

Oceanografía Física: de la exploración a la investigación científica

Gregorio Parrilla Barrera

Aunque ya los antiguos filósofos griegos y los grandes físicos, como Newton, se ocuparon en su momento de estudiar algunos fenómenos oceánicos, no fue hasta el siglo XX cuando la Oceanografía Física se convirtió en una rama independiente de la Física Aplicada. Y más precisamente en sus últimos 20 años, en los que ha sido sujeto de importantes avances tecnológicos, han aparecido nuevas técnicas de medida, se han aplicado nuevos y más eficientes métodos en el análisis y tratamiento de datos y se usa el lenguaje matemático con mayor rigor.

1. Introducción

La Oceanografía Física es una rama de la Física Aplicada cuyo principal objetivo es entender, modelizar y prever los procesos y fenómenos oceánicos usando las matemáticas, la mecánica de fluidos y la termodinámica. Se interesa por el movimiento de las aguas y la mezcla en el océano y por cómo aquellas llevan y distribuyen la energía, los elementos químicos disueltos, los nutrientes, organismos vivos, sedimentos y contaminantes. Está muy relacionada con los estudios atmosféricos y del clima. Por otra parte, no debemos olvidar que el océano es un medio donde existen complejas conexiones entre los procesos físicos, químicos, biológicos y geológicos, que controlan su conducta y evolución, por lo que su estudio tiene un fuerte marchamo interdisciplinario que puede modular la investigación física.

Como escribe M. B. Deacon: la Oceanografía es una joven ciencia con una larga historia. Aristóteles se interesó por las olas causadas por el viento, por el flujo a través de los estrechos y por el balance de agua en el océano. Navegantes y geógrafos ya conocían, antes del siglo IX, la variación de las corrientes del Índico con el monzón. La causa de las mareas fueron indagadas por los griegos, intuyeron su relación con las fases de la Luna, pero no se supo nada de su mecanismo hasta que Newton demostró que las mareas eran debidas a la atracción gravitacional de la Luna y, en menor medida, del Sol. Algunos contemporáneos de Newton resumieron sus artículos en lenguaje vulgar para hacer llegar tales conocimientos a los hombres de la mar que eran, en aquella época, los principales proveedores de los datos oceánicos a la comunidad científica. Pero, como el propio Newton hizo notar, era preferible que en vez de que los marineros enviaran la información a los matemáticos en tierra éstos embarcaran. Otra interesante contribución en este siglo XVII fue la del conde L. F. Marsigli que demostró, con la ayuda de un simple e ingenioso experimento, el intercambio de aguas en el Bósforo que, aunque nadie lo hizo en esa época, podía haber sido aplicado a Gibraltar.



A pesar de estos prometedores comienzos, las ciencias marinas no progresaron en los siglos XVIII y XIX tan rápidamente como podría suponerse. Una causa, como el mismo Marsigli expuso, fue que la investigación oceanográfica necesitaba de unos recursos fuera del alcance individual. Esta investigación exigía (y exige) medios caros: barcos, tripulaciones y aparatos. Se necesitaba financiación guber-

namental, lo cual es algo relativamente reciente. Otra importantísima causa, de tipo técnico, fue la práctica inexistencia de equipos apropiados, en particular para muestrear el océano profundo. No obstante, algunos hallazgos contribuyeron a la consolidación de los cimientos de la oceanografía. Por ejemplo como medir la longitud con precisión; o la información sobre la temperatura superficial del océano por varias expediciones rusas, británicas y francesas, luego usadas por Humboldt en sus estudios sobre el clima; o el desarrollo de termómetros capaces de medir a grandes profundidades, hecho ligado en gran parte al debate geológico sobre si el interior de la Tierra estaba frío o caliente.

No existió una oceanografía que se reconociese como ciencia hasta después de la primera mitad del siglo XIX. El interés sobre el mar residía en personas pertenecientes a estamentos varios: hidrógrafos, geógrafos y algunos científicos, que trabajaban un tanto aisladamente, y cuyos intereses estaban más enfocados a la hidrografía y a las necesidades del sector marítimo que a las ciencias físicas. En este siglo surgieron las primeras cartas de corrientes superficiales a partir de la información provistas por los barcos, una vez generalizado el uso del cronómetro. Rennell demostró la estrecha relación entre vientos y corrientes superficiales y Maury promovió la recogida sistemática, por los barcos de todas las naciones, de sus derivas, vientos y variables atmosféricas. Esto fue un hito fundamental en el establecimiento de la meteorología marina, muy ligada a varias de las ramas de la oceanografía moderna. El desarrollo tecnológico de la segunda mitad del siglo XIX y el aumento de la actividad marítima, en particular el tendido de cables telegráficos sub-

marinos, sentó las bases para el establecimiento de la Oceanografía como una disciplina independiente.

2. Comienzos de la Oceanografía moderna.

El uso de nuevos termómetros no afectados por la presión de las grandes profundidades y el de técnicas más fiables en la recogida de muestras de agua permitieron una descripción más precisa de la distribución de la temperatura con la profundidad y del comportamiento del agua salada a bajas temperaturas. Surgió la idea de que la diferencia de densidad entre las regiones ecuatoriales y las polares era la causa de la circulación interna en los océanos, agua caliente en superficie que iba hacia el norte compensando un transporte de agua profunda y fría hacia el ecuador. Con el fin de probar esta teoría, no sólo en el Atlántico sino también en otros océanos, W. B. Carpenter organizó una expedición de tipo exploratorio alrededor del mundo en el H.M.S Challenger entre 1872 y 1876. Este viaje, que muchos consideran el principio de la oceanografía moderna, fue un hito fundamental en su desarrollo, en esencia y en resultados.

Este tipo de campañas con un solo barco se siguió realizando por otros países en las siguientes décadas, aunque su naturaleza exploratoria se iba concentrando gradualmente en ciertas regiones o en algún problema en particular.

Durante estas primeras décadas del siglo XX surgieron varias instituciones de investigación oceanográfica (el Instituto Español de Oceanografía, la primera española, se fundó en 1914), se incorporaron estudios marinos a departamentos universitarios y se establecieron varios organismos internacionales. Fue la época en que destacaron los oceanógrafos nórdicos, en particular V. Bjerknes que formuló su teorema de la circulación y V. W. Ekman que describió las ondas internas entre capas de agua de diferente densidad y estableció la teoría de la deflexión, con la profundidad, de la corriente marina impulsada por el viento, la famosa espiral de Ekman que no pudo ser claramente vista en el océano hasta casi 100 años después. W. Ferrel puso de manifiesto la influencia de la rotación de la Tierra sobre las corrientes marinas, y G. Wüst describió el origen y la distribución de las principales masas de agua del Atlántico. La oceanografía empezó a transformarse de una ciencia con una preponderante componente descriptiva a otra con mayor énfasis en el estudio de los principios físicos que gobiernan el movimiento de las aguas. En 1933 apareció el libro *Physicalische Hydrodynamik* que se diferenciaba de otros libros de asunto parecido al incluir la estratificación, la rotación y la turbulencia en la física de los fluidos, principales características de la dinámica del océano. Hasta pasada la mitad del siglo XX no volvieron a surgir otros grandes avances en la oceanografía.

