

LES ARTÈRIES DE GAIA

Escrit per:

Josep Lluís Pelegrí Llopart

Institut de Ciències del Mar

CMIMA-CSIC



Gaia

L'any 1988 vaig emprendre l'estudi del flux de nutrients a l'Atlàntic Nord juntament amb el professor Gabriel Csanady (premi Huntsman d'Oceanografia 1991). Part del nostre interès estava a determinar quin és el transport de nutrients associat a una intensa corrent oceànica que flueix cap al nord al llarg del talús de la costa est d'Amèrica del Nord, l'anomenada Corrent del Golf. Els nostres càlculs van mostrar l'existència d'un extraordinari flux de nutrients a uns centenars de metres de profunditat i, poc després, vàrem presentar aquests resultats al Brookhaven National Laboratory dels Estats Units sota un encapçalament que deia "La Corrent de Nutrients, artèria de Gaia, el planeta viu".

El concepte d'una terra viva no es nou dintre la història dels pobles: a la religió hindú tenim la deïtat Kali, entre els indis americans hopi hi ha la mare terra Tapat, per als indis quítxua la mare terra es diu Pacha Mama, i per als antics grecs la deïtat de la terra era Gaia. En el món de la Ciència la visió holística de la natura i el nostre planeta també ha estat sostinguda per diversos científics: el geòleg escocès James Hutton (1726-1797), l'any 1785, va proposar que l'estudi de la terra s'havia de fer a través de conceptes fisiològics, la va anomenar un superorganisme, i va comparar la circulació de la sang amb el reciclatge dels elements. El naturalista i científic rus Vladimir Vernadsky (1863-1945) va introduir el concepte de la biosfera, en el que es reconeixia la matèria

com una força geològica viva. I el biofísic nord-americà d'origen polonès, Alfred Lotka (1880-1949), defensava la idea que l'evolució dels organismes no es podria separar de l'evolució del seu medi físic. Més a prop nostre, cal recordar un català universal, en Ramon Margalef (1919-2004), qui ha realçat els conceptes de diversitat i connectivitat, així com la rellevància dels cicles biogeoquímics dels elements, en el funcionament de la biosfera. Però ha estat en James Lovelock qui ha portat a debat científic la idea que l'estat del nostre planeta és el resultat de la força moduladora de la vida en el que s'ha anomenat la hipòtesi Gaia, o simplement Gaia (Lovelock 1972, 1979; Lovelock and Margulis, 1973).

La hipòtesi Gaia té molts defensors no només dintre la societat sinó també dintre de l'àmbit científic, tal com mostren les 1a i 2a conferències Chapman sobre Gaia (1988 i 2000, respectivament), però també compta amb nombrosos detractors. Aquest escepticisme científic ha fet que el nombre de publicacions en revistes periòdiques, en les que s'esmenti directament el concepte Gaia, sigui relativament reduït (si cerquem a la ISI Web of Science trobem que fins el maig de 2004 el nombre de publicacions que incorporen el terme *Gaia hypothesis* és només de 44, la tendència actual és més aviat parlar del *earth system*). En qualsevol cas, el plantejament fet originalment per James Lovelock amb la col·laboració inicial de Lynn Margulis, i posteriorment d'altres científics com Andrew Watson, Thymoty Lenton i David Wilkinson, ha obert un clar dilema: és l'estat actual del nostre planeta el resultat de la aparició de la vida?, o ha estat la vida la que s'ha anat adaptant a les condicions del planeta? O, encara més, té el nostre planeta un comportament fisiològic que ens pugui fer pensar que és una mena de superorganisme? Sigui quina sigui la resposta la realitat és que la hipòtesi Gaia ha originat una molt necessària recerca interdisciplinària sobre el sistema terrestre, un sistema complex amb compartiments oberts que interaccionen profundament.

Gaia presenta la terra com si tingués totes les funcions d'un organisme viu, capaç de mantenir-se així gràcies a la complexa interacció de tots i cadascun dels seus components. Com tot ésser viu té un sistema circulatori, mitjançant el qual els nutrients i gasos necessaris arriben a totes les cèl·lules del cos i els productes residuals generats s'eliminen, sembla adient pensar que Gaia requerirà també aquest tipus de sistema. Més encara, podem especular que tots els éssers vius tenen sistemes optimitzats i que, per tant, els seus sistemes circulatoris deuen presentar analogies importants. Amb aquesta idea, embrenem el camí de buscar analogies entre la terra i altres éssers vius. Donada la complexitat del sistema terrestre, sembla lògic buscar analogies amb organismes superiors, també extraordinàriament complexes.

