



LA MEMORIA OCEÁNICA DEL CLIMA

EL SISTEMA CIRCULATORIO DE UN PLANETA VIVO

JOSEP L. PELEGRÍ Y ALÍCIA DURÓ

A principios del siglo XVI Leonardo da Vinci comparaba las corrientes oceánicas con el flujo de sangre de un cuerpo humano. Actualmente disponemos de información suficiente para explorar la idea de que la Tierra posee un sistema circulatorio responsable de capturar, transformar y distribuir la energía solar. El papel de los océanos como reguladores del clima es extraordinario, realmente condicionan el presente y el futuro del planeta.

Palabras clave: circulación oceánica, cambio climático, oceanografía.

Hace unos quinientos años, a principios del siglo XVI, Leonardo da Vinci tuvo la intuición suficiente, y quizá incluso la imaginación, para comparar las corrientes oceánicas y el flujo de la sangre. Había estudiado la anatomía del cuerpo humano y sabía que el papel de las arterias y las venas es transportar sangre oxigenada y con nutrientes hacia todas las partes del cuerpo y convertirse en la fuente de energía para la vida. Pero Leonardo no tenía manera de saber que en los océanos hay corrientes capaces de hacer este papel global de transferencia de energía a nuestro planeta. ¡Es aquí donde encontramos su intuición de genio!

El cuerpo humano incorpora nutrientes y oxígeno del medio ambiente y los distribuye a todas las células del cuerpo mediante el sistema circulatorio. El diseño del cuerpo se ha optimizado, como fruto de la evolución de la especie, para aprovechar estos recursos externos de la mejor manera posible.

A la Tierra también le llega energía, una fuente prácticamente inagotable de radiación solar, y la Tierra, como sistema vivo, también ha evolucionado para aprovecharla de la mejor manera posible. Nos podemos preguntar: ¿dónde está la vida en la Tierra? La respuesta es clara: la mayor masa terrestre donde hay vida metabólicamente activa son los océanos, muy por encima de la litosfera, la atmósfera o la biosfera terrestre. Es necesario que la energía solar, bien en forma de calor o bien transformada de varias maneras (como en materia orgánica, producto de la fotosíntesis) pueda llegar a todas las partes del sistema marino. De la misma manera es necesario que los nutrientes lleguen a los lu-

gares donde se produce la transformación fotosintética. De todo eso se encargan las corrientes oceánicas que se constituyen como el eslabón fundamental para mantener el flujo de energía y de vida en nuestro planeta (Pelegrí, 2008).

Hoy en día, a diferencia del momento en que vivía Leonardo, ya tenemos bastantes datos para explorar más cuantitativamente si de verdad existe una analogía entre el flujo de las aguas en los océanos, como sistema circulatorio del sistema terrestre, y la sangre de las arterias y

las venas de un ser vivo superior. Y el resultado es que hay similitudes muy sorprendentes. Así como el flujo sanguíneo en los mamíferos empieza en el corazón, durante su fase de contracción (sístole), también todas las grandes corrientes oceánicas, exceptuando las más superficiales, tienen origen durante el invierno en las regiones más frías del planeta. La periodicidad básica de este sistema circulatorio terrestre, o sea, el tiempo que tarda

en latir, es de un año. Bien por el enfriamiento de las aguas superficiales que se vuelven más densas y empiezan su ruta por los fondos marinos o bien por la acción combinada de este enfriamiento y la acción del viento, las grandes corrientes inician la ruta océano adentro durante unas pocas semanas del invierno.