3. Segunda Guerra Mundial

La oceanografía se desarrolló rápidamente durante y después de la Segunda Guerra Mundial. La oceanografía también compartió la expansión general de la ciencia debido al impacto de ésta en el crecimiento económico posterior. La oceanografía fue sujeto de importantes avances tecnológicos, aparecieron nuevas técnicas de medida, se aplicaron nuevos y más eficientes métodos en el análisis y tratamiento de datos, se usó el lenguaje matemático con mayor rigor y se

dieron nuevas interpretaciones a varios conceptos físicos, por ejemplo la vorticidad, que facilitaron las aplicaciones de las ecuaciones de movimiento.

Antes de seguir adelante describiendo el progreso indicado es necesario hacer un inciso sobre lo que creo que son las principales dificultades en la investigación oceanográfica, las que han condicionado, y siguen condicionado, su progreso, pues sin conocerlas no se entendería bien éste. La primera es la dificultad de muestrear el océano, un medio hostil, que exige plataformas de observación e instrumentación muy caras y sujetas a frecuentes pérdidas, así como el empleo de grupos de trabajadores grandes. A pesar de la aparición de los satélites y nuevas tecnologías es todavía imposible tener una visión sinóptica del océano excepto en la capa más superficial; incluso hay grandes regiones del océano que permanecen, prácticamente, sin muestrear. Otra dificultad es inherente a las ecuaciones de movimiento, que en su forma general no se pueden resolver ni analítica ni numéricamente. Por último, los movimientos y procesos físicos en el océano ocurren y conviven dentro de una amplia gama de escalas espaciales y temporales. Corrientes de escalas de miles de km contienen meandros y vórtices de centenares de km, estructuras verticales de centenares de m y procesos de convección y difusión que cubren un rango de miles a décimas de m. La escala temporal puede variar desde periodos climatológicos hasta décimas de segundos. Y todo ello interactúa con mayor o menor intensidad, la no linealidad es la norma. Esto que, evidentemente, está relacionado con la dificultad anterior, no permite que, hoy día, sea posible resolver todas estas escalas al mismo tiempo en los modelos numéricos, abocándonos a la parametrización de variables o procesos sin estar muy seguros de su riguroso sentido físico.

Terminado el inciso volvamos a lo que pasó durante y después de la Segunda Guerra Mundial. En esos años aparece el primer texto oceanográfico moderno, el de H. U. Sverdrup, M. W. Johnson y R. W. Fleming, en el que se da una visión integradora de las diferentes disciplinas, haciendo notar, a pesar de ello, que “En el campo de la oceanografía física, la mayor parte del trabajo teórico y práctico se puede llevar a cabo con poca o ninguna atención a los resultados de otras ciencias marinas”. En 1948 Sverdrup encontró la solución de la respuesta de la circulación en mar abierto al rotacional de la tensión del viento. Un año más tarde Stommel explicó la intensificación de las corrientes en la orilla occidental de los océanos (figura 1).

En 1957, durante el Año Geofísico Internacional, tuvo lugar un gran programa multinacional de observación en el cual se empezó a medir por primera vez, y de una manera sistemática, la salinidad por medio de la conductividad con el consiguiente aumento de la precisión en la medida. Este programa dio una visión global de la distribución de las principales características de las masas de agua en todos los océanos. En 1960 Stommel y Aaron expusieron las primeras teorías sólidas sobre el transporte de agua profunda. Una rama de ese transporte: la corriente Profunda Noratlántica Occidental es hoy día importante motivo de estudio, no sólo por su intrínseco interés científico sino también por su importancia en la circulación general y como indicador del cambio climático.

Hasta casi los años 1970 se pensaba que la circulación oceánica, lejos de los contornos occidentales, era práctica-