Els mamífers i en particular l'ésser humà poden servir, doncs, com a patró del funcionament d'un sistema circulatori complex, i de la seva interacció amb altres sistemes fisiològics. Al sistema circulatori humà la sang incorpora l'oxigen dels pulmons, obté energia oxidant matèria orgànica, incorpora nutrients a la sang mitjançant el fetge, elimina toxines als ronyons, i retorna el diòxid de carboni perquè sigui expulsat també a través dels pulmons (Figura 1). En aquest article esbrinarem algunes sorprenents analogies entre els fluxos que tenen lloc al sistema circulatori del cos humà i els fluxos biogeoquímics oceànics amb l'objectiu d'identificar els processos que fan de la terra un sistema robust, el sistema d'un ésser viu sa.

Oceans de vida

Els productors primaris, popularment coneguts com plantes verdes, utilitzen la llum del sol, diòxid de carboni, aigua i nutrients minerals, per produir matèria orgànica (biomassa). En aquest procés de fotosíntesi s'allibera l'oxigen del diòxid de carboni, i els àtoms de carboni s'ajunten amb l'aigua per formar carbohidrats. La quantitat de biomassa generada per unitat de volum és el que anomenem producció primària, i la producció de biomassa, també per unitat de volum, i per unitat de temps, s'anomena productivitat. Els valors mitjos de productivitat de l'oceà estan entre 50 i 100 g C m⁻² any⁻¹, que és aproximadament la meitat de la productivitat mitja dels continents, d'uns 150 g C m⁻² any⁻¹. En

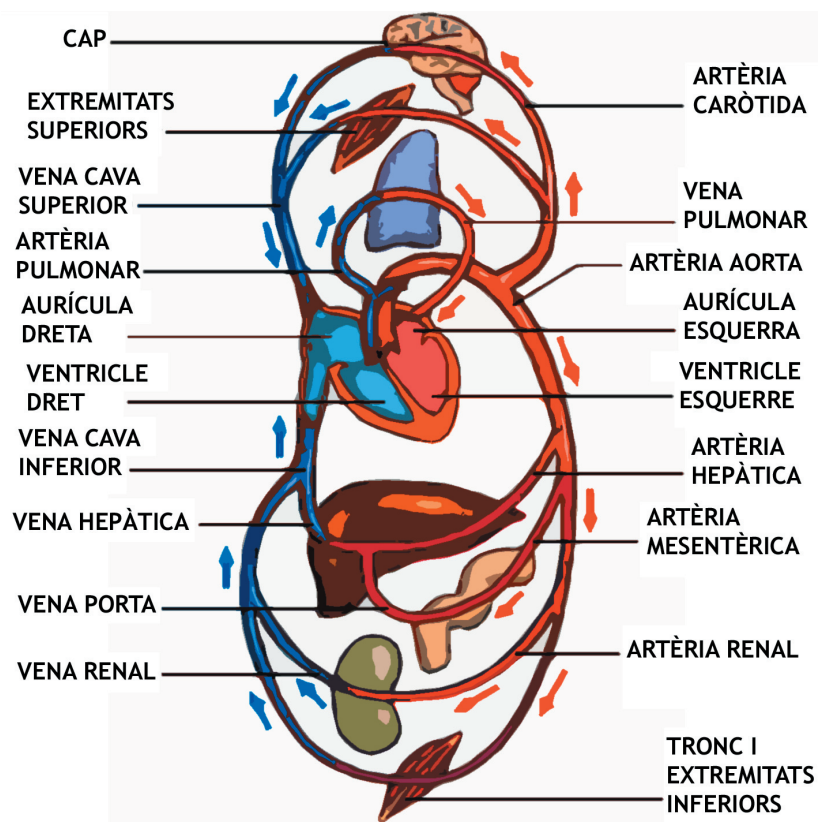


Figura 1. Esquema simplificat del sistema circulatori d'un ser humà. L'unitat bàsica és el batec del cor, tenim un cicle curt que aireja la sang als pulmons i un cicle llarg que empenya la sang de nutrients i els porta a totes les cèl·lules del cos. Adaptat de la web del Projecte Biosfera del MECD (<http://iris.cnice.mecd.es/biosfera/>).

realitat els valors màxims de productivitat són bastant semblants, prop de 2000 g C m⁻² any⁻¹, però la productivitat de l'oceà obert (lluny de les costes) sol ser molt més baixa, semblant a la productivitat de regions desèrtiques continentals. A pesar d'aquesta relativament baixa productivitat mitjana dels oceans, com que la seva superfície és el 70% de la superfície del globus terrestre resulta que la producció integrada de tots els oceans és comparable a la producció conjunta de totes les zones terrestres.