Y también, igual como los seres vivos superiores tienen dos circuitos bien diferenciados, también en el océano hay dos rutas bien definidas por las grandes corrientes oceánicas. En los mamíferos estos circuitos son el pulmonar y el sistémico, para el océano estas grandes rutas son la circulación termoclina y la circulación

**«LA MAYOR MASA
TERRESTRE DONDE HAY
VIDA METABÓLICAMENTE
ACTIVA SON LOS OCEANOS,
MUY POR ENCIMA DE LA
LITOSFERA, LA ATMÓSFERA
O LA BIOSFERA TERRESTRE.»**

LEONARDO Y LA CURIOSIDAD POR EL AGUA

Leonardo nació en 1452 en Vinci, una aldea de la región de Montalbano rodeada de viñas y de olivos, a medio camino entre Florencia y Pisa. Parecería un lugar alejado del mundo pero en realidad descansa en una de las principales vías de comunicación de Italia. Desde muy joven estuvo muy interesado en la comprensión de la naturaleza, tanto estética como conceptualmente (Pescio, 2001).

Leonardo es el primero en poner en práctica el método científico, buscaba leyes generales a partir de la experimentación (Pigem, 2009). Harald Höffding presenta su pensamiento como una mezcla de empirismo y naturalismo. Para Leonardo «la sabiduría es la hija de la experiencia» que es la única que permite verificar las intuiciones y teorías, ya que «la experiencia no engaña nunca; son los juicios que se equivocan prometiendo efectos que no son causados por las experimentaciones». Su visión de conjunto es una posible fuente de inspiración para los nuevos enfoques sistémicos y holísticos, tan actuales. Aún hoy en día maravilla su definición de la ciencia como la observación de todo lo que es posible («*notitia delle cose che sono possibili*»). Se dedica tanto a la observación rigurosa como al experimento y a la formulación exacta de principios generales a partir de la experiencia.

Hacia el año 1515 creó las series de dibujos de *Deluge* dentro de la colección de Windsor y del *Códice Atlanticus*, donde representaba fenómenos atmosféricos como las tormentas con rayos y truenos y los flujos de agua con remolinos. En su *Tratado del agua* hace consideraciones sobre la constitución del universo y una demostración sobre la analogía general de los humanos y del mundo. Leonardo quiere captar la esencia de los elementos básicos de la naturaleza (tierra, agua, aire, fuego) y comprender su función (Brion, 1998). Se pregunta de qué están hechos estos elementos, de qué manera su estructura determina su funcionamiento. En este caso el Leonardo científico examina las relaciones causa y efecto y piensa en leyes. ¿Cómo se organiza la naturaleza? ¿Qué relaciones existen? ¿Qué relaciones hay entre los elementos de la naturaleza que dan vida a la Tierra?

Leonardo no es solo un gran pensador sino también un extraordinario inventor. Parece que le sea fácil concebir el mundo elemental desde la observación de

los fenómenos. Los diferentes movimientos del agua, los remolinos, las olas, la lluvia... todo lo estudia con una amplitud de visión de conjunto al mismo tiempo que con una precisión detallista en la observación. Y como buen científico, cuando ya había captado todo lo que quería con su observación, lo tenía que contrastar con otras personas. Así pues, le gustaba conversar sobre su elemento favorito, el agua, para aprender algo más. Y como se puede contemplar en muchas de sus ilustraciones, todo lo que observa y estudia Leonardo toma forma de imagen. Sus observaciones sobre los flujos del agua o las turbulencias están reflejadas en muchos de sus dibujos.

Leonardo respeta el agua porque la considera «la sangre de la tierra». Su intuición de una unidad cósmica, conjuntamente con una predilección por las analogías, le lleva a esta semejanza entre el cuerpo humano y la Tierra: el primero es recorrido por el sistema sanguíneo, mientras que la segunda lo es por las corrientes oceánicas. Encontramos un ejemplo en algunos de sus cuadernos y fragmentos del *Tratado del agua*, donde se expresa esta idea: «Así como del estanque de sangre provienen las venas, cuyas ramas se extienden a través del cuerpo humano, así el océano llena el cuerpo de la tierra con un número infinito de venas acuosas...»

