

Corrents i ecosistemes oceànics com a subsistemes d'un organisme planetari

Josep L. Pelegrí

Departament d'Oceanografia Física i Tecnològica, Institut de Ciències del Mar, CSIC.

Correspondència: Josep Lluís Pelegrí. Institut de Ciències del Mar (ICM-CSIC), Pg. Marítim de la Barceloneta, 37-49, Barcelona 08003. Adreça electrònica: pelegri@icm.csic.es.

DOI: 10.2436/20.1501.02.181

ISSN (ed. impresa): 0212-3037

ISSN (ed. digital): 2013-9802

<http://revistes.iec.cat/index.php/TSCB>

Rebut: 21/01/2018

Acceptat: 19/04/2018

Resum

Els oceans són origen i instrument per a la vida del planeta que, paradoxalment, anomenem Terra. Els oceans guarden la major part de l'aigua i altres propietats que flueixen en el cicle de la vida, totes elles condicionades per l'energia que ens ve del Sol. Aquesta insolació arriba a les aigües superficials en funció de la latitud i el temps, i s'incorpora i distribueix pels oceans en forma de calor i energia mecànica i química. Durant els processos d'incorporació i transformació, es defineixen les condicions termodinàmiques i dinàmiques dels hàbitats regionals, que donen peu a característiques biogeoquímiques i comunitats pròpies, i són els corrents oceànics els que, amb tot un ventall de patrons temporals i d'estructures espacials, conformen un sistema circulatori anàleg al d'altres éssers vius. S'estableix una xarxa complexa de subsistemes amb tasques complementàries: sorgeix el gran organisme planetari!

Ocean ecosystems and currents as subsystems of a planetary organism

Abstract

The oceans are origin and instrument for the life of a planet that, paradoxically, we call Earth. The oceans keep most of the water and other properties that flow in the cycle of life, all of them conditioned by the energy that comes from the Sun. This insolation reaches the surface waters according to latitude and time, and it is incorporated and distributed through the oceans as heat and mechanical and chemical energy. During the processes of incorporation and transformation, the thermodynamic and dynamic conditions of the regional habitats are defined, which give rise to biogeochemical properties and typical communities, and the ocean currents, with a broad range of temporal patterns and spatial structures, shape a circulatory system analogous to other living organisms. A complex network of subsystems with complementary tasks is established: the great planetary organism emerges!

Una perspectiva planetària

L'objectiu d'aquest assaig és plantejar la conveniència de veure els diferents ambients marins com un tot, connectat i diferenciat alhora, de la mateixa manera que podríem observar el sistema circulatori d'un ésser viu. Es tracta d'una perspectiva molt personal que crec que pot obrir sinergies sorprenents i, alhora, enriquidores —només imagineu-vos un oceanògraf com ara jo pensant en termes del sistema circulatori d'un artròpode o un especialista en fisiologia de les plantes fent servir la Terra com a model. Ara bé, entenc que és un punt de vista que pot ser polèmic, i és per això que dedico les dues primeres seccions d'aquest assaig a exposar els avantatges i, fins i tot, la necessitat d'aquesta aproximació.

La nostra concepció de la Terra està necessàriament limitada per la nostra quotidianitat, tant des de la percepció diària de l'espai i el temps on ens movem com des de la visió utilitària que el món globalitzat ens ofereix del planeta. El flux d'informació que rebem no para

de créixer i això ens porta a una sensació d'objectivitat, però res és més lluny de la realitat! La nostra percepció del món és el resultat, d'una banda, de les limitacions temporals dels nostres sentits i, de l'altra, de la fragmentada memòria conscient i inconscient que tenim de les nostres vivències.

El principal condicionant de la nostra experiència personal diària ve donat per la nostra percepció de la realitat, que es desenvolupa principalment en aquells rangs on els estímuls són més forts. La visió n'és potser el millor exemple, un sentit optimitzat en la banda més intensa de l'espectre electromagnètic que ens arriba del Sol, però que revela la nostra incapacitat de percebre (si més no de manera conscient) altres senyals electromagnètics més febles. Aquest biaix s'ha reduït, però no eliminat, mercès al desenvolupament d'instruments que capten altres freqüències de les formes conegudes d'energia. Ara bé, la nostra individualitat també és, en gran mesura, funció de les nostres escales espaciotemporals. Per exemple,

fem servir el metre i el segon, similars a la llargada i el temps de batec d'un cos humà, com les unitats fonamentals de mesura. La nostra capacitat objectiva de mesurar l'espai i el temps —la memòria del nostre entorn— és realment restringida. Si calculéssim l'autocorrelació temporal de les nostres opinions i sentiments veuríem que, en la gran majoria dels casos, hi ha una escala probablement de l'ordre d'uns pocs anys. De la mateixa manera, la correlació espacial de les opinions de la gent segurament és de l'ordre de centenars de quilòmetres.

Aquestes limitacions condueixen a una forta consciència d'identitat personal, que comporta un gran fre a la nostra capacitat de pensar i imaginar la Terra. El món que ens imaginem no és pas el resultat d'una observació objectiva, sinó l'imaginari d'una llarga història d'experiències individuals i col·lectives, reforçada encara més per la subjectivitat que sorgeix de veure'ns com a raça dominant del planeta, al bell mig de tot el que és viu. Proba-

blement, d'aquí surt el nostre biaix a imaginar els sistemes complexos més petits com a organismes vius i, en canvi, a veure els sistemes més grans com una xarxa d'interaccions entre organismes i el seu ambient, el que anomenem ecosistemes. Per què aquesta interpretació tan diferent de dos sistemes complexos?

Solem identificar aquells sistemes tancats (que no vol dir autosuficients o aïllats) amb individus, mentre que aquells que no tenen uns límits físics precisos es converteixen en sistemes; és una distinció subtil i, possiblement, subjectiva. Crida l'atenció veure que els humans som al mig de l'espectre de distàncies que caracteritza allò que és viu. Els microorganismes unicel·lulars més petits són bacteris de l'ordre de $0,5 \mu\text{m} = 5 \times 10^{-7} \text{m}$ (un glòbul humà roig és 10 vegades més gran, $8 \mu\text{m}$), precisament la longitud de les ones electromagnètiques en la banda visible o el límit del que podríem apreciar amb un microscopi òptic. A l'altre extrem de l'espectre trobem la biosfera, que inclou les capes més superficials de la litosfera, la hidrosfera i l'atmosfera, amb una llargada màxima igual a la circumferència equatorial del planeta, $4 \times 10^7 \text{m}$. No obstant això, la nostra interpretació d'una microalga o d'un ecosistema marí com a organismes vius, certament, no és equidistant. El que possiblement ens hauríem de preguntar és si els grans ecosistemes, i la Terra tota, tenen les mateixes propietats principals que qualsevol altre organisme: un sistema que s'autoorganitza mantingut per fluxos externs de massa, energia i entropia (Miller, 1978). Potser tot és una qüestió de perspectiva, potser és qüestió de fugir de la nostra tendència a associar individu amb organisme.

