmica més lenta, no el podria aconseguir de manera efectiva.

També podem considerar el cas hipotè-

tic contrari que l'augment del nivell del mar anés acompanyat d'un increment de la capa de barreja. Això es pot produir si l'augment de la turbulència fos prou gran per incrementar el transport. Podem calcular la potencialitat d'un procés de retroalimentació negativa sobre els nivells de CO₂ a l'atmosfera amb la fixació biològica del C en aquesta capa de barreja augmentada. Si assumim que *a)* l'any 2000 el sistema atmosfera-ocèà està en equilibri respecte a la concentració de CO₂, *b)* que afegim a l'atmosfera una emissió anual estable de CO₂ antropogènic de 9 PgC any⁻¹ (corresponent a l'any 2000, *Climate change 2001: Synthesis report*), *c)* un increment del nivell del mar de 0,15 cm any⁻¹ i *d)* una producció primària neta mitjana de 1,25 gC m⁻³ any⁻¹, després de cent anys l'ocèà hauria pogut fixar i exportar en forma de matèria orgànica particulada cap a la capa fonda uns 2 PgC a causa de l'hipotètic increment del nivell de la capa de barreja. Això és només un 0,22 % dels 900 PgC afegits a l'atmosfera durant aquest període, de manera que aquest procés de retroalimentació negativa resultaria del tot insignificant. A més a més, la major part d'aquest carboni seria respirat en profunditat i tornaria a les capes superficials en un termini entre mil i tres mil anys. Només una fracció molt petita seria enterrada en el sediment i desapareixeria del sistema durant temps geològics.

Així doncs, cal esperar efectes només si la capa de barreja es fa més petita i la turbulència fa entrar més nutrients de les capes fondes a la zona fòtica.

TURBULÈNCIA I EUTROFITZACIÓ COSTANERA

Els canvis en les aportacions de nutrients, no solament en quantitat sinó també en composició i règim, a la zona costanera, estan afectats directament per l'activitat hu-

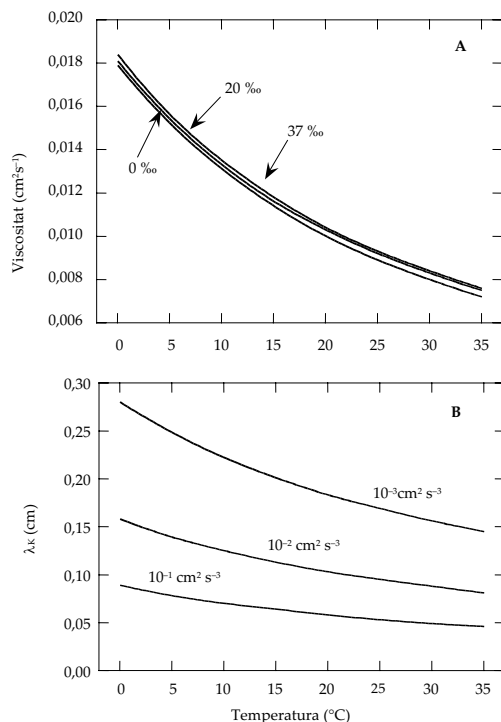


FIGURA 2. Efecte de la temperatura sobre la viscositat de l'aigua amb tres salinitats diferents (A) i sobre l'escala espacial de Kolmogorov amb tres intensitats de turbulència diferents (B).

mana (vegeu la figura 3). L'ús d'adobs en agricultura, l'aportació d'aigües residuals tractades o no, la regulació dels cabals del riu, l'escorrentiu superficial no puntual incrementat per la superfície asfaltada o cimentada, etc., condicionen l'aportació de nutrients bàsics per a la vida, com poden ser el fòsfor en forma de fosfat i el nitrogen en forma d'amoni o nitrat.