En la actualidad, gracias a la oceanografía física se estudian los movimientos de las aguas oceánicas y sus propiedades al mismo tiempo que se realizan modelos que prevén la posible evolución de los océanos y sus efectos sobre el clima terrestre. Es así como la tecnología y la instrumentación oceanográfica son nuestros pinces para dibujar los paisajes marinos y estudiar su comportamiento. Igual que Leonardo, solamente abriendo los ojos al planeta Tierra como conjunto, podremos conocerlo y convivir mejor. ☺

BIBLIOGRAFÍA

- BRION, M., 1998. «Leonardo da Vinci: Alabanza del agua». *Elementos*, 32: 7.
 PESCIO, CL., 2001. *Leonardo. Arte and Science*. Giunti Editore S.P.A. Florencia-Milán.
 PIGEM, J., 2009. «La ciencia de Leonardo da Vinci». *Métode*, 61: 16-19.

**«IGUAL QUE LEONARDO,
SOLAMENTE ABRIENDO
LOS OJOS AL PLANETA
TIERRA COMO CONJUNTO,
PODREMOS CONOCERLO Y
CONVIVIR MEJOR»**

ALÍCIA DURÓ y JOSEP L. PELEGRÍ



Al igual que los seres vivos, que tienen dos circuitos bien diferenciados, también en el océano las grandes corrientes tienen dos rutas bien definidas: la circulación meridional profunda y la circulación termoclina. El dibujo principal nos muestra un esquema de la circulación meridional profunda, que se inicia en los extremos norte y sur del Océano Atlántico y conecta las aguas profundas (líneas azules y verdes), intermedias (líneas naranjas y rojas) y superficiales (líneas púrpura) de todos los océanos.

La imagen insertada muestra el color superficial del Océano Atlántico Norte durante la primavera de 2003, tal como lo vio el sensor de satélite SeaWiFS, con un esquema de la circulación termoclina que arranca desde la superficie a altas latitudes, rodea la cuenca oceánica en profundidad, y acaba retornando a su lugar de origen; circuitos similares tienen lugar en todos los grandes océanos de la Tierra.

meridional profunda. El circuito pulmonar es relativamente rápido, en un hombre adulto tarda poco menos de un minuto, y es el responsable de llevar la sangre desde el ventrículo derecho hasta los pulmones, donde libera carbono y se oxigena, para acabar en la aurícula izquierda. Por contra, el circuito sistémico es mucho más lento, en un hombre adulto suele tardar de media unos cinco minutos; se inicia en el ventrículo izquierdo y después viaja por todo el cuerpo humano, llenándose de nutrientes en los intestinos y en el estómago y llevando a todos los músculos del cuerpo estos nutrientes junto al oxígeno, para acabar en la aurícula derecha. En el océano, el equivalente del circuito sistémico es la circulación meridional profunda, popularizada (Broecker, 1991) con el nombre de cinta transportadora global (del inglés *global conveyor belt*) para dar a entender que se trata de una cinta con dos poleas, pero donde solo una es activa, que transporta mate-

ria continuamente para volver siempre al mismo punto de partida. Se trata de un circuito relativamente largo y lento, que tardará cerca de 1.000 años en cerrarse, cuando las aguas retornen a las capas superficiales a través del océano Atlántico ecuatorial. Este circuito, alejado de la atmósfera, acaba devolviendo aguas del fondo oceánico, muy ricas en nutrientes inorgánicos, hasta las regiones superficiales. Por otra parte, el equivalente del circuito pulmonar es la circulación termoclina, donde las aguas recorren los mil metros más superficiales de las

regiones subtropicales en un tiempo relativamente corto, de «tan solo» unos diez años. Al empezar este circuito las aguas están cerca de la superficie, en contacto con la atmósfera, donde se cargan de materia orgánica y oxígeno, y es cuando se hunden cuando empiezan a utilizar este oxígeno para respirar la materia orgánica y transformarla en materia inorgánica. Así pues, cuando las aguas retornen a la su-