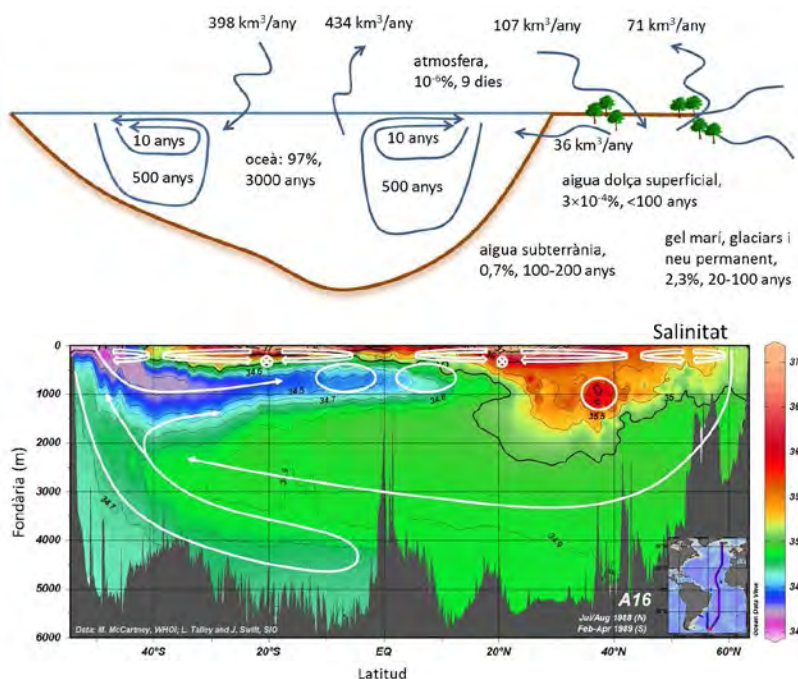
La idea de veure la Terra com un gran organisme no és pas nova. El geòleg James Hutton, a finals del segle XVIII (Hutton, 1788), Vladimir Verdnasky i altres científics russos (Verdnasky, 1945; Lapenis 2002), entre finals del segle XIX i començaments del XX, i el biofísic Alfred Lotka, també a inicis del segle XX (Lotka, 1925), van defensar la idea que la biosfera evoluciona, mitjançant mecanismes de selecció biogeoquímica, cap a un estat que podríem denominar més optimitzat: major productivitat, diversitat i connectivitat. Més recentment, a partir del 1970, aquestes idees han rebut el suport de James Lovelock i Lynn Margulis, amb la proposta de la hipòtesi Gaia, en què la Terra es veu com un sistema viu i auto-regulat, de manera que les condicions ambientals són les més adequades per a la pervivència

del sistema (Lovelock 1972, 1979; Lovelock and Margulis, 1973).

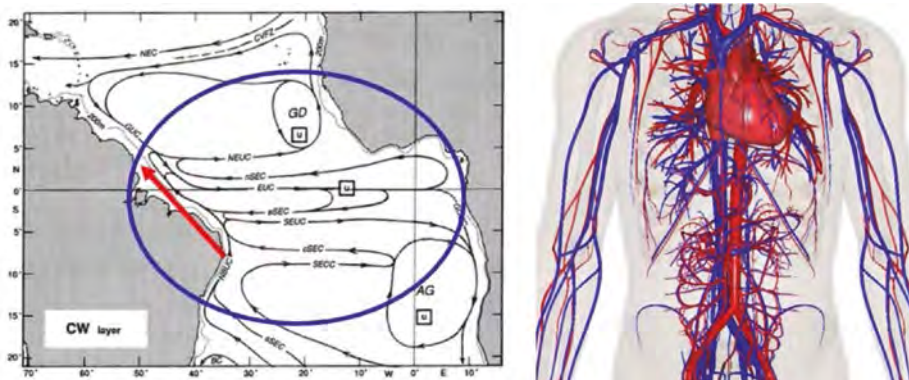
Malgrat aquests precedents d'anàlisi dels mecanismes autoregulators a gran escala i el reconeixement d'una nova disciplina que estudia les interaccions entre tots els subsistemes terrestres —les ciències del sistema Terra—, sembla clar que la nostra perspectiva antropocèntrica ens allunya de l'objectivitat. En aquest assaig, a partir de la meua experiència com a oceanògraf que ha estudiat l'oceà a moltes escales espacials i temporals, donaré suport a la idea que cal mirar el nostre planeta amb nous ulls. Fent servir el sistema cardiovascular d'un organisme com a referència, us parlaré del sistema circulatori del nostre planeta, dels seus circuits pulmonar i sistèmic, dels mecanismes que mantenen la circulació durant les fases de sistoles i diàstoles i, sobretot, de com els ecosistemes marins regionals juguen el paper de subsistemes, amb tasques específiques i complementàries que configuren el gran organisme planetari.

El sistema circulatori del nostre planeta

Els oceans tenen les funcions del sistema circulatori d'un planeta viu: (i) són el reservori d'aigua, d'energia (tèrmica i química) i de les propietats biogeoquímiques que mantenen el sistema en un estat d'equilibri, i (ii) distribueixen aquesta energia i aquestes propietats a les capes superficials, els òrgans productius que sustenten l'activitat metabòlica del sistema. És important tenir en compte que encara que la producció primària als continents és d'aproximadament el 54% del total (Field *et al.*, 1998), aquesta desapareixeria ben aviat sense els oceans: l'aigua evaporada dels oceans proporciona el 34% de la precipitació (aigua líquida i en forma de neu) que cau sobre la Terra (UCAR, 2017) (Figura. 1). Com que la quantitat d'aigua acumulada als rius, llacs i capes superficials dels continents és molt limitada, amb un temps de residència de l'ordre de 100 anys, el transvasament d'aigua des dels oceans (evaporació) fins als continents (precipitació) és indispensable per mantenir la producció primària dels continents.