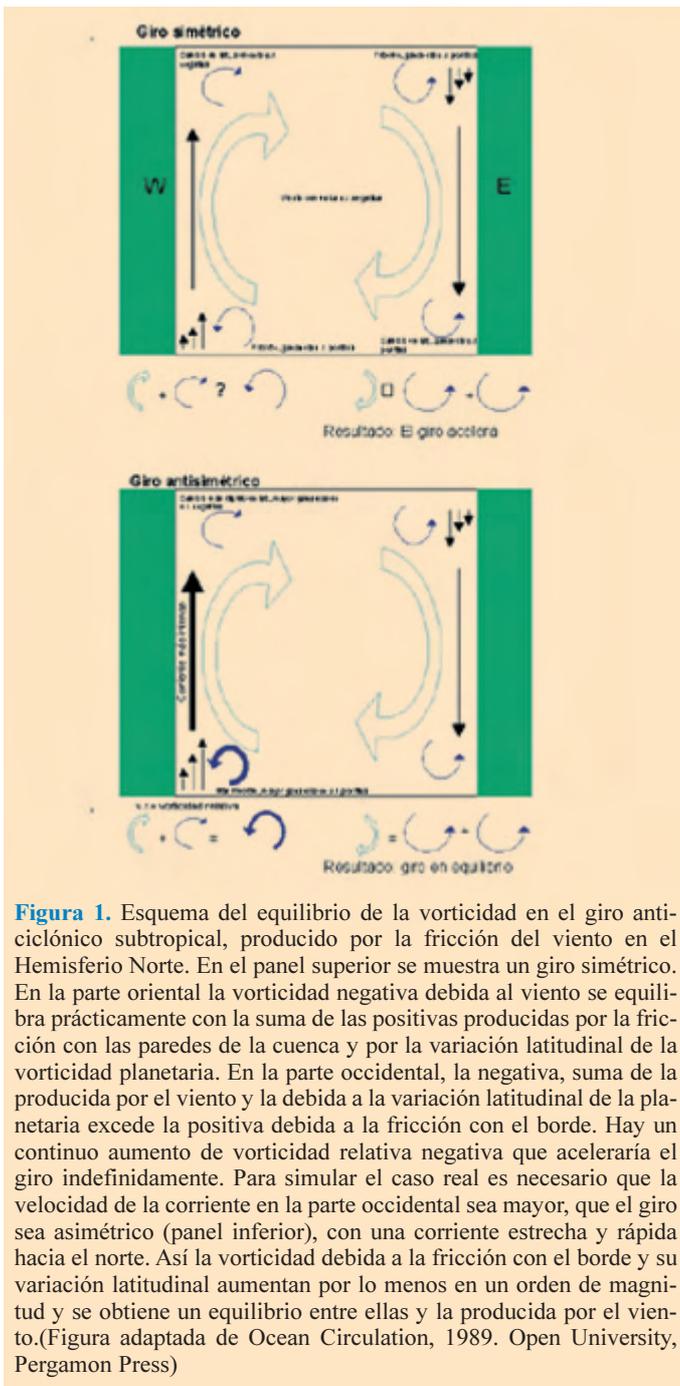


Figura 1. Esquema del equilibrio de la vorticidad en el giro anticiclónico subtropical, producido por la fricción del viento en el Hemisferio Norte. En el panel superior se muestra un giro simétrico. En la parte oriental la vorticidad negativa debida al viento se equilibra prácticamente con la suma de las positivas producidas por la fricción con las paredes de la cuenca y por la variación latitudinal de la vorticidad planetaria. En la parte occidental, la negativa, suma de la producida por el viento y la debida a la variación latitudinal de la planetaria excede la positiva debida a la fricción con el borde. Hay un continuo aumento de vorticidad relativa negativa que aceleraría el giro indefinidamente. Para simular el caso real es necesario que la velocidad de la corriente en la parte occidental sea mayor, que el giro sea asimétrico (panel inferior), con una corriente estrecha y rápida hacia el norte. Así la vorticidad debida a la fricción con el borde y su variación latitudinal aumentan por lo menos en un orden de magnitud y se obtiene un equilibrio entre ellas y la producida por el viento. (Figura adaptada de Ocean Circulation, 1989. Open University, Pergamon Press)

mente estacionaria: se creía que las diferencias entre las variables medidas en estaciones de muestreo sucesivas, hechas a lo largo de una determinada sección, eran debidas a la distancia espacial entre ellas y no a la variabilidad temporal ocurrida durante el tiempo transcurrido entre muestreos. Las nuevas técnicas de medición demostraron que prácticamente todas las corrientes, independiente de la posición y la profundidad, estaban sujetas a una gran variabilidad temporal, la llamada mesoescala de ordenes de magnitud aproximados de 100 km y 100 días. Más del 99% de la energía cinética de las corrientes oceánicas está asociada a esa variabilidad. Se pasó de suponer corrientes de 10 ± 1 cm/s a 1 ± 10 cm/s. Tal mesoescala se considera el “tiempo” oceánico, y la circulación más estable (miles de km y años) como el

clima oceánico. Al revés que en meteorología, en oceanografía primero se observó el clima y luego el tiempo.

Al mismo tiempo, se empezó a observar la microestructura, aquella escala a la que la energía es irreversiblemente convertida en calor. Las escalas son de cm o mm, pero no por eso tales procesos dejan de ser importantes (recuérdese el párrafo anterior donde se menciona la interacción a diferentes escalas en el océano). A partir de medidas directas se obtuvieron valores para la difusión pelágica de un orden 1000 veces mayor que para la molecular, evitando la práctica, hasta ese momento seguida por muchos, de escoger arbitrariamente valores de los coeficientes de turbulencia que se ajustaran a sus observaciones. Con estos hallazgos, Turner desarrolló la teoría de mezcla de doble difusión. El experimento MEDOC en el Mediterráneo permitió medidas directas de movimientos convectivos, productores de aguas profundas a partir del hundimiento de las aguas superficiales cuando aumentaban su densidad debido al forzamiento atmosférico. Proceso que se da, a mucha mayor escala, en otras regiones del océano, en particular en las polares. Es el principal origen de las aguas intermedias, profundas y de fondo que se encuentran estratificadas según la densidad que adquirieron en su momento en la superficie y su mezcla con las aguas subyacentes.

Mientras, en España la oceanografía se recuperaba lentamente, como el resto del país, de los devastadores efectos de la guerra civil. Si antes de ella había tenido una importante impronta en el ámbito internacional, ahora, exilados casi todos sus miembros más importantes, intentaba sobreponerse a la escasez de medios, al aislamiento y a la inexistencia de una formación académica. Por cierto esto último continúa igual: no existe la especialidad de oceanografía en ninguna facultad de ciencias físicas española, excepto por un curso trimestral en la Complutense. El físico oceanógrafo español sigue teniendo, aún hoy día, una importante componente autodidacta aunque, afortunadamente, en menor grado. En los años 70 ocurrieron dos hechos que, en mi opinión, fueron claves en el despegue definitivo de la oceanografía española. El primero, la botadura del Cornide de Saavedra, primer barco oceanográfico español moderno, capaz de prestaciones importantes. El segundo, el establecimiento de un programa de colaboración con EE. UU. A. que permitió la compra de material moderno y, lo que fue más importante, la colaboración intensa y continuada con oceanógrafos estadounidenses con estancias en algunas de las instituciones oceanográficas más importantes del mundo.

4. Últimas décadas del siglo XX

A partir de la década de los años 80 la oceanografía física dio un gran salto, su implantación dentro del mundo académico aumentó, la Unión Europea estableció un programa de investigación específico que fue importantísimo para la comunidad española. En España se fundaron las primeras facultades de Ciencias del Mar y se creó un programa nacional en investigación marina. Quizás lo que más contribuyó al progreso general fue la aparición de nuevas tecnologías: batisondas que permiten el muestreo continuo de la columna de agua en tiempo presente, correntómetros que pueden permanecer mucho más tiempo fondeados o que pueden registrar un perfil vertical de corrientes de varios centenares de m