«ASÍ COMO EL FLUJO SANGUÍNEO EN LOS MAMÍFEROS EMPIEZA EN EL CORAZÓN, LAS GRANDES CORRIENTES OCEÁNICAS TIENEN ORIGEN DURANTE EL INVIERNO EN LAS REGIONES MÁS FRÍAS DEL PLANETA»

DETALLES DE LA CAMPAÑA OCEANOGRÁFICA

La campaña MOC2-Equatorial se llevó a cabo a bordo del barco oceanográfico *Hespérides* entre el 5 de abril y el 17 de mayo del año 2010, con 55 personas tripulantes y 34 investigadoras y técnicas. Esta campaña se enmarcaba dentro del proyecto *Memoria oceánica del clima*, desarrollado por personal investigador del Instituto de Ciencias del Mar entre el 2009 y el 2011. La ruta seguida fue desde la ciudad de Fortaleza (Brasil) hasta Mindelo (Cabo Verde). Durante 42 días se tomaron multitud de medidas oceanográficas interdisciplinarias en el Atlántico Ecuatorial en dos fases. La primera cubrió una región al norte de Brasil hasta 1,5°N y 32°W; la segunda constituyó una sección transatlántica a lo largo de 7,5°N, saliendo de Brasil y llegando a Sierra Leona. En total se hicieron 110 estaciones hidrográficas, donde además de estudios físicos se tomaron muestras de agua a 24 profundidades, desde la superficie hasta el fondo, en algunos casos a más de 4.000 metros, para hacer varios análisis biológicos y biogeoquímicos. Además, en algunas estaciones se lanzaron a la deriva boyas instrumentadas, hasta un total de catorce.

Las variables medidas fueron de tres tipos: los datos en continuo, que son los que se toman sin que el barco se detenga; los datos obtenidos con boyas instrumentadas a la deriva, y las medidas de las estaciones hidrográficas. Los datos en continuo son la temperatura y salinidad superficial, datos meteorológicos y velocidad de las corrientes hasta unos 500 metros de profundidad. Los datos de las boyas son de posición, y permiten deducir la velocidad de las corrientes, y de temperatura y salinidad en la superficie y a unos 60 m de profundidad. Las medidas en las estaciones son las más completas e incluyen variables físicas, químicas y biogeoquímicas. Entre otras, se han medido las siguientes: propiedades físicas del agua (salinidad, temperatura, velocidad, fluorescencia, turbiedad, cizalla vertical a microescala), oxígeno disuelto y nutrientes inorgánicos (nitratos, nitritos, silicatos y fosfatos), materia orgánica (carbono y fósforo particulado, carbono orgánico y fósforo total, materia orgánica disuelta coloreada y fluorescente), otras propiedades químicas (pH, alcalinidad, metano, carbonatos, carbono inorgánico disuelto, clorofluorocarbono, helio) y varias propiedades biológicas (respiración, producción primaria, clorofila *a*, estructura celular, fitoplancton, bacterias y algas marinas diminutas llamadas parmales).

ALICIA DURÓ y JOSEP L. PELEGRÍ

perficie estarán cargadas de nutrientes, necesarios para la transformación de la energía solar en materia orgánica mediante la fotosíntesis (Pelegrí *et al.*, 2006).

El ventrículo izquierdo del corazón terrestre se localiza en las regiones subpolares del planeta, tanto en el hemisferio norte (mar del Labrador y mar de Groenlandia) como alrededor del continente antártico. Es aquí donde cada invierno se forman las aguas muy densas que iniciarán la circulación meridional profunda, un claro latido que representa el punto de partida de las grandes arterias profundas. Estas aguas inician su gran periplo de un milenio de duración alejadas de la atmósfera y, como en toda cinta transportadora, deben retornar a su punto de partida. Antes de llegar a las regiones polares del hemisferio norte estas aguas pasan a ser superficiales en el océano Atlántico ecuatorial, que se convierte en la aurícula cardíaca derecha: aquí llegan las venas oceánicas con un pulso cardíaco estacional que ya es prácticamente imperceptible. Después de casi un milenio consiguen volver a las regiones oceánicas iluminadas, manteniendo