↑ Figura 1. (Superior) Fracció d'aigua (%) i temps de residència (anys) en els diferents compartiments de la Terra, així com els fluxos (km^3/any) més rellevants entre aquests compartiments. El volum total d'aigua al planeta és d'uns $1,4 \times 10^9 \text{km}^3$. (Inferior) Distribució de la salinitat a l'oceà Atlàntic, en funció de profunditat i latitud, al llarg del traçat que es mostra al requadre interior (WOCE-ATLAS, 2017). Les condicions atmosfèriques són les que determinen la salinitat de cada massa d'aigua en origen, prop de la superfície dels oceans: les línies dobles il·lustren el circuit pulmonar (termoclí, amb un origen relativament proper) i les línies senzilles figuren part del llarg circuit sistèmic (circulació global profunda).



† Figura 2. (Esquerra) Esquema dels principals corrents de termoclines (CW: aigües centrals) de l'oceà Atlàntic equatorial i tropical, on es destaca l'estructura de tipus branca: un gran corrent latitudinal es ramifica en nombrosos corrents zonals. Les sigles indiquen els acrònims dels principals corrents, amb el Corrent del Nord del Brasil (NBC), que transporta aigua, calor i altres propietats des de l'hemisferi sud cap a l'hemisferi nord; ara bé, la connexió no és directa: les aigües recirculen per l'oceà interior gràcies a corrents zonals, de manera que retornen escalfades i carregades de nutrients. Adaptat de Stramma i Schott (1999). (Dreta) Vista estàtica del cor, amb les artèries (vermell) i venes (blau). Del cor surten grans artèries que es divideixen en artèries de menor mida per tal d'irrigar eficaçment els òrgans, per després retornar al cor com a venes que, progressivament, augmenten de mida; reproduït de BodyParts3D (2014).

La circulació oceànica manté nombroses similituds amb el sistema cardiovascular dels vertebrats (Figura 2). Igual que qualsevol ésser viu amb sistema circulatori, l'oceà té un motor principal que impulsa la circulació, un cor oceànic que es troba a les altes latituds de l'oceà Atlàntic Nord i al voltant del continent Antàrtic. La sistole oceànica resulta d'un augment de la pressió mitjançant el refredament-salinització i acumulació de l'aigua superficial pels vents, que emula l'augment de la pressió intraventricular del cor d'un mamífer. En contrast, la diàstole oceànica s'estén al llarg de l'any, en què l'acció del vent permet que l'aigua profunda retorni a les capes superficials, l'equivalent dels mecanismes peristàtics que ajuden en la circulació de la sang en multitud d'éssers vius.

Durant unes poques setmanes de l'hivern, l'aigua superficial comença el seu trajecte en fondària, de forma anàloga al breu interval de sistoles que marca l'inici dels circuits pulmonar i sistèmic d'un vertebrat. El circuit pulmonar (termoclí) té lloc en els 1.000 m més superficials dels oceans, amb un recorregut relativament ràpid (d'anys a desenes d'anys) caracteritzat per l'intercanvi de propietats amb l'atmosfera. El circuit sistèmic (circulació global profunda) s'estén pel fons de totes les conques molt més lentament (de centenars a mi-

lars d'anys) i té la funció de suplir les aigües superficials de nous nutrients (Pelegrí, 2008). Això, combinat amb el fet que sols una petita fracció de les aigües superficials s'evapora, fa que el temps de residència de l'aigua als oceans sigui molt més llarg que el temps que passa a fora: uns 3.000 anys, mentre que als continents és d'un centenar d'anys i a l'atmosfera és d'uns nou dies (Figura 1).

Si bé la circulació oceànica té certes similituds amb el sistema circulatori tancat d'animals vertebrats, és innegable que als oceans no hi ha conductes confinats: ¿podríem dir que és similar al sistema circulatori obert dels artròpodes? Aquests invertebrats tenen un cor principal (i sovint altres de secundaris) que impulsa el fluid sanguini (hemolimfa) a través d'unes artèries principals (sistema vascular) fins a un espai obert (sistema lacunar). Aquí no hi ha venes que retornin la sang al cor principal, de manera que va directament des del sistema lacunar fins al cor principal, usualment a través d'una cavitat (sinus) que fa el paper de l'aurícula dels vertebrats (Wirkner *et al.*, 2013).

El fet que un ésser viu tingui un sistema circulatori obert o tancat està molt determinat per la seva capacitat de construir estructures biològiques, però també té a veure amb la seva mida i amb l'eficiència relativa dels processos

advectius i difusius: com més augmenta la mida de l'individu, més necessaris són els corrents (advecció) per distribuir ràpidament les propietats a tot el sistema (Bejan i Lorente, 2010). Podríem, doncs, pensar en el sistema circulatori de la Terra com a quelcom entre tancat i obert, un sistema mixt on tant l'advecció com la difusió són necessàries.

Probablement l'aspecte més important de tot el sistema de corrents és que recurrentment apropa l'aigua a la superfície dels oceans, que és on es manté la funció vital del sistema: la transformació de l'energia solar en energia química, emmagatzemada com a matèria orgànica, disponible per ser oxidada i proporcionar de nou els nutrients inorgànics necessaris perquè recomenci el procés (Figura 3). Es tracta d'un meravellós sistema, en equilibri homeostàtic, que només requereix la contínua entrada d'energia solar. El seu element central és una xarxa planetària de corrents, que distribueix la matèria orgànica i els nutrients inorgànics sobre distàncies transoceàniques, gairebé com si es tractés de les artèries d'un organisme superior (Pelegrí i Csanady, 1991; Pelegrí *et al.*, 1996, 2006, 2019).