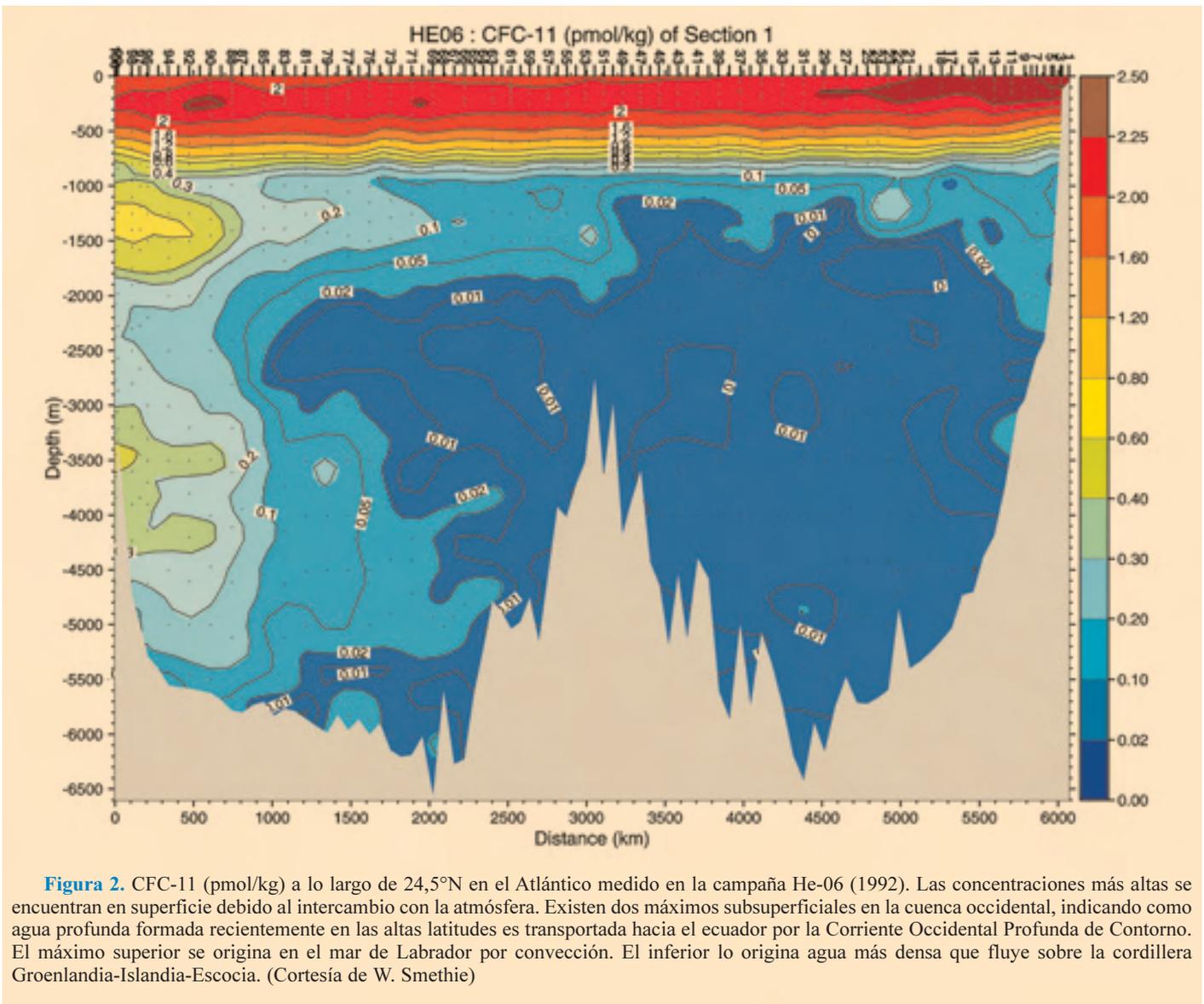


Figura 2. CFC-11 (pmol/kg) a lo largo de 24,5°N en el Atlántico medido en la campaña He-06 (1992). Las concentraciones más altas se encuentran en superficie debido al intercambio con la atmósfera. Existen dos máximos subsuperficiales en la cuenca occidental, indicando como agua profunda formada recientemente en las altas latitudes es transportada hacia el ecuador por la Corriente Occidental Profunda de Contorno. El máximo superior se origina en el mar de Labrador por convección. El inferior lo origina agua más densa que fluye sobre la cordillera Groenlandia-Islandia-Escocia. (Cortesía de W. Smethie)

o con el barco en movimiento, boyas derivantes a diversas profundidades, métodos de posicionamiento más precisos, mejor aprovechamiento de los satélites, rápido desarrollo de la modelización numérica, etc. En oceanografía, por regla general, las nuevas ideas han seguido a las nuevas tecnologías.

Estos últimos 20 años han sido testigos de grandes avances en el conocimiento de la física del océano. Estos grandes avances se pueden resumir, siguiendo lo relacionado en el informe APROPOS y los resultados de otros foros, así:

Se han recopilado los diversos bancos de datos de temperatura, salinidad, velocidad y otras propiedades del agua, así como datos geoquímicos complementarios (Figura 2), incluyendo una climatología global hecha a partir de los datos tomados a lo largo de varias décadas. Para ello ha sido fundamental el World Ocean Circulation Experiment (WOCE) que acaba de finalizar y que nos ha permitido tener una visión de la circulación general del océano basada en unos datos tomados de una manera coherente y en una única década. (Figura 3). Por primera vez hemos sido capaces de medir el rango completo de escalas espaciales que contribuyen a la circulación oceánica, desde unos 20km a 10.000 km,

con medidas, necesariamente esporádicas, hasta la escala de mm. Como ha dicho C. Wunsch: la era en la que todavía algunas escalas oceánicas permanecían sin medir se ha acabado.

La teoría de la “termoclina ventilada” elucidó el mecanismo por el cual la “subducción” (inmersión de los estratos superficiales a lo largo de las isopícnas) de las aguas superficiales transporta sus condiciones a aguas más profundas. La teoría de la homogeneización de la vorticidad potencial explicó como los movimientos turbulentos débiles pero persistentes moldean, a escala de giros y en las latitudes subtropicales, la estructura de la densidad en aquellos estratos de la termoclina que están aislados de la interacción con la atmósfera.

El conocimiento del acoplamiento océano-atmósfera del fenómeno de El Niño, y la consecuente previsibilidad del clima a corto plazo, es con seguridad el éxito más visible de la aplicabilidad de la oceanografía física. Ha sido una revolución en el estudio de la oceanografía ecuatorial y su conexión con la meteorología.

Las medidas de larga duración en mar abierto, mostrando las grandes fluctuaciones, a escalas de semanas y meses, en

las corrientes, junto con un mejor conocimiento teórico de la dinámica a mesoescala, la interacción ondas-flujo medio, la turbulencia geostrofica y la difusión, y el desarrollo de modelos nos ha permitido conocer con más profundidad como interactúan todos estos ingredientes en la circulación general.

Las medidas directas de la mezcla diapicna (a través de las isopicnas) siguiendo la evolución de inyecciones de trazadores químicos, nos ha permitido obtener unos valores más reales de los coeficientes de difusión turbulenta. Parece que la mezcla abisal es significativa y ubicua, y su intensidad depende de la interacción del campo de ondas internas con la topografía del fondo. El que esto sea así nos ayuda a entender mejor como el agua más densa y fría de las superficies en latitudes altas que descienden hasta las regiones abisales comienzan su vuelta hacia la superficie para cerrar el gran bucle termohalino. Curiosamente estos estudios han vuelto a poner de relieve el estudio de las mareas, área de investigación que se había quedado supuestamente "vieja". Parece que la fricción de los movimientos de las aguas producidos por las mareas con el relieve del fondo marino es una fuente importante de energía mecánica en la mezcla de las aguas.