**«DESPUÉS DE CASI UN MILENIO
CONSIGUEN VOLVER A LAS REGIONES
OCEÁNICAS ILUMINADAS, MANTENIENDO
UNA CIERTA SEÑAL DE LAS PROPIEDADES
QUE TENÍAN CUANDO ESCAPARON DE LA
SUPERFICIE»**

una cierta señal de las propiedades que tenían cuando escaparon de la superficie, como si guardasen aún la memoria de los climas pasados de la Tierra.

A las aguas que van de camino al Atlántico ecuatorial, para volver a la superficie oceánica, las llamamos antárticas intermedias. Se trata de aguas relativamente dulces y muy frías, porque provienen de los alrededores del continente Antártico, que almacena millones de kilómetros cúbicos de hielo. Al llegar a la superficie estas aguas tienen la capacidad de incorporar grandes cantidades de radiación solar, que posteriormente será distribuida hacia latitudes más altas (Rahmstorf, 2002). En el océano ecuatorial y tropical, las corrientes viajan predominantemente en dirección zonal, entre los continentes Americano y Africano. Todas estas corrientes, sin embargo, están conectadas con la orilla occidental, donde está la corriente del Norte de Brasil. Esta es una intensa corriente meridional, al norte del continente sudamericano, que conecta las aguas de ambos hemisferios.

La corriente del Norte de Brasil representa la primera de las últimas etapas del largo viaje de la circulación me-

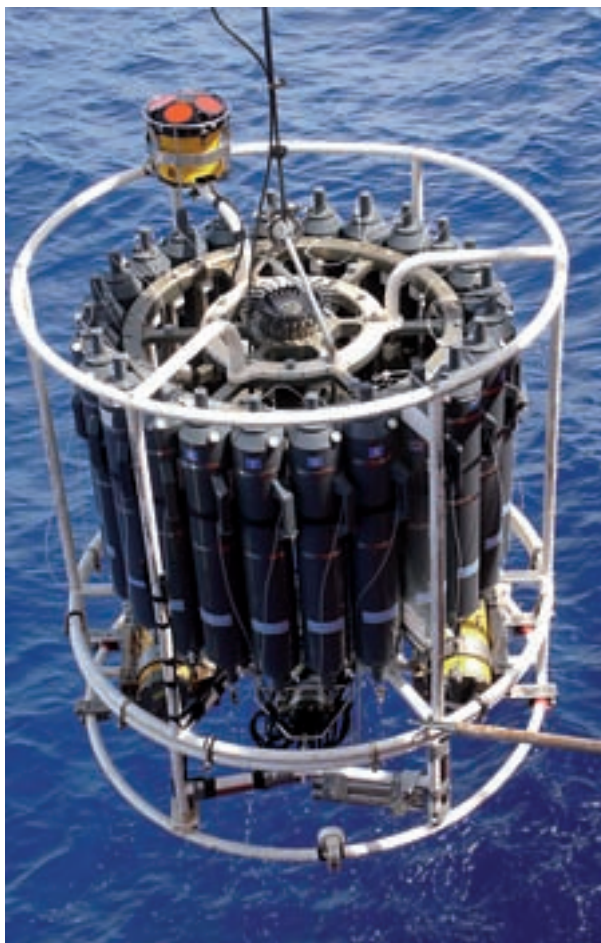


La campaña MOC2-Ecuatorial se realizó a bordo del Buque de Investigación Oceanográfica *Hespérides* desde Fortaleza (Brasil) hasta Mindelo (Cabo Verde). En total, fueron 42 días de navegación durante abril y mayo de 2010 en el océano Atlántico tropical y ecuatorial en el que participaron investigadores de diversas instituciones nacionales e internacionales.