La quantitat de carboni i nutrients inorgànics que arriba a la superfície no és constant, varia substancialment en períodes glacials-interglacials (uns 100.000 anys). Això fa que la Terra oscil·li entre períodes de baixa i elevada activitat metabòlica: durant els períodes glacials el sistema entra en una fase basal, on la producció primària es redueix però excedeix a la respiració, de manera que s'emmagatzema matèria orgànica (energia química); durant els períodes interglacials el sistema entra en una fase més activa, en què la producció primària augmenta inicialment gràcies a l'energia química emmagatzemada (fruit de la remineralització de matèria orgànica dissolta) al mateix temps que augmenta l'arribada d'aigües fondes carregades de nous nutrients. És l'equivalent d'un organisme que oscil·la entre períodes d'exercici, en què inicialment es fa servir l'energia química emmagatzemada mentre progressivament s'incrementa la taxa de subministrament de nutrients i oxigen als òrgans (el carboni inorgànic substituiria l'oxigen si es tractés d'un organisme heterotròfic), i períodes basals o de recuperació, en què el requeriment energètic disminueix notablement i es recuperen els nivells d'energia en reserva (Pelegrí, 2008; Pelegrí *et al.*, 2013). Obviant el recent efecte antropogènic, els canvis temporals en el diòxid de carboni a l'atmosfera són ma-

jorment el resultat de variacions en aquesta taxa de subministrament, amb un patró tipus dents de serra (anomenat oscil·lador-relaxador) que és el mateix que caracteritza molts sistemes complexos.

Masses d'aigua

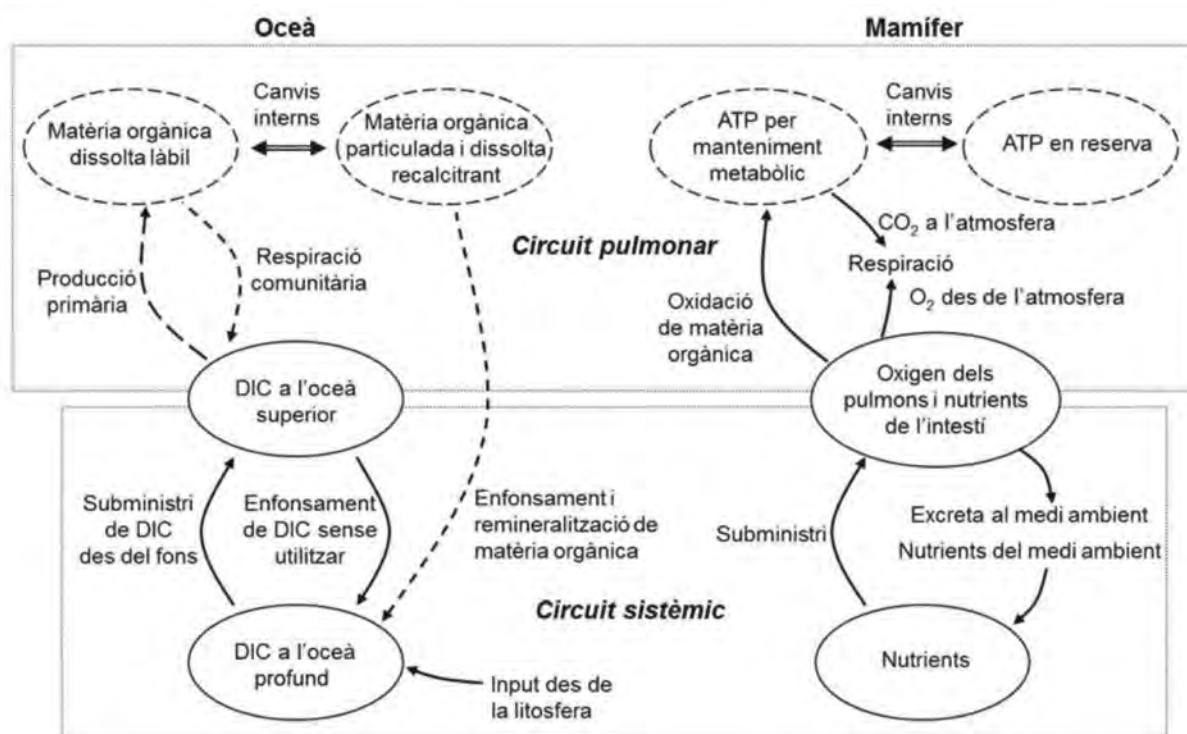
De la mateixa manera que la sang canvia de composició a mesura que transita pel sistema circulatori d'un organisme viu, les aigües de l'oceà també mostren importants canvis espacials. Aquestes variacions tenen dues fonts: (i) les característiques físiques i biogeoquímiques en aquells llocs on les aigües es formen, i (ii) el temps que aquestes aigües viatgen lluny de l'atmosfera (De La Fuente *et al.*, 2014, 2017).

Durant el temps que estan en contacte amb l'atmosfera, i com a resultat de processos físics i biològics, les aigües modifiquen la seva temperatura, salinitat i concentracions de nutrients inorgànics i matèria orgànica (Figura 4). Ara bé, les aigües que escapen de la superfície oceànica i van omplint l'interior de l'oceà només ho fan durant l'hivern, en un interval

d'unes poques setmanes. Això fa que aquestes aigües s'enduguin una informació molt concreta del moment i el lloc on s'enfonsen —és el que anomenem aigües tipus o masses d'aigua— i que permet identificar-les a mesura que es propaguen envers altres regions. Aquesta informació inclou la temperatura i salinitat hivernal (que reflecteix els fluxos de calor i les taxes de precipitació i evaporació), els nutrients inorgànics (que resulten de l'arribada d'aigües subsuperficials carregades de nutrients), i la matèria orgànica (produïda localment entre la primavera i la tardor). Així, per exemple, en els grans girs anticiclònics dels oceans, on hi ha molt poca producció primària i l'evaporació excedeix la precipitació, trobem aigües riques en oxigen, molt pobres en nutrients inorgànics i relativament salades —com les formades al centre de l'oceà Atlàntic Nord, anomenades Aigües Centrals de l'Atlàntic Nord—, i en aquelles regions on els vents porten aigües profundes cap a la superfície hi trobem concentracions elevades de nutrients i baixes en oxigen —com les Aigües Antàrtiques

Intermèdies que es troben a l'oceà Antàrtic— (Talley, 2011).

Un cop les aigües han adquirit les seves característiques i s'allunyen de la superfície comencen a modificar-se per processos de barreja i transformacions biogeoquímiques. La salinitat i la temperatura, que són propietats físiques conservatives, ja no canviaran perquè no hi ha guanys i/o pèrdues significatives de sal i energia tèrmica; tot el que hi haurà seran processos de dilució per mescla amb aigües d'altres orígens. L'oxigen i els nutrients orgànics i inorgànics, en canvi, sí que s'aniran modificant com a resultat de processos biogeoquímics. La matèria orgànica dissolta que trobem cada hivern a les aigües superficials de les altes latituds de l'oceà Atlàntic Nord, després de mesos d'elevada producció primària, s'oxidarà a mesura que fa el seu recorregut subsuperficial, de manera que disminuirà la concentració d'oxigen i augmentarà la de nutrients inorgànics (Pelegrí *et al.*, 2006, 2019).