La producció oceànica primària està relacionada principalment amb la quantitat de biomassa "verda" per unitat de volum d'aigua. Això es deu a que la producció primària a l'oceà prové fonamentalment d'algues microscòpiques (fitoplàncton) que utilitzen nutrients nous (amb freqüència s'usa com a referència el nitrat), i per tant l'anomenem producció nova. Una altra petita part de la producció nova ve d'algues macroscòpiques i també d'alguns bacteris. Encara que hi ha bacteris que poden utilitzar nutrients excretats pels organismes (com ara l'amoni), aquesta producció regenerada sembla que està per sota del 10% del total de la producció primària. De la relació entre pigments (color de l'aigua) i fitoplàncton, per una banda, i entre fitoplàncton i producció primària, per l'altra, es pot inferir la producció primària dels primers metres de la columna d'aigua a partir de la radiació (dins del rang visible de l'espectre d'energia) de la superfície dels oceans. La productivitat oceànica, per altra banda, estaria relacionada amb el manteniment o canvi temporal d'aquest color superficial.

Durant els últims 25 anys hem pogut observar el color de la superfície dels oceans amb diversos satèl·lits i això ha permès que els oceanògrafs ens adonem de la globalitat, i variabilitat alhora, en els patrons de producció primària oceànica (Figures 2 i 3). Aquesta distribució depèn de la disponibilitat de dos factors necessaris per a la producció de biomassa: llum i nutrients. L'energia lluminosa, en forma d'irradiació provenint de l'atmosfera, segueix un cicle anual que depèn de la regió geogràfica

que considerem i que, per tant, pot ser predita amb força exactitud malgrat les variacions associades a la coberta de núvols. Aquesta energia, però, s'atenua a mida que penetra dins de l'aigua, en funció de la quantitat de sediments i matèria orgànica en suspensió. Això fa que a partir de certa fondària (anomenada profunditat de compensació) la respiració (consum de biomassa) del propi fitoplàncton supera la seva capacitat de producció de biomassa. Per sota de la profunditat de compensació no s'hi troba fitoplàncton de manera permanent, simplement perquè utilitzaria més energia de la que pot rebre del Sol.

L'altre factor necessari perquè hi hagi producció és la disponibilitat de nutrients. Els nutrients que es troben a la capa més superficial, normalment ben barrejada degut a l'acció del vent, són ràpidament utilitzats. Per sota d'aquesta capa l'oceà està estratificat, amb aigües progressivament més denses a mida que ens allunyem de la superfície, i allà és on trobem altes concentracions de nutrients. Aquestes superfícies de densitat constant s'anomenen isopícnes i les podem visualitzar com els camins preferents que segueixen les masses d'aigua dins l'oceà (la Figura 4, per exemple, mostra la distribució de les isopícnes en una secció que travessa el Corrent del Golf). Perquè existeixi una producció primària contínua han d'haver-hi processos físics que, per un costat, mantinguin el nivell alt de nutrients a les capes profundes i, per altra

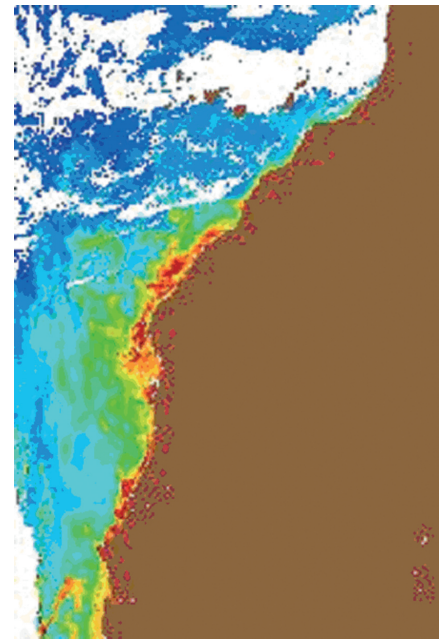


Figura 3. Imatge Seawifs representativa de la biomassa vegetal a la superfície de l'oceà a la costa del nord-oest d'Àfrica el 27 de desembre de 2002, on s'aprecia una gran variabilitat a nivell de mesoscala. Reproduïda del web de la NASA (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>).

banda, proporcionin un flux de nutrients des d'aquestes capes més profundes cap a les capes superficials. Això s'aconsegueix en gran part mitjançant els corrents oceànics que transporten nutrients i així mantenen uns nivells de concentració alts a les capes profundes. Si aquests corrents arriben fins a regions on les capes riques en nutrients s'enfilen cap a la superfície llavors podem parlar d'un procés d'irrigació.