ridional profunda, iniciada durante un invierno lejano de hace unos mil años; estas últimas etapas ya se hacen con rápidas corrientes superficiales, así en cuestión de solo un año atravesarán el Caribe (corrientes de Guyana y del Caribe) y continuarán a lo largo de la costa de América del Este hasta las regiones subpolares (corriente del Golfo y corriente Noratlántica). Las aguas de la corriente del Norte de Brasil transportan grandes cantidades de calor hacia las regiones más septentrionales del Atlántico y permiten, entre otras cosas, que la Europa del norte tenga un clima suave. Parte de este flujo de calor viene del océano Índico, que es un océano cerrado por el norte, por lo que todo el calor radiativo almacenado en la región tropical tiene que ir hacia el sur y puede parcialmente escapar hacia el Atlántico mediante la corriente de Agujas, pero una gran parte viene precisamente del calentamiento de las aguas antárticas durante su tránsito por el Atlántico sur y ecuatorial.

Los investigadores del Instituto de Ciencias del Mar del Consejo Superior de Investigaciones Científicas han estudiado estos procesos mediante el proyecto «Memoria oceánica del clima». Se trataba de estudiar la fase final del circuito sistémico terrestre: las regiones ecuatoriales donde se ubica el final de la circulación meridional profunda. Este proyecto ha permitido mejorar nuestro conocimiento sobre el papel de los océanos en el control del clima terrestre, estudiando una de las regiones de más trascendencia sobre el clima de la Tierra: el Atlántico ecuatorial.

Una de las actividades principales del proyecto ha sido la campaña oceanográfica MOC2-Ecuatorial. El principal objetivo de esta campaña fue investigar el alcance del transporte y las transformaciones que han experimentado las aguas intermedias en su viaje desde el océano austral hasta el Atlántico Ecuatorial. Una pregunta que nos hacíamos era: ¿cuál es la fuente de energía que permite a estas aguas fluir hacia el norte? Todos los inviernos las aguas profundas se forman a altas latitudes del Atlántico norte pero no sabemos de dónde obtienen la energía para volver a estas mismas regiones. El inicio del camino parece claro: las aguas profundas se forman gracias a la ganancia en densidad durante el enfriamiento invernal, eso crea un gradiente de presión que las empuja hacia el sur. Sin embargo, ¿es eso suficiente para que recorran miles de kilómetros alrededor del planeta, poco a poco subiendo por la columna de agua, hasta que retornen al Atlántico superficial? Los cálculos indican que eso no es suficiente, para que el agua siga este largo periplo se requieren fuentes adicionales de energía. La primera es el fuerte viento sobre los giros subtropicales, las grandes regiones centrales oceánicas, y la segunda fuente energética tiene lugar en la región ecuatorial, mediante una maravillosa combinación en la variación



© Alicia Duró

La roseta-CTD-LADCP es una estructura integrada por 24 botellas de 12 litros cada una y numerosos sensores para medir diversas propiedades de la columna de agua (salinidad, temperatura, presión, fluorescencia, oxígeno disuelto y velocidad de la corriente). Además, permite tomar muestras de agua a distintas profundidades para analizar muchos otros parámetros. Así se estudia cómo cambian estas propiedades con la profundidad y qué caracteriza las diferentes masas de agua.

estacional de la radiación solar y el sistema de vientos tropicales que, como si de una bomba peristáltica se tratase, lleva estas aguas hacia la superficie y las expulsa hacia el norte, hasta que son incorporadas al sistema zonal de corrientes tropicales para llegar a la corriente del Norte de Brasil (Castellanos, 2012).