† Figura 3. Esquema dels reservoris (el·lipses) i fluxos (fletxes) d'energia per a l'oceà (esquerra) i els mamífers (dreta), emfatitzant les analogies en els patrons de transformació. A l'oceà, l'energia solar s'incorpora com a energia química, mitjançant la transformació del carboni i nutrients inorgànics (expressats en termes de carboni inorgànic dissolt, DIC) en matèria orgànica; als mamífers, l'energia (expressada com a trifosfat d'adenosina, ATP) es produeix mitjançant la respiració cel·lular de productes orgànics. Adaptat de Pelegrí (2008).

Aquests canvis de la composició de les aigües marines, en origen i al llarg del seu recorregut, són anàlegs als canvis en la composició de la sang a mesura que aquesta interacciona amb diferents òrgans, cosa que suggereix de nou que la circulació oceànica té un rol similar al de la circulació sanguínia als éssers vius. Als artròpodes, on no existeix cap diferència entre els sistemes circulatori i limfàtic, hi ha un únic fluid (hemolimfa) format per aigua, nutrients inorgànics i composts orgànics, incloses cèl·lules vives que tenen tasques immunitàries; malgrat l'absència de conductes completament tancats, aquestes propietats varien notablement d'un lloc a l'altre de la cavitat o cavitats (hemocoel) per on circula (Wirkner *et al.*, 2013). La relació entre variabilitat i funcionalitat és també molt clara en éssers complexos que tenen un sistema cardiovascular, com ara els mamífers (Campbell, 1990; Randall *et al.*, 2002): els nutrients orgànics augmenten en passar a prop del tracte digestiu i disminueixen després de passar pel fetge; els residus metabòlics (v. gr. nitrogen) augmenten al fetge i disminueixen després de passar pel ronyó; l'oxigen augmenta i el diòxid de carboni disminueix als pulmons i al revés en qualsevol altre òrgan. El canvi més important, possiblement, té lloc al fluid que deixa les artèries i que, en forma de fluid intersticial, retorna al cor via el sistema limfàtic (uns 3 dels 20 litres de sang que diàriament s'incorporen als teixits des del torrent sanguini): es tracta de la limfa, que no té cèl·lules vermelles però que, en canvi, té una elevada concentració de cèl·lules blanques (limfòcits).

Una diferència entre el sistema circulatori dels oceans i els éssers vius és que el primer està caracteritzat per l'abundància d'organismes de tota mena, mentre que el segon normalment se'l considera estèril. Encara que puntualment poden haver-hi infeccions, en un ésser viu sa el sistema circulatori no té organismes externs, de fet, hi ha tota una bateria de defenses perquè sigui així. En canvi, sí que és cert que hi ha una multitud de components —cèl·lules vives i no vives— que són els blocs fonamentals de tot el sistema.

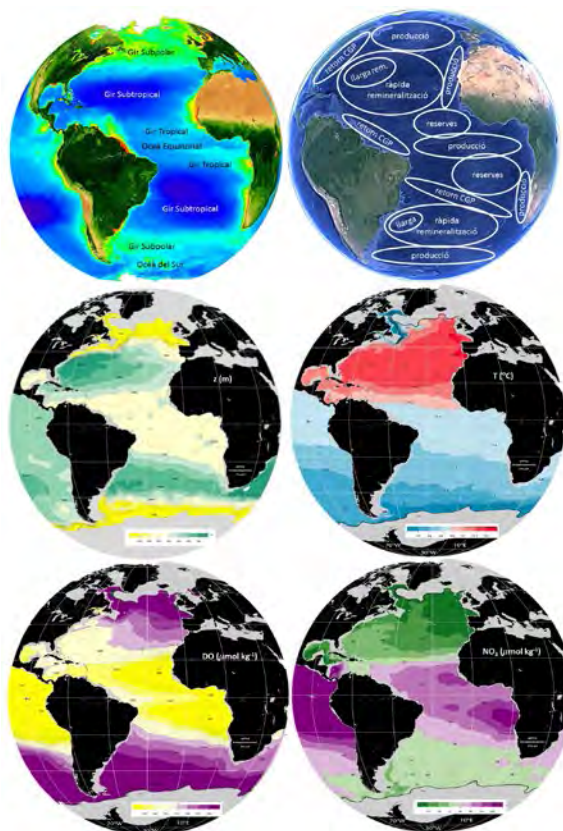
Corrents i turbulència

Els corrents oceànics tenen un altre paper fonamental en el sistema Terra: distribuir l'energia solar, la font de tot el que es mou a la Terra, animat o inanimat. Aquesta energia ens arriba de manera variable, en funció de la posició i del temps, amb valors mitjans diaris que van des de 0 fins a 433 watts per metre quadrat ($W m^{-2}$). En l'absència d'atmosfera i oceans, la

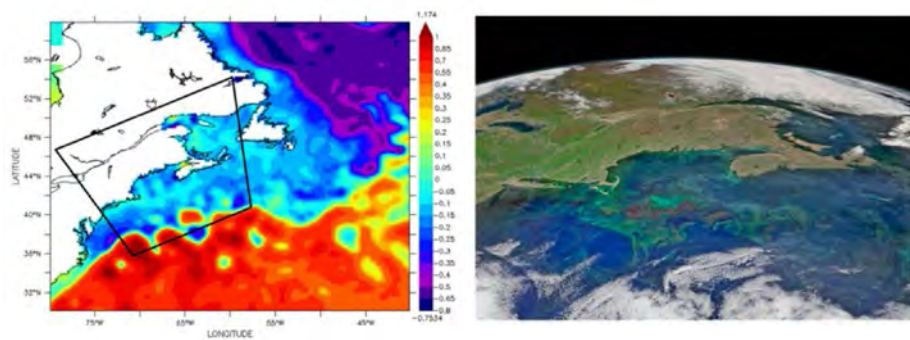
distribució de calor només pot ocórrer per conducció a la litosfera. Ara bé, aquests fluxos de calor són molt dèbils —els 10 metres més superficials de tota la litosfera només podrien transferir uns 10^4 watts—, de manera que tindriem gradients tèrmics latitudinals molt intensos, com ara els que s'observen a Mart o Venus. Més encara, si tinguéssim els oceans i atmosfera actuals però sense vents i corrents, els gradients tèrmics es mantindrien molt elevats —en aquest cas el flux latitudinal de calor per difusió molecular dins dels oceans fora de l'ordre de 10^6 watts.