Durante esta época también se han producido importantes aportaciones españolas a la oceanografía física.

El estrecho de Gibraltar ha sido siempre una zona clásica de investigación en la oceanografía española, no sólo por su proximidad sino por su carácter paradigmático internacional. El conocimiento científico del intercambio de aguas a través del Estrecho de Gibraltar mejoró notablemente durante la segunda parte de la década de 1980 gracias al proyecto de investigación internacional "Experimento Gibraltar". Durante los 90 ha seguido siendo el foco de un importante esfuerzo tanto experimental como teórico. En el plano teórico, durante los últimos años se han realizado importantes avances en el modelado numérico de los distintos procesos que

tienen lugar en el Estrecho: el intercambio medio, la liberación de ondas internas (Figura 4), así como en la extensión de los modelos hidráulicos para incluir tanto la variabilidad temporal como los procesos de mezclas. Se ha profundizado asimismo en el conocimiento de la relación del forzamiento meteorológico con la variabilidad subinercial de los flujos y en la variabilidad estacional en los flujos.

La peculiar circulación del mar de Alborán, compuesta por giros de diverso tamaño y sentido y la interacción entre las aguas atlánticas y mediterráneas han constituido un importante banco de trabajo para probar hipótesis de mayor alcance (Figura 5). Por ejemplo la resolución numérica, por primera vez en el océano, de la ecuación omega tridimensional para obtener la velocidad vertical a partir del campo de densidad y la resolución de importantes problemas relacionados con la vorticidad: en particular el descubrimiento de la equivalencia entre la vorticidad material de Beltrami y la vorticidad potencial de Rossby-Ertel. En el Mediterráneo Occidental se ha abordado el estudio de procesos mesoescalares teniendo en cuenta la crítica influencia que tiene el muestreo y el procesamiento de datos a la hora de obtener campos de variables dinámicas fundamentales.

Dentro del ya mencionado programa WOCE, se detectó la variabilidad climática de la temperatura y salinidad (Figura 6) ocurrida desde los años 50 en el Noratlántico subtropical y se cuantificaron los flujos de calor, sal, agua y nutrientes a través de la misma.

También se han llevado a cabo importantes estudios en la región de Azores-Canarias. Se ha investigado la influencia de la salida de agua mediterránea en el Atlántico (Figura 7), la corriente de Canarias y su interacción con las zonas de afloramiento africana y el efecto del archipiélago canario sobre la circulación general. Otras regiones de interés han sido el afloramiento gallego y la estructura hidrográfica y su variabilidad del Atlántico Nororiental.

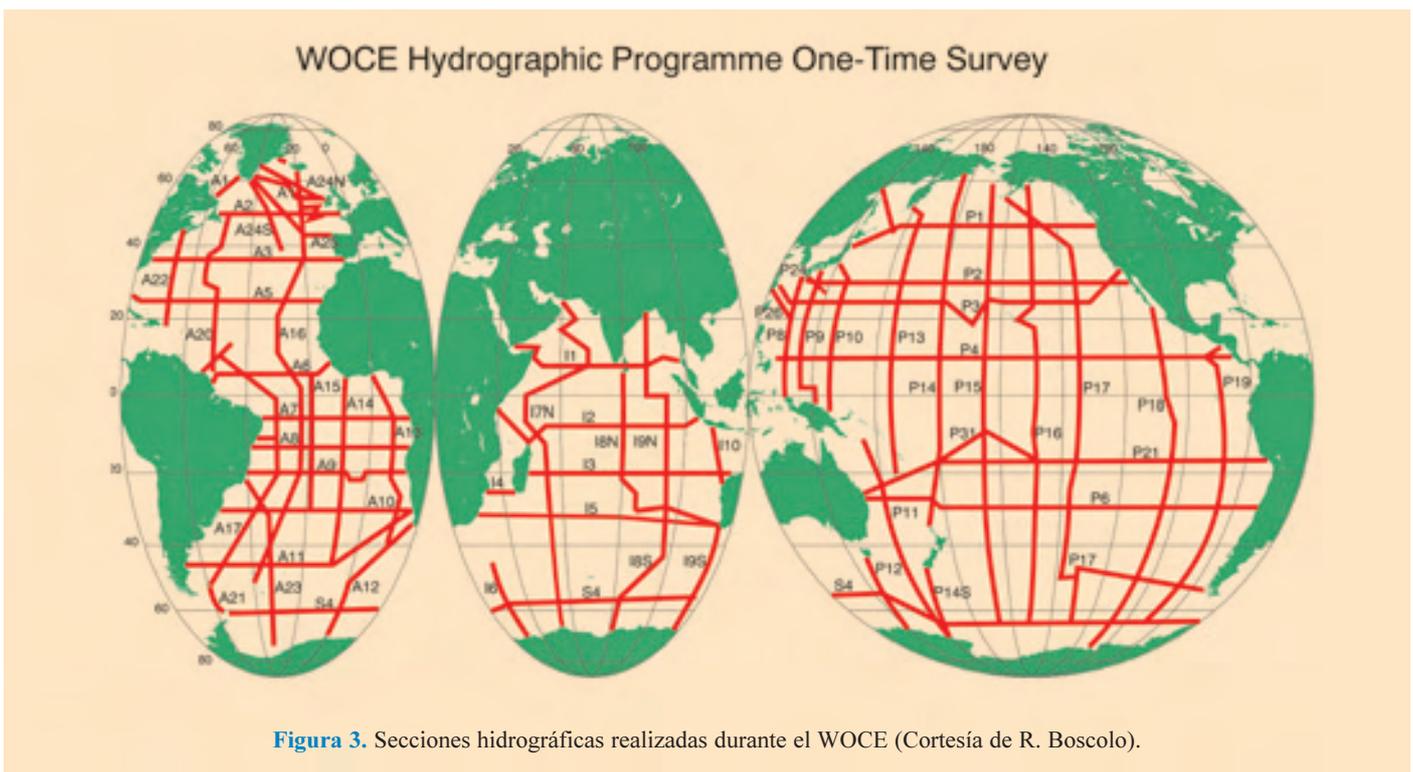


Figura 3. Secciones hidrográficas realizadas durante el WOCE (Cortesía de R. Boscolo).