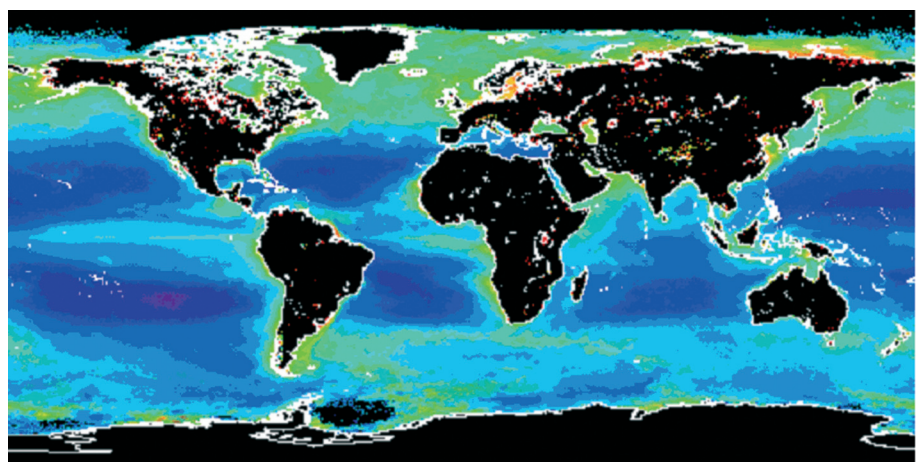


Figura 2. Imatge Seawifs de la biomassa superficial oceànica, mitjana pel període 03-07-02 a 25-05-04. Reproduïda de la web del projecte Seawifs de la NASA (<http://seawifs.gsfc.nasa.gov/>).

El cas de l'Atlàntic Nord

Les aigües superficials de les altes latituds de l'Atlàntic Nord (on té lloc un gir ciclònic subpolar) estan alimentades per l'extensió del Corrent del Golf, que arriba a transportar prop de 1000 kmol de nitrat per segon, i quantitats proporcionals d'altres nutrients (Figura 4). Gran part d'aquests nutrients recircula

a les aigües subtropicals (on té lloc un gir anticiclònic) en capes isopícniques que es troben a varis centenars de metres de fondària però sembla que al menys uns 200 kmol per segon s'endinsen al gir subpolar i van apropant-se a la superfície (Pelegrí i Csanady, 1991; Pelegrí et al., 1996; Jenkins i Doney, 2003; Williams i Follows, 2003; Pelegrí i Marrero-Díaz, 2005). Això fa que hi hagi un flux continu

de nutrients que arriba a grans extensions del gir subpolar i que és capaç de mantenir l'alta productivitat d'aquestes regions durant gran part de l'any (Figures 2, 4 i 5). Considerant una taxa d'utilització mitja al gir subpolar de l'Atlàntic Nord d'aproximadament 1,5 mols de nitrat per metre quadrat i any (cosa que implica valors diverses vegades més alts durant la primavera), i que la seva superfície és