Sembla que hi ha indicis que les zones costaneres d'arreu del món estan sotmeses a una lenta eutrofització amb un increment de les concentracions de nutrients a l'aigua i un increment de la clorofilla mitjana (Cloern, 2001). Increments en la freqüència i intensitat dels esdeveniments de turbulència poden accentuar el desenvolupament de

clorofilla, ja que s'afavorirà la captació dels nutrients per part del fitoplàncton, sobretot el de mida més gran. Aquests canvis, però, són de molt difícil projecció, ja que tenen un component regional o local molt important. D'una banda, hi ha l'aspecte purament antropogènic, ja que el nivell de desenvolupament de la zona condicionarà les aportacions. No es pot dir, però, que hi hagi una relació lineal entre desenvolupament i quantitat d'aportacions, ja que s'ha de tenir en compte que la societat desenvolupada exigeix amb creixent vehemència a les administracions que tinguin cura de les aportacions d'aigües residuals i aigües enriquides amb adobs químics a les conques i zones costaneres. Segurament, els problemes es podran agreujar en les regions en vies de desenvolupament que hagin entrat en un ritme creixent d'activitat econòmica però no hagin assolit encara un benestar social generalitzat. Un altre aspecte que condiciona l'efecte visible de la interacció entre les aportacions de nutrients i la turbulència és la relació entre els diferents compostos. Així, si manca un component bàsic per al desenvolupament de les diatomees, com és el silicat, hi haurà un efecte menor sobre el fitoplàncton o bé podrà produir canvis en la biodiversitat del plàncton. El silicat, que prové bàsicament de la meteorització de roques, i que s'aporta a la zona costanera a través dels rius, pot esdevenir limitant en un escenari de reducció dràstica dels cabals d'aigua del riu i del seu règim de descàrrega, i d'una aportació desproporcionada de nitrogen i fòsfor (en termes de la composició elemental en els organismes vius). Malgrat que el procés d'eutrofització costanera és molt més lent i menys conspicu que l'eutrofització de les aigües continentals, bàsicament perquè és un sistema obert i presenta un gran volum d'aigua amb molta capacitat de dilució, sembla un procés estès globalment, amb una gran incidència en zones com estuaris i mars més o

menys tancats, com poden ser el mar Negre, l'Adriàtic i el Bàltic. També és significatiu que l'eutrofització és un procés reversible, sempre que no s'hagin produït canvis físics importants en el sistema o s'hagin extingit espècies.

Històricament, les aportacions dels rius a les zones costaneres estaven lligades als fenòmens meteorològics. Globalment és interessant observar la creixent regulació del cabal dels rius. Això ocorre sobretot per un augment dels embassaments (hi ha uns quaranta mil grans embassaments, amb preses de més de 15 m d'alçada, amb una taxa d'increment que ara volta els dos-cents cinquanta nous grans embassaments per any) i la canalització. El resultat és que les aportacions sedimentàries a les zones costaneres baixen d'una manera important i que el cabal dels rius es fa més previsible. D'una banda, això no afecta gaire la magnitud (però sí la variabilitat) de la càrrega de nutrients com fòsfor i nitrogen, ja que s'aporten majoritàriament en forma dissolta, però pot afectar l'aportació de silicat que prové de la meteorització, i això pot provocar canvis en els equilibris nutricionals, que poden afavorir algues petites i bacteris, en detriment de diatomees. D'altra banda, les aportacions dels rius a les zones costaneres es fan, en certa mesura, independents dels fenòmens de les precipitacions. Així, si les aportacions a la zona costanera es fan més regulars i estan desacoblades dels fenòmens meteorològics, podem albirar que la turbulència que resulta d'aquests fenòmens serà el factor modulador de la dinàmica del fitoplàncton a la zona costanera.

Un altre factor de desacoblament pot ser l'energia provinent de la mar de fons, és a dir, les ones produïdes per vent en zones remotes que poden viatjar milers de quilòmetres sense gairebé pèrdua d'energia fins a arribar a les zones costaneres. En el marc de canvis climàtics la mar de fons pot esdevenir més important a les zones costaneres ba-

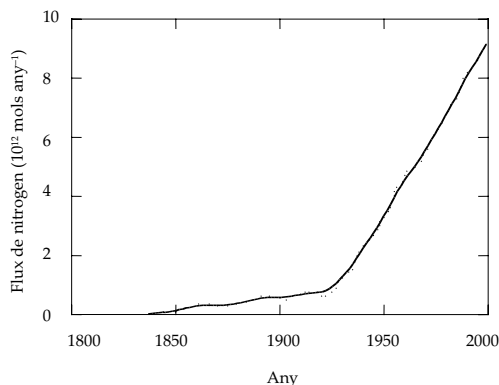


FIGURA 3. Flux total de nitrogen cap a la zona costanera. Aquest flux inclou el nitrogen dissolt total, el nitrogen particulat reactiu i el nitrogen particulat refractari orgànic i inorgànic, tots d'origen limnètic, a més d'aigües residuals i deposició atmosfèrica. Redibuixat de Mackenzie *et al.* (2002).