Per assolir els aproximadament 5 PW ($1 PW \equiv 10^{15}$ watts) de flux latitudinal màxim d'energia que hi ha a la Terra, és necessària l'aparició dels corrents oceànics i els vents atmosfèrics (Wunsch, 2005). Una peculiaritat

d'aquests vents i corrents és la seva turbulència, caracteritzada per pertorbacions (altes i baixes de pressió) que es desplacen a llargues distàncies, en ocasions creuant tot l'oceà. En el cas dels oceans, els remolins tenen escales temporals i espacials que van des de centenars de quilòmetres fins a només uns mil·límetres, i des d'anys fins a fraccions de segons (Figura 5). És el que s'anomena la cascada d'energia, que distribueix arreu l'energia mecànica: l'energia entra a l'oceà a escales transoceàniques, principalment gràcies al treball fet pels vents superficials i, mitjançant el progressiu fraccionament en remolins cada vegada més petits, arriba a escales de centímetres i fins i tot mil·límetres (l'escala de Kolmogorov), en què eventualment es dissipa en forma de calor.



↑ Figura 4. Distribució de propietats a l'oceà Atlàntic. (Superior-esquerra) Imatge superficial de clorofil·la ($mg m^{-3}$) a la primavera boreal, obtinguda a partir de la banda visible del satèl·lit SeaWiFS de la NASA (NASA, 2017), i (superior-dreta) localització esquemàtica dels subsistemes de l'oceà Atlàntic termoclí, indicant alguna de les seves funcions principals i la ruta de retorn de la circulació global profunda (CGP). Distribucions climatològiques, sobre la isoneutra de $27,22 kg m^{-3}$, de (centre-esquerra) fondària (m), (centre-dreta) temperatura ($^{\circ}C$), (inferior-esquerra) concentració d'oxigen dissolt ($mmol kg^{-1}$) i (inferior-dreta) concentració de nitrats ($\mu mol kg^{-1}$) (WOCE-ATLAS, 2017); la isoneutra arriba a la superfície del mar a les altes latituds de tots dos hemisferis, marcat amb una línia negra on comença el color gris. La combinació de propietats varia d'una gran regió oceànica a una altra, i il·lustra com cadascuna d'elles té un paper diferent —es converteix en un subsistema o òrgan específic— en l'organisme planetari.



↑ Figura 5. Condicions a la superfície de l'oceà Atlàntic nord-oest, on el Corrent del Golf se separa de la costa entre el cap Hatteras i els Grans Bancs, el 14 de maig del 2015. (Esquerra) Altura dinàmica del nivell del mar (m), produïda amb dades de Collecte Localisation Satellites (AVISO, 2017). El mapa il·lustra el fort desnivell a la regió frontal entre el Corrent del Golf al sud (aigües centrals de l'Atlàntic, valors alts de color vermell) i la regió de la plataforma al nord (aigües del talús amb una forta contribució continental i del Corrent del Labrador, valors baixos de color blau i lila). La regió frontal està associada a l'intens Corrent del Golf, dirigit d'oest a est, però alhora genera remolins càlids i freds que contribueixen a barrejar les aigües latitudinalment. (Dreta) Imatge de color de la superfície del mar, on es veu un detall de la regió entre l'est de cap Cod i el sud de Nova Escòcia (trapezi negre al panell de l'esquerra). Els remolins al nord del Corrent del Golf es fraccionen en estructures.

Si bé atmosfera i oceà contribueixen al flux latitudinal de calor —oceà i atmosfera comparteixen protagonisme a baixes latituds però l'atmosfera és l'actor principal a altes latituds— la quantitat de calor (energia tèrmica o interna) emmagatzemada als oceans és 3 ordres de magnitud superior a la que es troba a l'atmosfera. De fet, a la capa de mescla superficial dels oceans (amb fondàries típiques de 30-50 m) ja tenim unes 10 vegades més d'energia interna que en tota l'atmosfera. Així doncs, tot i que l'atmosfera ajuda a accelerar, i curtcircuita, les transferències de calor, el veritable mecanisme regulador és l'emmagatzemament d'energia interna als oceans, i són els corrents els que mouen aquestes fonts d'energia, regulant els gradients tèrmics a les capes baixes de l'atmosfera i, per tant, els vents superficials.

La forma en què les estructures oceàniques, i els corrents associats, es divideixen en escales més i més petites recorda el fraccionament del sistema cardiovascular dels organismes vertebrats: en ruta cap a tots els òrgans, les grans artèries que surten dels ventricles es divideixen en artèries cada vegada més petites —arterioles i capil·lars—, i ja de retorn cap al cor, les vènules i venes augmenten de mida fins a arribar a les aurícules (Figura 2). Les grans i petites artèries i venes són necessàries per aproximar-se a tots els òrgans del cos, però és als capil·lars on té lloc l'intercanvi de substàncies, a través del fluid intersticial que banya totes les cèl·lules. Recordem que als vertebrats

també hi ha un sistema limfàtic, encara que molt més limitat que el dels invertebrats, que retorna aquest fluid intersticial extracel·lular al torrent sanguini.

Si pensem en els corrents que resulten de la turbulència geofísica com l'equivalent del sistema d'artèries i venes, llavors podríem imaginar el fluid que es troba dins dels remolins més petits —que és el que realment submergeix tot el plàncton marí— com l'equivalent del fluid intersticial (hemolimfa als artròpodes). Tant en les cel·les d'un individu heterotròfic com en el microunivers dels remolins oceànics, l'arribada de nutrients i oxigen/carboni dependrà de l'estat metabòlic i de l'estructura en xarxa del sistema. Convé recalcar que tot aquest microplàncton viu la major part de la seva existència en un món no turbulent: un organisme planctònic de mida relativament gran (100 micres) dins d'un remolí d'1 cm viu en un «univers» 10^6 vegades més gran. De la mateixa manera que l'activitat metabòlica d'un ésser viu es produeix a les cèl·lules banyades pel fluid intersticial, és en aquest univers microplàncton on té lloc el gruix de la producció primària oceànica.