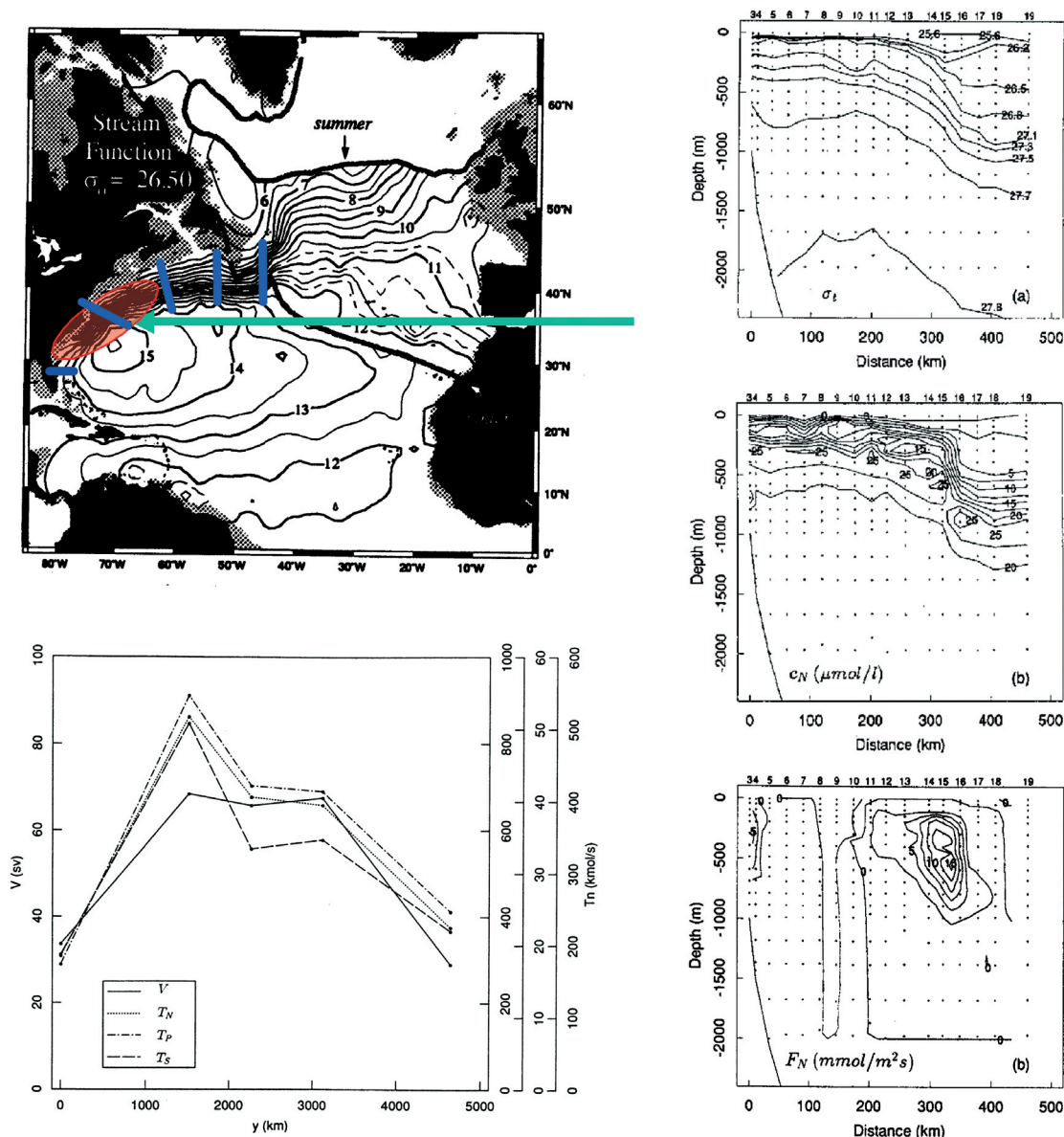


Figura 4. El pannell superior esquerra mostra les línies de flux sobre una superfície que aflora al gir subpolar (densitat superficial 26,5), en la que s'indiquen cinc seccions que travessen el Corrent del Golf. El pannell inferior esquerra mostren el transport d'aigua i nutrients a través de les cinc seccions que travessen el Corrent del Golf. Els pannells de la dreta mostren la distribució de densitat, nitrat i flux de nitrat a través de la secció a 36°N. El pannell superior esquerra està adaptat de Lozier et al. (1995) i els altres de Pelegrí i Csanady (1991).

d'uns $5 \times 10^6 \text{ km}^2$, es pot calcular que es requereix una font de nutrients d'uns 240 kmol per segon, pràcticament la mateixa quantitat que aporta el Corrent del Golf.

Un altre exemple de regió productiva es troba a la costa oest d'Àfrica, en una estreta franja (varies desenes de quilòmetres d'amplada) al llarg de la costa des 20°N a 35°N i, sobretot, en una extensió que arriba varis centenars de quilòmetres mar endins entre Cap Verd (10°N) i Cap Blanc (20°N) (Figures 3 i 5). En aquesta última regió hi ha el que anomenem el filament de Cap Blanc, on conflueixen dos corrents rics en nutrients. Pel nord arriba el Corrent de Canàries, del qual una part molt significativa flueix prop del talús on es troben aigües riques en nutrients (molt productives) que puguen des de capes més profundes gràcies als vents alisis (és el que s'anomena l'aflorament costaner). Del sud arriben, més lentament, aigües també riques en nutrients que provenen de l'Atlàntic tropical. Com a resultat d'aquests dos corrents, uns 20 kmol de nitrat per segon irriguen varis centenars de quilòmetres oceà endins (Pelegrí i Marrero-Díaz, 2005). Encara que aquest transport és un ordre de magnitud més petit que el portat per l'extensió del Corrent del Golf cap el gir subpolar, cal adonar-se que es dirigeix a una regió també més petita, d'uns 10^5 km^2 . Això fa que la quantitat de nutrients disponibles a ser utilitzats sigui molt elevada, d'uns 6 mols de nitrat per metre quadrat i any, quantitat que es correspon amb els extraordinaris valors de producció nova mesurada a la regió.