nyades pels grans oceans, ja que l'increment d'huracans es preveu al llarg de les zones tropicals i equatorials connectades. També pot ser important l'augment d'ones de mar i mar de fons a l'oceà Àrtic, ja que el desglaçament parcial d'aquest mar farà que el *fetch* (distància ininterrompuda per obstacles al mar sobre la qual el vent pot bufar) augmenti i, per tant, també augmentarà la generació d'ones.

Així doncs, la turbulència és un factor més per preveure en els processos d'eutrofització costanera. La previsió del signe que ha de tenir l'efecte de la turbulència sobre el sistema serà de caràcter local. A grans trets, podem dir que en zones costaneres més o menys obertes un increment de la turbulència incrementarà la producció primària sempre que es donin unes condicions de càrrega de nutrients equilibrades. L'aprofitament d'aquesta producció primària envers altres components tròfics superiors o bé envers el reciclatge en forma de matèria orgànica dissolta dependrà de la simultaneïtat temporal de les dinàmiques poblacionals, sobretot de zooplàncton amb els esdeveniments de turbulència i de l'efecte

final de la turbulència sobre aquest zooplàncton. En canvi, en zones i mars més o menys confinats, on el grau d'eutrofització ja és gran, i fins i tot es poden haver produït fenòmens d'hipòxia o anòxia amb mort d'algues i fanerògames marines, un augment de la turbulència pot afavorir la barreja d'aigües i una consegüent oxigenació, i es tractaria de veure si aquest efecte és més o menys important que l'augment del flux de nutrients envers les cèl·lules individuals. Un fenomen de retroalimentació addicional pot esdevenir-se per un augment de la viscositat de l'aigua en els casos de proliferacions algals extremes, com en el cas del *mare sporco* característic de l'Adriàtic. En aquests casos, s'augmenta el llinar dels remolins més petits i s'augmenta la tensió superficial de l'aigua, de manera que un nivell de turbulència determinat té menys influència sobre la comunitat planctònica i la distribució d'organismes. Serà en aquests casos que un augment de la intensitat de la turbulència i un augment de la freqüència d'esdeveniments pot restablir un equilibri o, si els esdeveniments són prou forts, trencar aquesta dinàmica de creixement algal massiu.

TURBULÈNCIA I CONTAMINANTS

Les societats modernes generen una àmplia gama de contaminants, des de metalls pesants fins a hidrocarburs, que ho són bé perquè en condicions naturals aquests compostos no es troben, o bé perquè es troben en concentracions molt més baixes. Molts d'aquests compostos entren a les zones costaneres simplement per abocament directe o bé pels rius. D'altres hi entren a través de l'atmosfera per deposició seca o amb pluja. La majoria de compostos tenen una reactivitat en el medi marí, ja sigui amb l'aigua, amb algun compost dissolt en l'aigua o bé amb partícules inorgàniques o orgàniques

vives o mortes. Com ja hem vist, la turbulència pot fer augmentar els fluxos de substàncies dissoltes envers partícules, de manera que només amb aquest mecanisme es pot incrementar una possible bioacumulació. La turbulència també pot incrementar l'intercanvi aire-aigua d'alguns compostos, com ara el fenantrè i possiblement d'altres (Guitart *et al.*, 2001). L'efecte de la turbulència s'ha estudiat en relació amb l'intercanvi de CO₂ entre l'aigua i l'aire, per la importància d'aquest compost en el cicle global del carboni, però les constants de difusivitat i la seva variació en funció de la turbulència i la rugositat de la superfície del mar no es poden extrapolar a compostos de diferent pes molecular i de diferent solubilitat en aigua o aire. Per tant, aquest és un camp que roman inexplorat des del punt de vista científic. En relació amb els canvis que podem tenir en els patrons de turbulència en el futur, només podríem preveure que els diferents processos de reactivitat dels contaminants es veurien accelerats amb un increment de la turbulència.