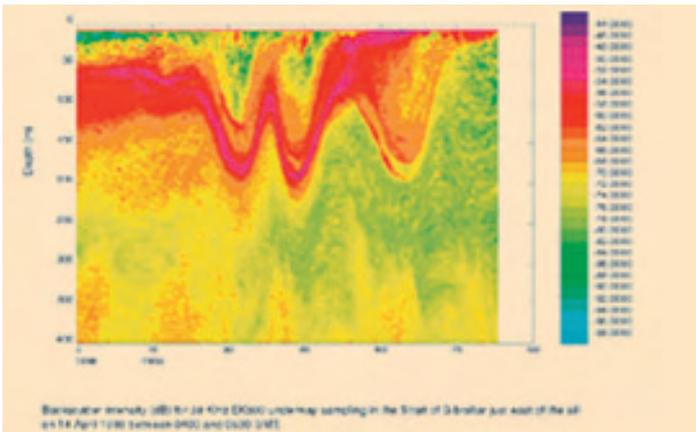


Figura 4. Visualización de las ondas internas inmediatamente al este del umbral del estrecho de Gibraltar por medio de la dispersión acústica ambiental de las emisiones de 38 Khz de la sonda EK500 durante la navegación. (Cortesía de H. L. Bryden).

Retos futuros

No es fácil predecir cuales serán los futuros caminos que la investigación en oceanografía física debe o va a tomar. En principio la investigación básica será siendo fundamental para su desarrollo, incluso si se quiere que la oceanografía física ayude a resolver problemas de interés práctico para la sociedad. Teniendo en cuenta los temas fundamentales que desconocemos todavía y la relación de la oceanografía con aquellas situaciones que más afectan al bienestar humano y a la conservación de nuestro medio natural se puede, en principio, establecer una serie de prioridades.

El océano desempeña un importante papel en el clima y su evolución. Evidentemente los beneficios económicos que se deriven de este conocimiento son enormes. El éxito en la predicción de El Niño, la mejora de la predicción meteorológica al incluir variables oceánicas, la cuantificación más detallada de tales variables, la mejora de los sistemas de observación y la influencia antropogénica sobre el cambio climático hacen que estos estudios sean una parte importante de la oceanografía futura. Uno de los aspectos de este problema es el conocimiento del ciclo del carbono para el que entender y describir con el mayor detalle la circulación oceánica, la interacción océano-atmósfera, la formación de aguas profundas y otros procesos físicos es crucial. Otro aspecto es el relacionado con los cambios bruscos del clima, evidencia de los cuales se han encontrado en diversos registros paleoceanográficos en el Atlántico y Pacífico Norte. Aparentemente, pueden ocurrir en el lapso de una vida humana y ser hemisférico en extensión. Están ligados, al menos parcialmente, a la circulación oceánica. Por último, es evidente que si queremos tener unos modelos eficientes en la predicción de cambios climáticos necesitamos mejores modelos acoplados océano-atmósfera. Esto implica el desarrollo de otra prioridad futura, el establecimiento de un sistema de observación oceánica.

Para conocer y predecir lo que pasa en el océano, es necesario conocer en detalle las referencias básicas de sus propiedades físicas, biológicas, químicas y geológicas. Lo estrictamente análogo en el océano a la predicción del tiempo atmosférico sería la predicción de la amplificación y disminución de los giros de mesoescala, las mareas y las ondas producidas por el viento. Ahora bien la predicción oceánica cubre un mayor rango, desde los cambios climáticos hasta el ajuste de un ecosistema a la introducción de una especie foránea. A esto hay que añadir la dificultad de muestrear un

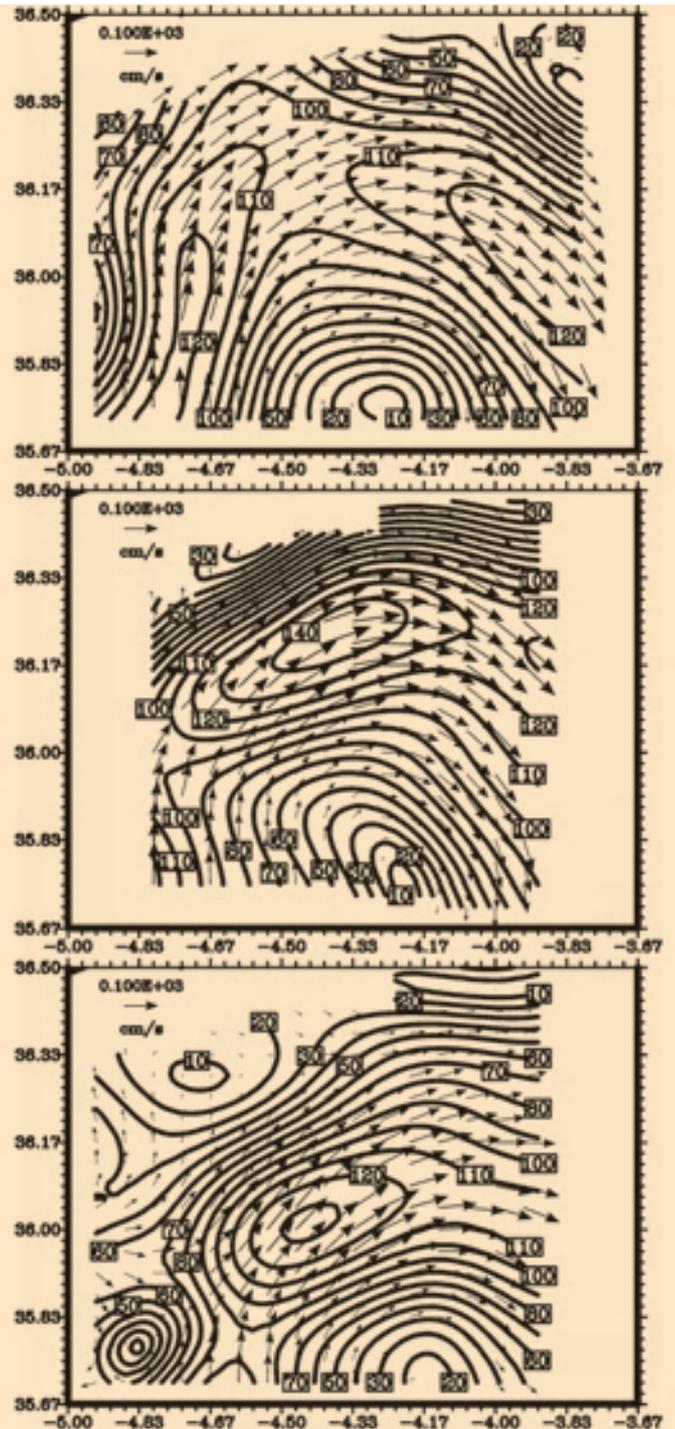


Figura 5. Distribución horizontal de la velocidad horizontal superficial (13 metros de profundidad) interpolada a partir de datos experimentales ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) obtenidos en tres campañas oceanográficas consecutivas (dos días y medio de duración) y de alta resolución en el Mar de Alborán. El vector de referencia es 1 m/s. Las isolíneas indican la celeridad con un incremento de contorno de 10 cm/s. Estos datos manifiestan la variabilidad temporal del frente Atlántico en el Mar de Alborán, la corriente de mesoescala más rápida del Mar Mediterráneo (Cortesía de A. Viúdez).