El gir subpolar i el filament de Cap Blanc són dos dels senyals més clars, per la seva intensitat, extensió i duració, de producció primària que es poden veure des l'espai, en la banda visible de l'espectre (Figures 2 i 5). Totes dues regions són realment espectaculars: la producció al gir subpolar despunta a la primavera quan hi ha suficient llum mentre que la intensitat del filament de Cap Blanc depèn de la convergència de nutrients en aquesta regió. La clau perquè existeixin alts nivells de producció primària a tots dos sistemes és el transport dels nutrients

per corrents oceànics i la seva distribució final cap a capes superficials on seran utilitzats quan hi hagi prou llum. Al gir subpolar el mecanisme final d'arribada a la superfície és la barreja hivernal mentre que a Cap Blanc ho és un sistema de vents més continu. Una característica molt important d'aquests dos sistemes és que la producció té lloc a l'oceà obert, cosa per la qual poden contribuir de forma efectiva a la bomba biològica. Aquesta bomba és un mecanisme biològic, potencialment molt eficient, per l'autoregulació de la biosfera. Mitjançant aquesta bomba es podria extraure l'excés de diòxid de carboni atmosfèric generat per l'home, cap a grans profunditats, on trigaria centenars d'anys a tornar a la superfície o encara més si arribés als sediments. Això contrasta amb la situació a les plataformes continentals on només una petita fracció de la matèria orgànica acaba sent transferida a l'oceà profund, la major part reciclant-se dins la pròpia plataforma.

El sistema circulatori d'un planeta viu

A les imatges de color dels oceans fetes pel sensor Seawifs (en òrbita sobre la terra des de l'agost de 1997) es pot veure clarament l'oscil·lació estacional en la producció primària al nostre planeta, i de forma molt marcada als girs subpolars de tots els oceans. Es molt il·lustratiu veure la seqüència d'imatges mensuals entre 1997 i 2003 que es troben a la pàgina web de la National Aeronautics and Space Administration del Estats Units (NASA), a l'adreça <http://seawifs.gsfc.nasa.gov/seawifs/images/>

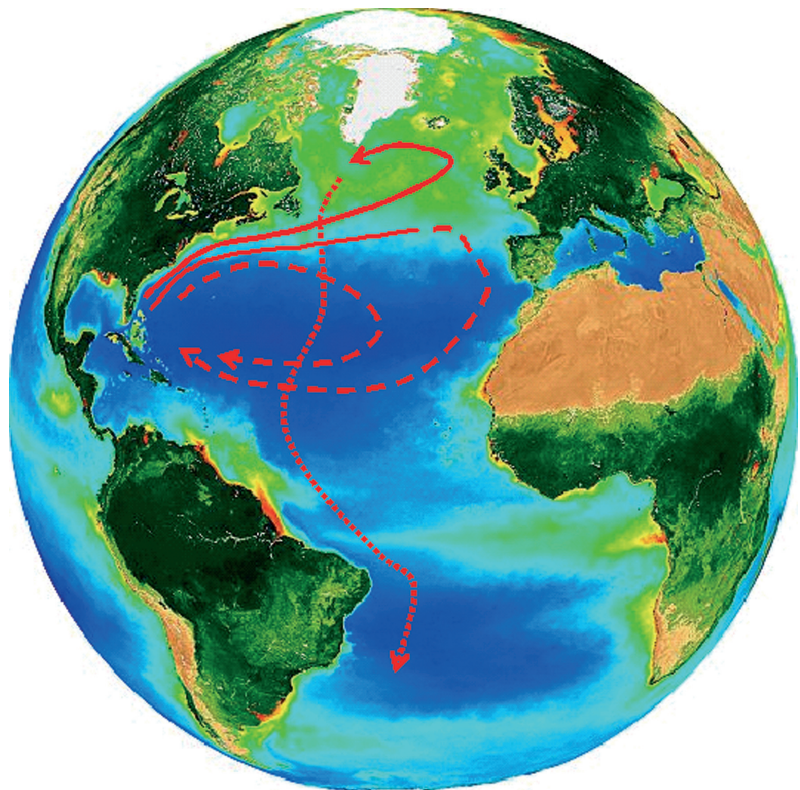


Figura 5. El Corrent del Golf (línies contínues) transporta molts nutrients cap a la superfície de l'oceà a altes latituds, on són utilitzats pel fitoplàncton i es produeixen grans quantitats d'oxigen i biomassa. Part d'aquesta biomassa recircula ràpidament (10 a 20 anys) per les capes termoclines del gir subtropical (línies a traços) i una altra part s'incorpora a l'oceà profund durant la formació d'aigües profundes (línia a punts) per després aflorar lentament a totes les conques oceàniques (100 a 1000 anys). La imatge, que mostra les condicions mitjanes anuals al Océà Atlàntic, està reproduïda del web del projecte Seawifs de la NASA (http://seawifs.gsfc.nasa.gov/cgi/biosphere_globes.pl).

images.html. Durant l'hivern hi ha nutrients però poca llum, de manera que els nivells alts de producció no comencen fins la primavera, cosa que causa l'anomenat floriment de primavera (*spring bloom*). A l'estiu hi hauria llum de sobre per tenir una alta productivitat si es mantinguessin els nivells de nutrients a les capes superficials, però passa que aquestes capes s'escalflen i tot just per sota es crea una zona molt estable (la termoclina estacional). Aquesta zona inhibeix els moviments verticals que són necessaris per a l'arribada de nutrients prop de la superfície. En acabar-se la reserva de nutrients la producció primària disminueix doncs està limitada pels pocs nutrients que puguin barrejar-se a través de la termoclina estacional. A començaments de l'hivern l'aigua superficial es refreda, la termoclina estacional desapareix i fins i tot la barreja augmenta gràcies a la convecció vertical, i els nivells de nutrients es recuperen: el sistema està llest per a l'arribada de la primavera.