TURBULÈNCIA I PROLIFERACIONS ALGALS MASSIVES

La morfologia de la nostra costa, i ara parlo de la costa catalana, ha canviat profundament, especialment en els darrers cinquanta anys. La construcció de ports i espigons, la construcció de barreres per estabilitzar el litoral per a vies de tren, accessos a platges, la construcció d'habitatges i hotels fins arran d'aigua i la reducció de praderies de fanerògames marines han fet que una part important de la nostra costa sigui artificial. La finalitat o conseqüència d'aquests canvis ha estat una estabilització de la zona costanera pel que fa al refugi de la variabilitat de les inclemències del temps i, per tant, de l'estat de la mar. Sembla que aquesta estabilització, especialment

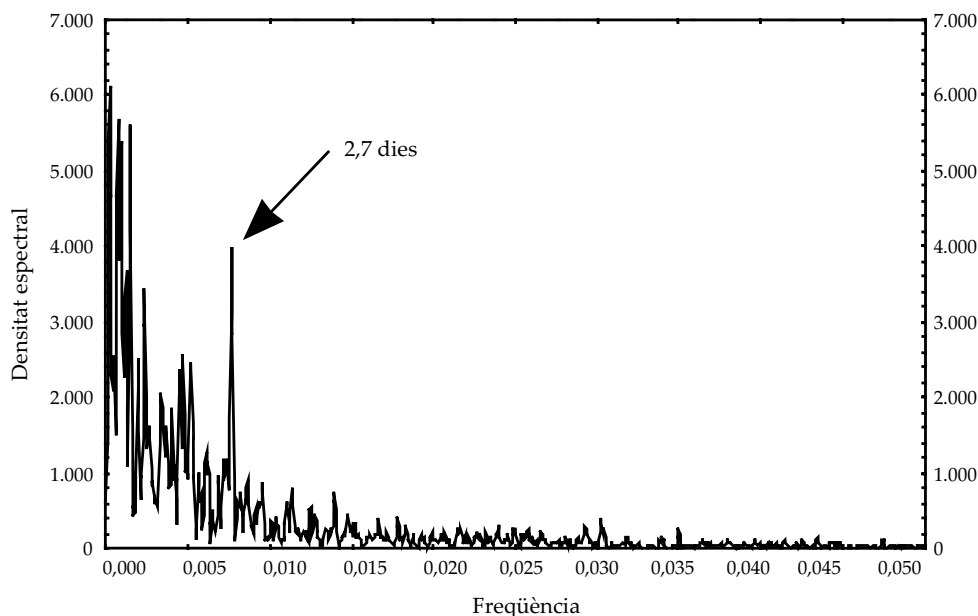


FIGURA 4. Anàlisi de Fourier per a una sèrie de dades d'intensitat de vent (Portbou, any 2000). La freqüència de les dades és semihorària, de manera que l'eix de les abscisses s'ha d'invertir i multiplicar per quaranta-vuit per obtenir temps en dies. Es pot veure que hi ha un senyal important cada 2,7 dies i un altre de més difús cada 4-4,5 dies. Aquests senyals segurament són deguts a passos de fronts.

els ports, ha generat refugis d'aigües tranquil·les que han permès un increment de les proliferacions algals nocives d'algunes espècies de fitoplàncton. En concret, el grup de les dinoflagel·lades, algues unicel·lulars o formadores de cadenes, sembla que en general necessita la presència d'aigües tranquil·les per poder créixer (Taylor i Pollinger, 1987; Puigserver *et al.*, 1999), encara que un estudi global (Smayda, 2002) suggereix que almenys alguns grups de dinoflagel·lades podrien tolerar la turbulència natural. En el laboratori s'ha vist que el creixement d'aquests organismes minva o s'atura per la turbulència, encara que aquest fenomen no és generalitzable a totes les espècies de dinoflagel·lades. Si bé és cert que perquè hi hagi un creixement massiu d'aquests organismes també calen unes certes condicions d'elements nutritius a l'aigua i segurament