po atmosférico sería la predicción de la amplificación y disminución de los giros de mesoescala, las mareas y las ondas producidas por el viento. Ahora bien la predicción oceánica cubre un mayor rango, desde los cambios climáticos hasta el ajuste de un ecosistema a la introducción de una especie foránea. A esto hay que añadir la dificultad de muestrear un

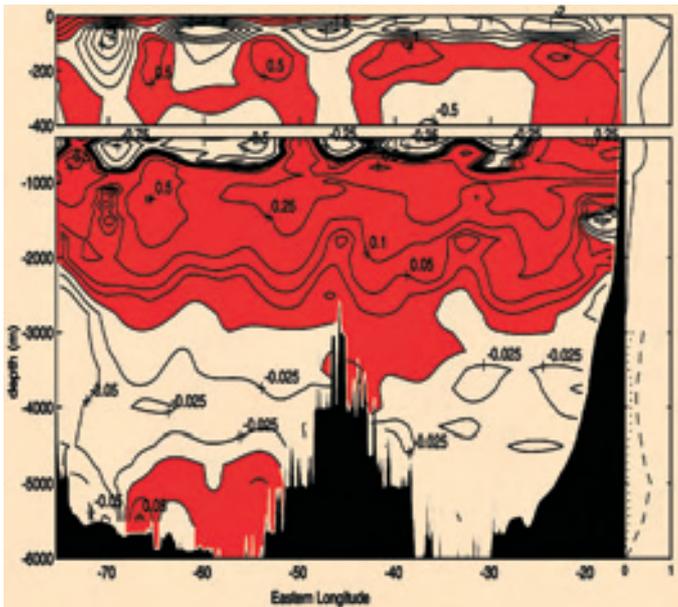


Figura 6. Diferencias de temperatura (°C) calculadas mediante análisis objetivo entre 1992 y 1957. En la parte derecha se presenta el error esperado (°C). Por debajo de 3000 m el error se da por separado para la cuenca canaria (punteado) y para la norteamericana (trazos). Los valores están multiplicados por 10. El área coloreada indica diferencia positiva. La gráfica superior tiene expandida la escala vertical. (Cortesía de A. Lavín)

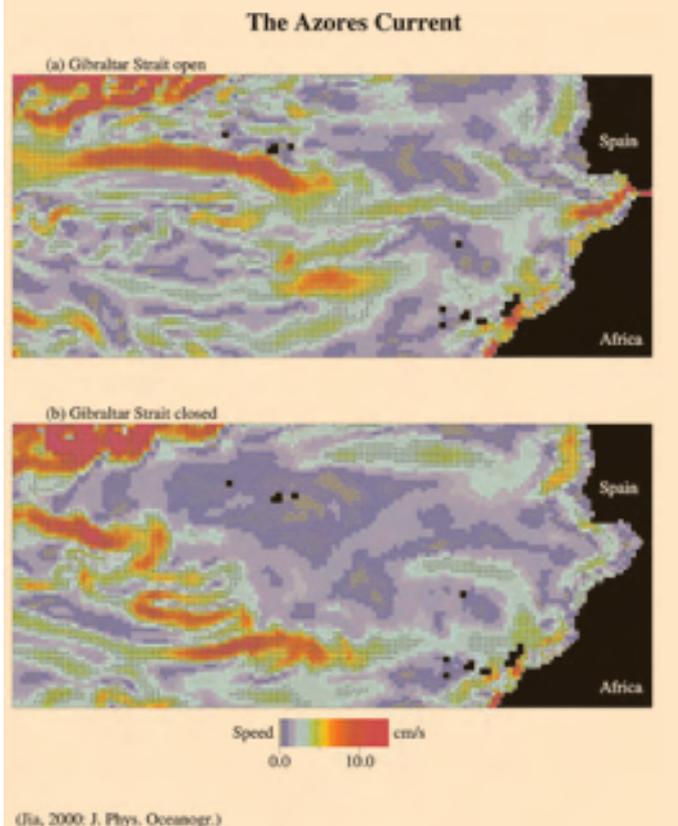


Figura 7. Velocidad cerca de la superficie en el Atlántico norte obtenida tras 20 años de integración de dos versiones del modelo global OCCAM (1/4°x1/4°). En cada caso la dirección del flujo es indicada por los vectores (origen en el punto) y la magnitud por los colores. El panel a) muestra los resultados con Gibraltar abierto, o sea que existe un flujo mediterráneo hacia el Atlántico. Este modelo reproduce la intensa corriente de Azores, ramificándose desde la corriente Noratlántica. El panel b) muestra los resultados para el mismo modelo con la única diferencia de que Gibraltar ha sido cerrado. En este caso no hay flujo mediterráneo ni corriente de Azores. (Cortesía de Y. Jia)

medio tan vasto e inhóspito. Es totalmente necesario desarrollar nuevos sensores y plataformas que permitan un muestreo fiable, independiente del uso de barcos, disponibles, al menos parte de él, en tiempo presente, con una frecuencia de medida que se acerque lo más posible a la sinopticidad, que se mantengan por muy largos periodos y que se extiendan al mayor número de variables oceánicas posibles. En cierta manera esto significa una revolución en la oceanografía, da lugar a la creación de una nueva rama: la oceanografía operacional que exige nuevos planteamientos en el mundo académico, en la incorporación de nuevas especialistas y en la financiación de programas.