La Figura 2 mostra una imatge de color del Seawifs on es pot veure la situació mitjana de la biomassa verda als oceans. Aquesta imatge il·lustra clarament com l'alta productivitat oceànica es centra principalment als girs subpolars i, en menor extensió, al marge oriental de tots els grans oceans. A la Terra la física s'acobla perfectament amb la biologia durant el cicle anual de productivitat a l'Atlàntic (Figures 2 i 5). El fitoplàncton augmenta la seva biomassa incorporant carboni atmosfèric i a l'hivern aquesta matèria orgànica pot escapar-se de les capes superficials de dues maneres. El primer mecanisme es deu a la convergència del transport superficial sobre gran part de l'Atlàntic Nord, induïda per la distribució de vents superficials. Part de les aigües riques en matèria orgànica dissolta s'escapen de la superfície i recirculen per la termoclina permanent del gir subtropical (en capes de menys d'un quilòmetre de fondària), on triguen de l'ordre de 10 anys a fer un cicle complet. Durant aquesta recirculació també té lloc la remineralització de matèria orgànica en nutrients, de manera que un cop l'aigua arriba als girs

subpolars (i als filaments que surten de la costa africana) els nutrients són assimilats pel fitoplàncton i sostenen un nou floriment primaveral. El segon tipus d'acoblament és el que té lloc en la formació d'aigües profundes. Aquestes aigües es produeixen als extrems nord (mars de Groenlàndia i Labrador) i sud de l'Atlàntic (mar de Weddell), durant l'hivern de cada hemisferi, i trigaran centenars d'anys abans de tornar a la superfície. Aquí es troba el gran dipòsit de carboni i de nutrients de la terra, aproximadament el 90% del que hi ha a la hidrosfera, atmosfera i biosfera (sense incloure els que es troben en forma sòlida als sediments i roques, que trigarien temps molt més llargs a ser utilitzats).

Tornem ara a les preguntes que ens fèiem al començament: Quin podria ser el sistema circulatori d'un superorganisme terrestre? I com interacciona aquest amb altres processos fisiològics, com ara els processos d'aireació i nutrició? En un mamífer, com ara l'home, la sang té dos circuits: un curt d'aireació i eliminació de diòxid de carboni, i un llarg de neteja de toxines, nutrició, i distribució dels nutrients i l'oxigen. En el cicle curt el sistema circulatori interacciona amb el sistema respiratori mentre que en el llarg ho fa amb el sistema digestiu. Tots aquests sistemes usen els aliments com a font externa d'energia i operen amb un impuls bàsic que és el batec del cor.

Al nostre planeta podem pensar que el període fonamental és el cicle anual de productivitat, sostingut mitjançant l'energia solar (el lector inquiet podrà apreciar que la seqüència d'imatges de Seawifs abans mencionada fa ben bé l'efecte del batec d'un cor!). L'alta productivitat estacional dels girs subpolars fa que durant l'estiu cada hemisferi alliberi oxigen a l'atmosfera i alhora captura diòxid de carboni (bomba biològica), compensant de sobres els efectes deguts al canvi de temperatura de la superfície de l'oceà (bomba física). Es tracta d'un sistema respiratori a gran escala. El carboni atmosfèric, convertit en matèria orgànica, s'escapa de les capes superficials cada hivern de dues maneres. Part de la matèria s'escapa mitjançant la

circulació termoclina i és remineralitzada de forma que les aigües que arriben altra vegada a la superfície són riques en nutrients i poden mantenir la productivitat subpolar, el cicle estacional d'aireació. En aquesta circulació termoclina tenim l'equivalent del cicle curt de circulació a l'home, on tenim la interacció entre els sistemes respiratori i circulatori.

Altra part de la matèria orgànica s'escapa de les capes superficials de forma més permanent, incorporant-se a les aigües profundes o, quan ho fa de forma particulada, fins i tot als sediments. A escales temporals de desenes i centenars de milers d'anys la disponibilitat i utilització d'aquests nutrients pot modular el clima de la Terra. Els canvis en l'aportació de nutrients des dels continents i els canvis en la intensitat de la circulació profunda poden incidir fortament en els nivells de producció primària i en la quantitat de diòxid de carboni disponible a la atmosfera. En el cicle llarg de formació d'aigües profundes i cel·les de recirculació meridional tenim la interacció entre el sistema circulatori i un sistema digestiu que regula les aportacions de nutrients al sistema.