un record o història prèvia, la turbulència pot ser un element modulador clau. Són reversibles aquestes tendències? Si bé en les darreres dècades s'ha aturat la construcció arran d'aigua i fins i tot hi ha hagut enderrocaments, la construcció de ports i espigons, els elements més estabilitzadors, continua augmentant. Per tant, hom espera un augment d'aigües tranquil·les al nostre litoral i previsiblement un augment de les proliferacions algals nocives. Aquesta tendència segurament es dona a tot el món, però especialment a les zones de més riquesa econòmica i especialment allí on hi ha una massificació humana just a la línia de la costa, com poden ser moltes regions de la Mediterrània. En el marc d'un possible canvi climàtic que augmentaria la intensitat i variabilitat dels fenòmens meteorològics i, per tant, augmentaria la

turbulència a l'aigua lliure, el fet de tenir zones confinades segurament eliminaria l'impacte negatiu de la turbulència sobre el creixement de dinoflagel·lades. Si a la vegada s'incrementen les àrees d'aigües confinades, es preveu un augment dels fenòmens de creixement massiu d'algues. A Calvià (Mallorca) s'han instal·lat unes bombes que mouen l'aigua dins la badia, amb un èxit relatiu en la mitigació de proliferacions massives d'algues, en aquest cas del dinoflagel·lat *Alexandrium taylori*, del qual, però, només comencem a conèixer el cicle de vida (Garcés *et al.*, 1998).

La regeneració de les praderies de fanerògames marines com la *Posidonia oceanica* sembla que es produirà en les properes dècades, fins i tot fora de zones protegides o reserves, ja que la pressió social de sensibilització ambiental anirà augmentant en aquest sentit, i pel seu paper com a estabilitzador de sediments. Aquesta estabilització és molt possible que esmorteïxi l'energia cinètica de l'aigua en zones someres i, per tant, redueixi la turbulència. Com afectarà això les proliferacions massives d'algues, no ho sabem. Tampoc no és fàcil preveure com variaran aquests paràmetres globalment, encara que se suposa que no hi haurà una tendència generalitzada, sinó que els canvis estaran molt afectats per situacions naturals i socials regionals.

TURBULÈNCIA, BIODIVERSITAT I EVOLUCIÓ

Ja hem vist com la turbulència pot afavorir el flux de nutrients envers organismes més o menys grans del fitoplàncton, com són algunes diatomees. També sembla que, en general, afecta negativament el creixement del grup de les dinoflagel·lades. Així doncs, en afavorir la dominància relativa d'un grup d'organismes, o bé reduir la d'un altre, la turbulència pot afectar tem-

poralment la diversitat d'organismes en el plàncton. Però aquests grups d'organismes, juntament amb plàncton més petit, se solen anar alternant pel que fa a la seva importància relativa en biomassa. En conseqüència, l'estructura i el funcionament de l'ecosistema planctònic va variant. Així, es fa molt difícil parlar de biodiversitat en el medi marí planctònic en un sentit general, ja que aquesta va variant en el temps de manera natural. Aquesta dificultat ocorre en part perquè fins ara hem parlat de la turbulència com a «temps meteorològic» que el plàncton experimenta, mentre que ara comencem a parlar de la turbulència com a «clima» que experimenta el plàncton (Catalan, 1999). Així, juntament amb efectes ecològics es comencen a considerar efectes evolutius. Si entenem la turbulència com una pertorbació del medi en relació amb unes condicions més o menys constants, la teoria de les pertorbacions intermèdies (Connell, 1978) afavoriria que hi hagués una alternança en el temps d'organismes més adaptats a canvis i organismes que prefereixen condicions estables. Si es pogués fer una mitjana de la biodiversitat en el temps, aquesta seria més gran. Experiments de laboratori i de camp han donat suport a la teoria de Connell per al fitoplàncton (Sommer, 1995; Flöder i Sommer, 1999). Sembla que les pertorbacions intermèdies amb una freqüència de 6-10 dies són les més efectives per augmentar la diversitat. És interessant observar que aquestes freqüències són lleugerament inferiors a la freqüència de pas de fronts meteorològics, com a mínim a la costa catalana (vegeu la figura 4). En aquest sentit, en el marc d'un augment de la intensitat i variabilitat dels fenòmens de turbulència es preveuria una disminució de la diversitat, ja que ens allunyariem de les freqüències òptimes, però no es creu que se superessin llindars catastròfics letals. De fet, es fa difícil preveure aquests llindars catastròfics per a microorganismes del plàn-