La turbulencia en el océano desempeña un papel crítico en la transferencia de masa, cantidad de movimiento, energía, sal y otras propiedades del agua, desde las grandes escalas donde se originan hasta las moleculares donde se disipan. La turbulencia tiene también un fuerte impacto sobre las actividades del zooplancton, la transferencia de gases y la mezcla de nutrientes. Los flujos turbulentos abarcan un gran rango de escalas y estructuras espaciales. Su dinámica es no lineal, de tal manera que cada escala espacial interactúa con las otras, las estructuras no evolucionan independientemente. Así el problema de la turbulencia no puede ser resuelto por las técnicas analíticas usuales de simplificación. La turbulencia está presente en casi todo lo que ocurre en el océano. Podemos identificar unos cuantos temas que contienen problemas relacionadas con su estudio y que necesitan ser resueltos: los flujos diapícnos, los efectos de la turbulencia sobre las pautas de comportamiento de los organismos vivos, el transporte de agua, energía, etc. por medio de giros de mesoescala y los procesos en la capa de mezcla. Se necesitan más observaciones de los niveles de turbulencia en diferentes regiones a lo largo de un ciclo estacional, y en tal número que permita la detección de sucesos específicos y, por supuesto, mejorar los modelos numéricos con la resolución adecuada a cada proceso o con una parametrización más precisa de los flujos turbulentos.

Por último, tenemos lo que se suele llamar el océano costero. Aunque las márgenes oceánicas suponen sólo el 10% del océano mundial, y una fracción mucho menor de su volumen, aquel domina la importancia económica del océano y es donde los continentes, el océano, el fondo marino y la atmósfera interactúan, generando unos fuertes gradientes de energía, materia y biota. Es una región dinámicamente muy compleja. Se necesita un programa de observación a largo plazo, sistemas de modelos interdisciplinarios y, ligado al anterior párrafo, estudios in situ de la turbulencia oceánica.

Según C. Wunsch, todo lo conocido hasta ahora y las incógnitas que permanecen aconseja a la comunidad de oceanógrafos físicos a contemplar el océano como un fenómeno global. Esto es un proceso lento y difícil pues, en primer lugar, el océano es muy complicado, con grandes variaciones regionales en su dinámica y cinemática: no es fácil comprenderlo todo al mismo tiempo. Por otro lado, las escalas temporales parecen estar dominadas por periodos más largos que los de financiación de los programas científicos.

Agradecimientos

Doy las gracias a Alicia Lavín Montero, J. L. Pelegrí Llopart, J. García Lafuente, Damiá Gomis, Alvaro Viúdez, y

Manuel Ruiz Villareal por la información con la que me han provisto para completar este artículo.

Bibliografía

- [1] The future of Physical Oceanography. 2001. ROYER T. & W. YOUNG, 2001 (compilers). Report of the APROPOS workshop, Monterey, CA (December 15-17, 1997). NSF,OCE. 178 pp.
- [2] Collected works of H. S. STOMMEL. 1995. Vol. I, II and III. Ed. by N. G. HOGG AND R. X. HUANG. Pub. American Meteorological Society. ISBN 1 878220 16 0.
- [3] EMERY, W. J. AND R. E. THOMPSON. 2001. Data analysis methods in Physical Oceanography. 2nd and revised version. ISBN 0 444 50756 6. Elsevier Science B. V. 638 pp.
- [4] ESF MARINE BOARD. 2002. Integrating Marine Science in Europe. ISBN 2 912049 35 0. 148 pp.
- [5] Evolution of Physical Oceanography. 1981. Ed. by B.A. WARREN AND C. WUNSCH. MIT Press. ISBN 0 262 23104 2. 623 pp.
- [6] MUNK, W. 2002. The evolution of physical oceanography in the last hundred years. *Oceanography*, (15)1, 135-141
- [7] OCEAN SCIENCES AT THE NEW MILLENIUM, 2001. NSF. Ed. and design by Geoscience Professional Services, Inc. 152 pp.
- [8] OCEANOGRAPHY COURSE TEAM. 1989. OCEAN CIRCULATION. Open University-Pergamon Press. ISBN 0 08 036370 9. 238 pp.
- [9] PEDLOSKY, J. 1996. Ocean Circulation Theory. Springer-Verlag. ISBN 3 540 60489 8. 453 pp.
- [10] SVERDRUP, H. U., M. W. JOHNSON AND R. W. FLEMING, 1942. The Oceans: Their Physics, Chemistry and General Biology. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1060 pp.
- [11] TOMCZAK, M. AND J. S. GODFREY. 1994. Regional Oceanography: an introduction. ISBN 0 08 041020 0. Pergamon Press. 422 pp.

Gregorio Parrilla Barrera
Oceanógrafo. Investigador A-1
Instituto Español de Oceanografía

XVII REUNIÓN DE LA FEDERACIÓN DE SOCIEDADES IBEROAMERICANAS DE FÍSICA (FELASOFI)

En el marco de las actividades conmemorativas del Centenario de la Real Sociedad Española de Física tuvo lugar en Madrid la XVII Reunión de la Federación de Sociedades Iberoamericanas de Física con asistencia de los Presidentes de dichas Sociedades así como del Presidente de la European Physical Society.

Esta reunión se celebró del 16 al 19 de diciembre en el Consejo Superior de Investigaciones Científicas, patrocinada por el ministerio de Ciencia y Tecnología, la Dirección General de Investigación, la Consejería de Educación de la Comunidad de Madrid y la Fundación BBVA.

El martes 16 tuvo lugar una mesa redonda sobre el Panorama de las relaciones España-Iberoamérica, en la que participaron además de los representantes de las Sociedades de Física, D. José Manuel Fernández Labastida (Ministerio de Ciencia y Tecnología), D. Dario Crespo (Ministerio de Educación, Cultura y Deporte), Dña Almudena del Rosal (Dirección General de Investigación de la Consejería de Educación de Madrid), Dña Almudena Juárez (Vicepresidenta de Investigación Científica y Técnica-CSIC) y D. Fernando Aldana (Secretario General. CYTED).

El miércoles 17 se trató de las Revistas Científicas Iberoamericanas concluyendo con la propuesta de publicación de un Boletín de la Unión Iberoamericana de Sociedades de Física (UNISOFI) y encargándose de organizar dicha publicación a D. Alipio Calles (Sociedad Mexicana de Física), D. Humberto Brandi (Sociedad Brasileña de Física) y Dña Eloísa López (RSEF). El viernes 19 se dedicó a preparar el año mundial de la Física (2005) con la participación de D. Martial Ducloy (E.P.S.).

Como último acto del Centenario de la RSEF, el 18 de diciembre tuvo lugar una recepción a los Presidentes de las Sociedades Iberoamericanas y a las autoridades en la Casa de América de Madrid. En este acto intervinieron Dña Isabel Couso, Directora General del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, Humberto Brandi, Presidente de la Sociedad Brasileña de Física, Martial Ducloy, Presidente de la European Physical Society y Gerardo Delgado, Presidente de la RSEF, terminando con la firma de del Convenio entre la FELASOFI y la RSEF por los presidentes y representantes.