Ja per acabar cal destacar l'estabilitat dels sistemes físic i biològic dels oceans, molt per sobre de la dels sistemes terrestres. Això es deu a la seva superior capacitat de regulació tèrmica i nutritiva. En particular, disposa de grans reserves de nutrients, dels quals es poden disposar en temps relativament curts (centenars d'anys), però també hi ha la possibilitat que els nutrients recirculin varies vegades abans de ser utilitzats. Es tracta d'un sistema que s'acobla amb l'atmosfera de forma activa però que al mateix temps té una memòria que li dóna gran capacitat reguladora.

Conclusions

Els grans corrents oceànics, com ara el Corrent del Golf, són veritables artèries pulmonars que mantenen l'alta productivitat de les capes oceàniques superficials del nostre planeta. Les grans masses forestals i els girs subpolars dels oceans fan el paper de pulmons planetaris

terrestres, llocs d'intercanvi entre biosfera/hidrosfera i l'atmosfera. La circulació termoclina, amb processos de remineralització que ràpidament recuperen uns nivells alts de nutrients, sustenta el cicle estacional de producció, i per tant d'oxigenació i reducció del diòxid de carboni. La circulació profunda controla l'energia interna de la biosfera i conforma un autèntic sistema nutritiu, capaç de regular els nivells de nutrients en superfície a escales de milers d'anys. Els sistemes fisiològics de la terra són realment complexos i fascinants. Les semblances existents entre aquests sistemes naturals i els sistemes fisiològics d'organismes superiors suggereix que l'estudi d'una d'aquestes disciplines es pot beneficiar dels coneixements que es tinguin de l'altra.

Agraïments

L'embrió de les idees aquí discutides va sorgir de converses mantingudes, quinze anys enera, amb el Professor Gabriel T. Csanady. Vull agrair també a la Mònica García, Celia Marrasé i Montserrat Pelegrí per diversos suggeriments. Aquest estudi ha estat parcialment finançat per l'Unió Europea, a través del projecte OASIS (EVK3-CT-2002-00073).



Josep Lluís Pelegrí Llopert és investigador de l'Institut de Ciències del Mar (CMIMA-CSIC) a Barcelona. Es va llicenciar en Ciències Físiques a Veneçuela, on va treballar durant vuit anys en els grups d'exploració costanera de la indústria petrolera. Va fer el doctorat en Oceanografia a Virgínia, als

Estats Units, d'on va anar a la Universitat de Las Palmas de Gran Canaria. Allí va estar-hi onze anys com a professor de la Llicenciatura de Ciències del Mar i del programa de doctorat en Oceanografia, i els últims anys com degà de la Facultat de Ciències del Mar. Ha fet diverses estades com investigador visitant a l'estranger (Gales, Oregon, Wisconsin). S'ha especialitzat en la circulació de l'oceà Atlàntic Nord i en els processos de barreja oceànics.

Referències

- Jenkins, W. J., i Doney, S. C. (2003). The subtropical nutrient spiral. *Global Biogeochemical Cycles*. 17 (4): 1110.
- Lovelock, J. E. (1972). Gaia as seen through the atmosphere. *Atmospheric Environment* 6: 579-580.
- Lovelock, J. E. (1979). *Gaia: a New Look at Life on Earth*, Oxford University Press, Oxford.
- Lovelock, J. E., i Margulis, L. (1974). Atmospheric homeostasis by and for the biosphere: the Gaia hypothesis, *Tellus*. 26: 1-10.
- Lozier, M. S., Owens, W. B. i Curry, R. G. (1995). The climatology of the North Atlantic. *Progress in Oceanography*. 36: 1-44.
- Pelegrí, J. L. i Csanady, G. T. (1991). Nutrient transport and mixing in the Gulf Stream. *Journal of Geophysical Research*. 96: 2577-2583.
- Pelegrí, J. L. Csanady, G. T. i Martins, A. (1996). The North Atlantic nutrient stream. *Journal of Oceanography*. 52: 275-299.
- Pelegrí, J. L. i Marrero-Díaz, A. (2005). Nutrient irrigation in the North Atlantic. *Progress in Oceanography, sub judice*.
- Williams, R. G. i Follows, M. J. (2003). Physical transport of nutrients and the maintenance of biological production. In *Ocean Biogeochemistry: the role of the ocean carbon cycle in global change*. Fashan, M., ed., Springer: 19-51.