ton, no per la percepció humana que els canvis no poden ser prou sobtats en relació amb canvis produïts de manera natural, sinó per les elevades taxes de multiplicació d'aquests organismes, que donen un gran potencial d'adaptació. Potser algunes algues grans, alguns dinoflagel·lats i algunes espècies de zooplàncton que depenen més de cicles anuals i fins i tot multianuals podrien extingir-se, però això és pura especulació.

TURBULENCIA I LA PRODUCCIÓ DE DMS

Se sap que el sulfur de dimetil (DMS) té un paper important en la regulació del clima global, ja que forma nuclis de condensació per generar núvols. També se sap que hi ha microorganismes marins que intervien en el cicle del DMS i sembla que mitjançant una sèrie de retroalimentacions negatives podrien arribar a compensar l'efecte hivernacle de l'augment de diòxid de carboni a l'atmosfera (Charlson *et al.*, 1987). El cicle del DMS, les retroalimentacions que conté i l'impacte del canvi climàtic són objecte de continus estudis ben resumits en aquest mateix volum (Simó, aquest volum). En la mesura que l'augment d'instabilitat atmosfèrica pot fer augmentar la freqüència i intensitat de tempestes i, per tant, de la turbulència a l'aigua, hi ha processos del cicle del DMS que poden quedar afectats. D'una banda, podria augmentar la taxa de transferència de DMS de la fase aquosa a l'atmosfèrica. D'altra banda, si un augment de la turbulència pot afectar la profunditat de la capa de barreja, també afectarà els processos de retroalimentació del cicle del DMS (Simó i Pedrós-Alió, 1999). Hi ha altres aspectes interessants, com podrien ser un augment de les taxes de predació sobre els cocolitofòrids responsables de la producció dels precursors del DMS. Amb tot plegat, però,

es fa massa especulatiu aventurar quin podria ser el signe final de la interacció entre un augment de la turbulència i el cicle del DMS, i només es pot argumentar que encara necessitem molta recerca bàsica en aquest camp per poder esbrinar-ne les tendències.

TURBULENCIA I SEDIMENTACIÓ

En principi, la turbulència tridimensional ben desenvolupada no hauria d'afectar la sedimentació de partícules a la columna d'aigua, ja que simplement afegeix un component de soroll a les velocitats de sedimentació forçades per la gravetat, però hi ha indicacions que la turbulència pot afectar les taxes de sedimentació, sobretot per a partícules amb taxes de sedimentació més grans d' 1 m d^{-1} i en una sèrie de condicions (Ruiz, 1996). Més clar és que la turbulència i el flux de cisallament, en augmentar la probabilitat de trobada entre partícules del mateix o diferent diàmetre, fa que les partícules es puguin agregar. La majoria de partícules solen tenir un grau d'enganxament que fa que dues partícules es quedin juntes després de trobar-se. Si parlem del volum total degut a partícules, llavors la turbulència farà augmentar la sedimentació, ja que les partícules, en agregar-se, formaran partícules més grans que sedimentaran més ràpidament. També hi ha un efecte invers produït per les forces de cisallament quan la intensitat de la turbulència és gran i les partícules grans es poden desagregar. En general, però, aquestes condicions només es donen en sistemes artificials de barreja on les intensitats de turbulència són excepcionalment altes. En zones costaneres someres, la turbulència també pot produir un fenomen de resuspensió de matèria particulada i, així, una sensació que la turbulència ajuda a mantenir el material particulat en suspensió. L'efecte de la turbulència sobre la sedimentació de partícules s'ha estudiat poc

TAULA 1. *Indicadors de canvi climàtic global recent i les observacions més significatives*