Fronts i ecosistemes

Potser un dels aspectes més sorprenents del moviment de les aigües als oceans és precisament la seva estructuració en corrents de diferents graus d'intensitat. Els més intensos els trobem als marges occidentals de tots els gran

oceans, usualment dirigit-se des de l'equador cap als pols, portadors de nutrients inorgànics i calor tropical vers latituds més altes. L'única excepció és l'oceà Atlàntic, on el Corrent del Nord del Brasil es dirigeix cap al nord per compensar la formació d'aigües fonses (l'inici de la circulació global profunda) que hi ha a les regions subpolars atlàntiques (Talley, 2013) (Figura 4). També hi ha corrents zonals força intensos al voltant del continent Antàrtic (Corrent Circumpolar Antàrtic), d'importància extraordinària, ja que connecta tots els oceans, i a les regions equatorials i tropicals. A l'Atlàntic tropical, per exemple, diversos corrents zonals transporten nutrients i calor des de l'oceà interior cap al Corrent del Nord del Brasil, que després s'exportaran a latituds més elevades (Rosell-Fieschi *et al.*, 2015) (Figura 2).

No obstant això, a la major part dels oceans hi ha corrents poc definits, on la variabilitat sol ser molt més gran que el flux mitjà. En aquestes regions pitjor connectades —se sol dir menys ventilades— el flux d'energia, oxigen i nutrients inorgànics està dominat per remolins de tots dos signes (ciclònics i anticiclònics); és el que anomenem difusió mesoescalar turbulenta. De vegades, però, hi ha regions on els processos físics i/o biogeoquímics locals són tan intensos que modifiquen les propietats de l'aigua de manera que ni tan sols la difusió és capaç d'apaivagar-ho. Un clar exemple d'això és la regió de transició tròpic-subtròpic dels marges orientals de tots els oceans, també anomenades regions d'ombra o zones de mínim d'oxigen. El règim de vents en aquestes regions ocasiona la pujada d'aigües subsuperficials, carregades de nutrients, cap a la superfície del mar (surgència o aflorament), la qual cosa ocasiona un augment de la producció primària. Això, combinat amb la feblesa dels corrents, ocasiona que l'aigua hi resti prou temps perquè la matèria orgànica es remineralitzi, desenvolupant condicions d'hipòxia però alhora constituint-se en una font contínua de nutrients inorgànics per a l'oceà superficial (Peña-Izquierdo *et al.*, 2015).

L'oceà no és, doncs, un medi on les propietats mostren transicions suaus, ans al contrari, els grans corrents oceànics defineixen les vies preferencials de connectivitat. Curiosament, això acostuma a passar entre aquelles regions on les aigües subsuperficials carregades de nutrients s'aproximen a la superfície del mar i les regions on aquests nutrients seran utilitzats per mantenir la producció primària. En contrast, el circuit de retorn des d'aquestes aigües productives superficials sol ser molt

més lent, sempre allunyat de la superfície i donant temps perquè la matèria orgànica s'oxidi i augmentin les concentracions de nutrients inorgànics abans que l'aigua retorni a la superfície.

Els grans corrents que produeixen les principals vies de connectivitat arreu de l'oceà (excepte molt a prop de l'equador) estan associats a regions frontals, on la densitat canvia ràpidament en el pla horitzontal. Aquestes estructures frontals es constitueixen, doncs, alhora en ruta i barrera: alberguen corrents que connecten regions distants, però també mantenen separades regions properes amb característiques físiques i biogeoquímiques molt desiguals. El que podria semblar un medi difús i continu es diferencia, s'hi delimiten rutes preferents i s'hi desenvolupen hàbitats regionals amb característiques molt distants. Malgrat la continuïtat del medi líquid, es creen sistemes que, com en qualsevol organisme, tenen papers específics destinats al sosteniment del sistema global.

La Terra, organisme planetari

La Terra és el millor exemple que tenim d'un sistema complex. La font d'energia està assegurada i té un sostrat físic que li proporciona tots els constituents necessaris. Tot el que necessita és un medi que estableixi connexions transoceàniques, un medi físic capaç de distribuir els blocs fonamentals per a la vida: matèria, energia i informació. Aquest medi és l'oceà, un sostrat en moviment on es produeixen els ritmes temporals i les estructures espacials necessàries per mantenir la vida a escala planetària.

El funcionament de la Terra és el resultat sorprenent de la combinació —la suma dels rols— de grans ecosistemes oceànics. Aquests són subsistemes de l'organisme planetari, que es desenvolupen en regions oceàniques amb característiques físiques molt particulars com a resultat del forçament extern; les retroalimentacions biològiques entre els subsistemes sens dubte existeixen, però segurament són molt més limitades que les interconnexions que tenen lloc mitjançant els grans corrents oceànics. Ara bé, la vida planctònica microscòpica que es desenvolupa dins de cadascuna d'aquestes regions oceàniques sí que tindrà propietats que responen a les característiques del medi físic, i configurarà un ecosistema regional amb característiques especials. La virtut del sistema planetari, la seva complexitat, rau en l'engranatge de totes aquestes regions, cadascuna amb un paper complementari, de tal manera que s'optimitza el funcionament conjunt del sistema.

Tots els organismes hem perviscut gràcies a la nostra capacitat d'adaptació sota constriccions termodinàmiques similars, evolucionant envers patrons espai-temporals que optimitzen el flux de propietats. El sistema Terra no n'és una excepció, existeix gràcies a la connectivitat dels oceans. Sens dubte, els patrons, i per tant el sistema, hauran evolucionat al llarg de la paleohistòria, adaptant-se als canvis tectònics i d'insolació, ajustant i modificant el rol de cadascun dels seus grans ecosistemes per tal d'assegurar la persistència homeostàtica del sistema global, sempre a prop d'un estat global

optimitzat. La humanitat té la capacitat —com si d'un gen mediambiental es tractés— de modificar el medi físic i, un cop més, els corrents i ecosistemes regionals es reajustaran per al benefici de l'organisme planetari, encara que segurament en detriment de la raça humana.

El dia que puguem escapar de la nostra consciència personal i siguem capaços de tenir una perspectiva planetària ens adonarem que l'oceà és l'organisme per excel·lència: el més complex, autosuficient i optimitzat que probablement podríem imaginar.