Como parte de la campaña se realizó una sección transatlántica a lo largo del paralelo 7,5°N. Se trata de la cuarta vez en la historia de la oceanografía que se ha hecho esta sección. El océano absorbe cerca de la mitad del carbono antropogénico, lo que merma el efecto invernadero, y también tiene la capacidad de almacenar

**«EL OCÉANO ABSORBE
CERCA DE LA MITAD DEL
CARBONO ANTROPOGÉNICO,
LO QUE MERMA EL EFECTO
INVERNADERO»**



© Larraitz Lizarazu

En algunas estaciones se lanzaron boyas instrumentadas a la deriva que transmitirán información sobre el océano durante los próximos años.

grandes cantidades de calor mediante cambios muy pequeños en su temperatura, se trata del gran regulador de la temperatura del planeta. La importancia de la sección a lo largo de 7,5°N es que nos permite cuantificar cuánto calor, así como otras propiedades como el carbono, se ha incorporado al océano y cuál es el flujo meridional de estas propiedades en las regiones ecuatoriales del Atlántico.

En cuanto a los resultados de la campaña, hemos podido determinar la estructura y las conexiones espaciales de numerosas propiedades en toda esta gran región ecuatorial. Entre los resultados más específicos hemos determinado la gran intensidad y profundidad de la corriente del Norte de Brasil y hemos visto que parte de esta corriente se desvía hacia el Este, al Ecuador y cerca de 7°N (pero solo de abril a septiembre), y el resto continúa Caribe adentro. Nos ha llamado mucho la atención ver la extraordinaria complejidad de las distintas masas de agua que aparecen en esta región, a muy diferentes profundidades, y que la convierten en un centro neurálgico donde se conectan aguas de origen austral, subtropical y tropical.

Continuamos aún dedicados a estudiar todos los datos obtenidos y a compararlos con otras campañas realizadas en 1957 y en 1993 (Benítez-Barrios, 2011; Claret *et al.*, 2012; San Antolín *et al.*, 2012). Eso nos permitirá cuantificar la intensidad y la variabilidad temporal de la cinta transportadora en los últimos cincuenta años y tendremos respuestas sobre la organización

espacial y temporal del sistema terrestre. Estos datos nos han permitido también reafirmarnos en la idea de una fisiología oceánica, como parte de la cual hay un sistema circulatorio responsable de capturar, transformar y distribuir la energía solar, que guarda muchas semejanzas con otros sistemas circulatorios complejos. Estas simi-



© Marc Gasser

El microperfilador detecta la estructura a pequeña escala que hay en el océano, en pequeños remolinos (de centímetros a metros) donde la energía mecánica se disipa en forma de calor.

litudes pueden estar en la estructura espacial, tal como las que hemos descrito antes, o también en la estructura temporal. Así pues, por ejemplo, los cambios que experimenta la Tierra cuando pasa de un estadio glacial a otro interglaciar (Paillard, 2001) se parecen a los que experimenta el metabolismo de un ser vivo cuando cambia de un estado de reposo a otro de mayor actividad (Pelegrí, 2008; Pelegrí *et al.*, en revisión). Para sostener este incremento metabólico el sistema se mineraliza, es decir, respira más rápidamente la materia orgánica y al mismo tiempo aumenta la tasa de circulación de aguas profundas, cargadas de nutrientes, hacia el océano superior. El resultado es que en la superficie hay más nutrientes y por tanto aumenta la producción primaria, ¡la Tierra entra en un estado de ejercicio!

Como conclusión podemos decir que los océanos son los responsables del clima presente y futuro del planeta Tierra, son los verdaderos reguladores del sistema terrestre. No solo su masa es muy superior a la masa de la atmósfera, criosfera, biosfera y pedosfera (la parte más exterior, o piel, de la litosfera), sino que también almacena mucha mayor cantidad de otras propiedades fundamen-

tales para el estado de la Tierra, tal como son el calor, el carbono y los nutrientes inorgánicos. Cuando contemplamos el océano en el horizonte lejano no nos percatamos de que bajo su superficie hay otro paisaje. En cambio, si lo miramos hacia adentro podemos ver cambios en sus propiedades que nos hablan de diferentes orígenes y de muy diversas transformaciones tanto físicas como bioquímicas, de cómo las diferentes aguas se van mezclando a lo largo de su recorrido y de cómo tienen lugar las transformaciones entre materia orgánica e inorgánica.