<i>Indicador</i>	<i>Canvis observats</i>
Concentració atmosfèrica de CO ₂	368 ppm (any 2000) enfront de 280 ppm (anys 1000-1750).
Temperatura global mitjana en superfície	Increment de 0,6 ± 0,2 °C en el segle xx; zones terrestres més que oceans.
Temperatura en superfície de l'hemisferi nord	Increment en el segle xx més que durant cap segle en els últims mil anys; els noranta, dècada més calenta del mil·lenni.
Rang diari de temperatura en superfície	Decrement entre 1950 i 2000 sobre zones terrestres. Les mínimes nocturnes han incrementat el doble que les màximes diürnes.
Precipitació sobre zones terrestres	Increment del 5-10 % durant el segle xx a l'hemisferi nord però decrement en algunes regions (p. ex., parts de la Mediterrània).
Esdeveniments de precipitació forta	Increment en latituds mitjanes i altes a l'hemisferi nord.
Nivell global mitjà del mar	Increment a una taxa anual d'1 a 2 mm durant el segle xx.
Extensió i gruix del gel marí àrtic	Reducció del 40 % en gruix en les últimes dècades a l'estiu-tardor. Reducció de l'extensió del 10-15 % des dels cinquanta a la primavera i estiu.
Gelers no polars	Ampli retrocés durant el segle xx.
Esdeveniments d'El Niño	S'han fet més freqüents, persistents i intensos en els últims vint-tres anys, comparat amb els cent anys anteriors.
Blanqueig d'esculls de corall	Increment de la freqüència, especialment durant esdeveniments d'El Niño.

Modificat de *Climate change 2001: Synthesis report*.

en ambients aquàtics, i menys encara tenint en compte la diversitat de mides, formes, densitats, composicions químiques i propietats de superfície de les partícules que podem trobar en una massa d'aigua.

CONCLUSIONS

La turbulència de petita escala, ubiqüa a l'oceà, interacciona de múltiples maneres amb els organismes i processos del plàncton. Això resulta en uns canvis metabòlics del sistema, de manera que, dependent de la càrrega de nutrients disponible, pot augmentar el nivell d'heterotròfia o bé d'autotròfia. Les tendències de canvi des del punt de vista climàtic i d'altres aspectes mediambientals, moltes afectades per

l'activitat humana, es van aclarint lentament. La magnitud i els signes d'aquests canvis globals per a un futur a mitjà termini també van reduint la seva incertesa malgrat que, en general, encara es fa molt difícil preveure canvis d'un paràmetre en concret per a una zona determinada. Dins del marc de possibles escenaris de futur hi ha un augment de la intensitat i freqüència de fenòmens meteorològics tempestuosos que poden fer augmentar la turbulència a l'aigua. Altres canvis globals inclouen la reducció de la turbulència a les zones costaneres per una estabilització antropogènica del litoral, els canvis en les descàrregues dels rius deguts a la gestió dels seus cabals i l'augment de l'aportament de material en suspensió transportat per l'aire des de zones amb elevada erosió eòlica cap al mar. Els canvis

en la turbulència i en la disponibilitat de nutrients i l'ajustament/desajustament en el temps dels fenòmens de turbulència amb els fenòmens d'aportació de nutrients dibuixen diferents escenaris en la resposta del plàncton i del sistema en general. Aquests escenaris (i possiblement d'altres) haurien de ser considerats en la planificació i gestió de les zones costaneres en què es prevegi que els canvis puguin tenir un efecte més gran sobre la interacció de la turbulència i els nutrients amb l'estructura i funció del sistema planctònic.

AGRAÏMENTS

A la Cèlia Marrasé per proposar-me escriure aquest treball. A l'Òscar Guadayol per tirar endavant les sèries temporals de dades de vent i de turbulència i produir les figures 1 i 4. A en Carlos Guitart per introduir-me en el món dels contaminants orgànics persistents. Aquest treball ha estat possible gràcies al suport del projecte europeu NTAP (EVK3-CT-2000-00022), que forma part del conjunt de projectes ELOISE.