Agraïments

Les idees aquí presentades han sorgit al llarg de més d'una dècada de feina en el marc de nombrosos projectes finançats pel Plan Nacional de I+D (CANOA, referència CTM2005-00444/MAR; MOC2, referència CTM2008-06438-CO2; TIC-MOC, referència CTM2011-28867; VA-DE-RETRO, referència CTM2014-56987-P; SAGA, referència RTI2018-100844-B-C33) i pel CSIC (FISIO-CEAN, referència PIF2008-30F0061). Estic molt agraït a tots els meus companys i amics, que, amb la seva paciència i interès, m'han ajudat a anar-les desenvolupant. Vull també agrair els comentaris constructius de Mariona Segura, Òscar Guadayol i dos revisors més anònims. Dedico aquest treball al meu bon amic oceanògraf Pablo Sangrà, que segur que somriu veient els meus intents de copsar el que possiblement és inescrutable.

Bibliografia

- AVISO (2017). *AVISO Satellite Altimetry Data*. Collecte Localisation Satellites, <http://www.aviso.oceanobs.com/en/data/product-information/duacs> [últim accés: 20 març 2018].
- BEJAN, A.; LORENTE, S. (2010). The constructal law of design and evolution in nature. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.*, 365: 1335–1347.
- BodyParts3D (2014). *BodyParts3D* © The Database Center for Life Science licensed under CC Attribution-Share Alike 2.1 Japan, <http://lifesciencedb.jp/bp3d> [últim accés: 20 març 2018].
- CAMPBELL, N. E. (1990). *Biology*. 2a edició, Benjamin/Cummings, Redwood City, 930 pàg.
- DE LA FUENTE, P. [et al.] (2014). Does a general relationship exist between dissolved organic matter and microbial respiration? – The case of the dark equatorial Atlantic Ocean. *Deep-Sea Res. I*, 89: 44–55.
- DE LA FUENTE, P. [et al.] (2017). A simple nonlinear and endmember-free approach for obtaining ocean remineralization patterns. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, 34: 2443–2455.
- FIELD, C. B. [et al.] (1998). *Primary production of the Biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components*. *Sci.*, 281: 237–240.
- HUTTON, J. (1788). Theory of the Earth; or, an investigation of the laws observable in the composition, dissolution, and restoration of land upon the globe. *Roy. Soc. Edinburgh, Tr.* 1: 209–304.
- LAPENIS, A. G. (2002). Directed Evolution of the Biosphere: Biogeochemical Selection or Gaia? *Prof. Geog.*, 54: 379–391.
- LOTKA, A. J. (1925). *Elements of Physical Biology*. Williams and Wilkins, Baltimore, 460 pàg.
- LOVELOCK, J. E. (1972). Gaia as seen through the atmosphere. *Atmospheric Environ.*, 6: 579–580.
- LOVELOCK, J. E. (1979). *Gaia: a New Look at Life on Earth*. Oxford University Press, Oxford, 110 pàg.
- LOVELOCK, J. E.; MARGULIS L. (1974). Atmospheric homeostasis by and for the biosphere: the Gaia hypothesis. *Tellus*, 26: 2–10.
- MILLER, J. G. (1978). *Living Systems*. McGraw-Hill, New York, 1.102 pàg.
- NASA (2017). *Ocean Color Web*. National Aeronautics and Space Administration, <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/SeaWiFS> [últim accés: 20 març 2018].
- PELEGRÍ, J. L. (2008). A physiological approach to oceanic processes and glacial-interglacial changes in atmospheric CO₂. *Sci. Mar.*, 72: 185–202.
- PELEGRÍ, J. L.; CSANADY, G. T. (1991). Nutrient transport and mixing in the Gulf Stream. *J. Geophys. Res.*, 96, 2577–2583.
- Pelegrí, J. L. [et al.] (1996). The North Atlantic nutrient stream. *J. Oceanogr.*, 52: 275–299.
- PELEGRÍ, J. L. [et al.] (2006). Nutrient irrigation of the North Atlantic. *Progr. Oceanogr.*, 70: 366–406.
- PELEGRÍ, J. L. [et al.] (2013). Global constraints on net primary production and inorganic carbon supply during glacial and interglacial cycles. *Paleoceanogr.*, 28: 713–725.
- PELEGRÍ, J. L. [et al.] (2019). The Gulf Nutrient Stream. A: NAGAI, T., [et al.] (ed.), *Kuroshio Current: Physical, Biogeochemical and Ecosystem Dynamics*, capítol 3, 23–50, AGU-Wiley, Hoboken and Washington.
- PEÑA-IZQUIERDO, J. [et al.] (2015). Water mass pathways to the North Atlantic Oxygen Minimum Zone. *J. Geophys. Res. Oceans*, 120: 3350–3372.
- RANDALL, D. [et al.] (2002). *Eckert animal physiology: Mechanisms and adaptations*. 5a edició, W. H. Freeman, New York, 752 pàg.
- ROSELL-FIESCHI, M. [et al.] (2013). Zonal jets in the equatorial Atlantic Ocean. *Progr. Oceanogr.*, 130: 1–18.
- STRAMMA, L.; SCHOTT, F. (1999). The mean flow field of the tropical Atlantic Ocean. *Deep-Sea Res. II*, 46: 279–303.
- TALLEY, L. D. (2011). *Descriptive Physical Oceanography. An Introduction*. 6a edició, Academic Press, 560 pàg.
- TALLEY, L. D. (2013). Closure of the Global Overturning Circulation through the Indian, Pacific, and Southern Oceans: schematics and transports. *Oceanogr.*, 26: 80–97.
- UCAR (2017). *The water cycle*. University Corporation for Atmospheric Research Center for Science Education, <https://scied.ucar.edu/longcontent/water-cycle> [últim accés: 20 març 2018].
- VERDNASKY, V. (1945). The biosphere and the noosphere. *Amer. Sci.* 33: 1–12.
- WIRKNER, C. S. [et al.] (2013). The arthropod circulatory System. A: MINELLI, A., [et al.] (ed.), *Arthropod Biology and Evolution*, p. 343–391. Springer-Verlag, Berlin.
- WOCE-ATLAS (2017). *WOCE Atlas Hydrographic Program*. World Ocean Circulation Experiment, <http://woceatlas.ucsd.edu> [últim accés: 20 març 2018].
- WUNSCH, C. (2005). The total meridional heat flux and its oceanic and atmospheric partition. *J. Clim.*, 18: 4374–4380.