Estudios como los aquí descritos nos dan herramientas fundamentales para comprender cuál es el papel de las grandes corrientes oceánicas en la distribución de propiedades dentro del océano, para saber cómo estas corrientes están organizadas espacialmente y temporalmente y para poder anticipar cuál puede ser la evolución futura del clima de nuestro planeta. ☺

BIBLIOGRAFÍA

- BENÍTEZ-BARRIOS, V. M., 2011. «Multiscale Variability in the North Atlantic Ocean». Tesis doctoral, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- BROECKER, W. S., 1991. «The Great Ocean Conveyor». *Oceanography*, 4(2): 18-89. DOI: <10.5670/oceanog.1991.07>.
- CASTELLANOS, P., 2012. «Wind-driven Currents in the Coastal and Equatorial Upwelling Regions». Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña.
- CLARET, M.; RODRÍGUEZ, R. y J. L. PELEGRÍ, 2012. «Salinity Intrusion and Convective Mixing in the Atlantic Equatorial Undercurrent». *Scientia Marina*, 76(S1): 117-129. DOI: <10.3989/scimar.03611.19B>.
- PAILLARD, D., 2001. «Glacial Cycles: Towards a New Paradigm». *Reviews of Geophysics*, 39: 325-346. DOI: <10.1029/2000RG000091>.
- PELEGRÍ, J. L., 2008. «A Physiological Approach to Oceanic Processes and Glacial-interglacial Changes in Atmospheric CO₂». *Scientia Marina*, 72: 185-202. DOI: <10.3989/scimar.2008.72n1185>.
- PELEGRÍ, J. L., MARRERO-DÍAZ, A. y A. W. RATSIMANDRESY, 2006. «Nutrient Irrigation of the North Atlantic». *Progress in Oceanography*, 70: 366-406. DOI: <10.1016/j.pocean.2006.03.018>.
- PELEGRÍ, J. L.; DE LA FUENTE, P.; OLIVELLA, R. y A. GARCÍA-OLIVARES [en revisión]. «Global Constraints on Net Primary Production and Inorganic Carbon Supply During Glacial and Interglacial Cycles». *Paleoceanography*.
- RAHMSTORF, S., 2002. «Ocean Circulation and Climate During the Past 120,000 Years». *Nature*, 419: 207-214. DOI: <10.1038/nature01090>.
- SAN ANTOÍN PLAZA, M. A.; PELEGRÍ, J. L.; MACHÍN, F. J. y V. M. BENÍTEZ, 2012. «Inter-decadal Changes in Stratification and Double Diffusion in a Transatlantic Section Along 7.5°N». *Scientia Marina*, 76(S1): 189-207. DOI: <10.3989/scimar.03616.19G>.
- TALLEY, L. D., 2013. «Closure of the Global Overturning Circulation Through the Indian, Pacific, and Southern Oceans: Schematics and Transports». *Oceanography*, 26(1): 80-97. DOI: <10.5670/oceanog.2013.07>

AGRADECIMIENTOS

La campaña oceanográfica MOC2-Equatorial se hizo como parte del proyecto *Memoria Oceánica del Clima: mecanismos y rutas de formación de aguas superficiales en el Atlántico ecuatorial (MOC²)*, referencia CTM2008-06438-C02-01, financiada por el Ministerio de Ciencia y Tecnología del Gobierno de España. Estamos muy agradecidos al personal técnico del barco, en especial al técnico jefe José Antonio Pozo, así como a toda la tripulación del *Hespérides* y al personal científico que participó en la campaña. Hacemos también extensivo nuestro agradecimiento a nuestros dos revisores anónimos, por sus comentarios y aportaciones a una primera versión de este manuscrito.

Josep L. Pelegrí. Investigador del Departamento de Oceanografía Física. Institut de Ciències del Mar, CSIC, Barcelona.

Alicia Duró. Institut de Ciències del Mar, CSIC, Barcelona.