REFERÈNCIES

- ARIN, L.; MARRASÉ, C.; MAAR, M.; PETERS, F.; SALA, M.; ALCARAZ, M. (2002). «Combined effects of nutrients and small-scale turbulence in a microcosm experiment. I. Dynamics and size-distribution of osmotrophic plankton». *Aquat. Microb. Ecol.*, vol. 29, pàg. 51-61.
- CATALAN, J. (1999). «Small-scale hydrodynamics as a framework for plankton evolution». *Jpn. J. Limnol.*, vol. 60, pàg. 469-494.
- CHARLSON, R. J.; LOVELOCK, J. E.; ANDREAE, M. O.; WARREN, S. G. (1987). «Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate». *Nature*, vol. 326, pàg. 655-661.
- CLOERN, J. E. (2001). «Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem». *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, vol. 210, pàg. 223-253.
- CONNELL, J. H. (1978). «Diversity in tropical rain forests and coral reefs». *Science*, vol. 129, pàg. 1302-1310.
- DOWER, J. F.; MILLER, T. J.; LEGGETT, W. (1997). «The role of microscale turbulence in the feeding ecology of larval fish». *Advances in Marine Biology*, vol. 31, pàg. 189-220.
- FLÖDER, S.; SOMMER, U. (1999). «Diversity in planktonic communities: An experimental test of the intermediate disturbance hypothesis». *Limnol. Oceanogr.*, vol. 44, pàg. 1114-1119.
- GARCÉS, E.; DELGADO, M.; MASÓ, M.; CAMP, J. (1998). «Life history and *in situ* growth rates of *Alexandrium taylori* (Dinophyceae, Pyrrophyta)». *J. Phycol.*, vol. 34, pàg. 880-887.
- GUITART, C.; PETERS, F.; MARRASÉ, C.; DACHS, J.; BAYONA, J. M.; ALBAIGÉS, J. (2002). «Effects of turbulence on the air-seawater exchange of persistent organic pollutants». A: *32nd International Symposium on the Environment & Analytical Chemistry*. Plymouth, RU.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2001). *Climate change 2001: Synthesis report. Summary for policymakers*. <http://www.ipcc.ch/pub/SYRspm.pdf>
- KIØRBOE, T. (1993). «Turbulence, phytoplankton cell size, and the structure of pelagic food webs». *Advances in Marine Biology*, vol. 29, pàg. 1-72.
- LLEBOT, J. E. (1997). *El canvi climàtic*. Barcelona: Rubes. 160 pàg.
- MACKENZIE, F. T.; VER, L. M.; LEMAN, A. (2002). «Century-scale nitrogen and phosphorus controls of the carbon cycle». *Chem. Geol.*, vol. 190, pàg. 13-32.
- PETERS, F.; MARRASÉ, C. (2000). «Effects of turbulence on plankton: an overview of experimental evidence and some theoretical considerations». *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, vol. 205, pàg. 291-306.
- PETERS, F.; MARRASÉ, C.; HAVSKUM, H.; RASSOULZADEGAN, F.; DOLAN, J.; ALCARAZ, M.; GASOL, J. M. (2002). «Turbulence and the microbial food web: effects on bacterial losses to predation and on community structure». *J. Plankton Res.*, vol. 24, pàg. 321-331.
- PUIGSERVER, M.; MOYÀ, G.; RAMON, G. (1999). «Proliferació de l'espècie tòxica *Alexandrium minutum* Halim en el Port de Palma (Mallorca, març 1999), relació amb les característiques del medi». *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears.*, vol. 42, pàg. 48-53.
- RUIZ, J.; GARCÍA, C. M.; RODRÍGUEZ, J. (1996). «Sedimentation loss of phytoplankton cells from the mixed layer: effects of turbulence levels». *J. Plankton Res.*, vol. 18, pàg. 1727-1734.
- SIMÓ, R.; PEDRÓS-ALIÓ, C. (1999). «Role of vertical mixing in controlling the oceanic production of dimethyl sulphide». *Nature*, vol. 402, pàg. 396-399.
- SMAYDA, T. J. (2002). «Turbulence, watermass stratification and harmful algal blooms: an alternative view and frontal zones as "pelagic seed banks"». *Harmful Algae*, vol. 1, pàg. 95-112.

SOMMER, U. (1995). «An experimental test of the intermediate disturbance hypothesis using cultures of marine phytoplankton». *Limnol. Oceanogr.*, vol. 40, pàg. 1271-1277.

TAYLOR, J. F. R.; POLLINGER, U. (1987). «Ecology of dinoflagellates». A: TAYLOR, F. J. R. [ed.]. *The biology of dinoflagellates*. Oxford: Blackwell.