

Estudio altimétrico de la cuenca mediterránea-Golfo de Cádiz

M. CATALÁN MOROLLÓN¹ y M. CATALÁN PÉREZ-URQUIOLA²

¹ Real Instituto y Observatorio de la Armada

² Dep. Física Aplicada. Universidad de Cádiz

RESUMEN

Los fenómenos oceanográficos y geofísicos afectan la superficie del mar en el espacio y en el tiempo (corrientes, mareas, meteorología...) pudiendo estudiarse su evolución espacio-temporal utilizando técnicas altimétricas. El satélite TOPEX-POSEIDON puede actualmente, utilizando para definir su órbita los programas ZOOM y GEODYN, medir la variación de la topografía del océano con precisión en el orden subdecimétrico. Tras una introducción a las técnicas y posibilidades actuales de la oceanografía espacial, se presenta un estudio altimétrico de la cuenca mediterránea y Golfo de Cádiz, utilizando los CD-ROMs distribuidos por la Agencia francesa AVISO y la programación de tratamiento desarrollada por los autores, incluyendo su aplicación a la variación del nivel del mar, entre 1993 y 1995, en puntos seleccionados del área de estudio.

ABSTRACT

Oceanographic and geophysics features acts over sea surface producing changes in its topography directly related with currents, tides, meteorology... being possible to record and study its spatio-temporal variations using satellite altimetry techniques including the subdecimetric level accuracy improved orbits, as produced by GEODYN and ZOOM softwares. After an introduction to the Spatial Oceanography present possibilities, the authors presents an study

of Mediterranean and Gulf of Cádiz sea level variation on selected points of the area between 1993 and 1995, using CD-ROMs of TOPEX-POSEIDON altimetry mission, as distributed by the french Agencia AVISO and the Software for its data treatment as developed by the authors.

1. LA OCEANOGRAFÍA ESPACIAL

Aun cuando ocupa el 80% de la superficie del planeta, el océano, por su inaccesibilidad y difícil observación, es la parte menos conocida de éste.

El lanzamiento de satélites para la observación de la superficie del mar, junto al desarrollo paralelo de las técnicas de tratamiento y evaluación de datos e imágenes, han puesto a disposición de los oceanógrafos, geodestas y geofísicos un medio excepcionalmente eficaz para abordar con nuevos medios y criterios el estudio del océano y Ciencias asociadas, en tiempo real, incluyendo la variación temporal de su comportamiento dinámico.

Podemos considerar, en términos generales, que la oceanografía espacial como nueva herramienta científica se desarrolló a partir de 1978 con el lanzamiento casi simultáneo de tres satélites: Tiros, Nimbus-7 y el Seasat, todos ellos equipados con instrumentos experimentales u operativos para el estudio del océano. Los dos primeros eran fundamentalmente satélites meteorológicos, pero el Seasat podía considerarse un satélite revolucionario en su diseño y objetivos, incorporando sistemas de detección de micro-ondas, capaces de operar en todas las condiciones atmosféricas (Radar de Apertura Sintética [SAR], Radar Altimetro y Difusómetro).

Los estudiosos del océano, que sólo contaban hasta entonces con observaciones desde boyas, buques y sistemas fondeados o a la deriva recibieron, de esta forma, la posibilidad de estudiar la superficie del mar desde el espacio y registrar las peculiaridades del medio marino y su influencia en el medio ambiente, clima y equilibrio planetario utilizando tres tipos de información vedados, hasta entonces, a los medios tradicionales:

- La obtención a partir de un solo sensor de información planetaria mantenida continuamente a lo largo de años evitando, de esta forma, un despliegue gigantesco de instrumentación “in situ”.
- Los satélites proporcionaban una visión sinóptica instantánea de una vasta zona de la superficie marina, imposible de plantear y obtener por otros medios, dada la continua variabilidad que caracteriza al medio oceánico.
- Algunas medidas, como el estudio en tiempo “quasi real” de la topografía del océano, sólo podían efectuarse correlacionando las medidas alti-

métricas desde satélites artificiales, con la información del geoide disponible tratando, posteriormente, la información por técnicas de Teledetección.

En esta situación, y desde 1978, las técnicas de oceanografía espacial han venido perfeccionándose presentando, actualmente, un importante papel en la investigación de los mares por medio de sus tres medidas básicas:

- Oleaje
- Inclinación de la superficie del mar (centímetros en distancias de 100 km).
- Color.

Los dos primeros parámetros están asociados con valores estrictamente superficiales, mientras que el color viene afectado por los últimos metros de las capas superficiales.

En su conjunto el comportamiento de estas tres medidas básicas permite obtener, a partir de medidas y observaciones superficiales, el comportamiento de las corrientes, la concentración de las especies, la evolución temporal de la dinámica del océano, las interacciones entre las capas de la estructura oceánica, la propagación de ondas internas, fenómenos de mesoescala, mareas, batimetría, geoide oceánico...

Puede considerarse que, en general, las medidas detectadas por un satélite no tendrían utilidad si no se conocieran los procesos físicos que se producen en la interacción de la radiación con la materia que compone las capas superficiales del océano y permitieran, de esta forma, extrapolar las medidas con modelos en profundidad.

La medida del color desde satélites exige, para su interpretación correcta, el conocimiento de los distintos factores que intervienen en el espectro. La asociación de la clorofila con el fitoplacton en el agua marina modifica la proporción del azul y el verde pudiendo interpretarse, mediante las adecuadas calibraciones, la proporción de clorofila en función del color detectado. Igualmente se puede correlacionar el color con la concentración de sedimentos en suspensión y, en aguas someras, con la profundidad y la batimetría.

A pesar de los problemas que presentan las frecuentes coberturas nubosas en los océanos, los detectores en el infrarrojo pueden proporcionar imágenes de la temperatura de la superficie marina de interés para detectar turbulencias oceánicas, la progresión de frentes, las interacciones entre masas de agua a diferentes temperaturas, las lenguas de agua de las desembocaduras de los grandes ríos o la existencia de masa de aguas costeras sin dispersarse que pueden añadir información sobre la distribución de los recursos vivos. Para estos estudios se han desarrollado diversos sensores sensibles a la radiación electromagnética en las distintas zonas del espectro, cubriendo

desde las longitudes de onda del ultravioleta hasta el infrarrojo térmico, impulsando el desarrollo de los sensores de empuje (CCD), la tecnología necesaria para su instalación en satélites y el envío de la información a los usuarios.

Parte de estos sensores son pasivos, como los radiómetros, que detectan la radiación natural procedente del océano (emitida debido a su propia temperatura o reflejada, de la recibida del Sol sobre su superficie o tras refractarse totalmente tras atravesar las primeras capas del mar).

Otros sensores son radares activos que emiten radiación desde el satélite hacia la superficie del océano en el espectro de las micro-ondas.

El Radar de Apertura Sintética sintetiza la órbita para generar una antena de longitud de kilómetros que permita obtener precisiones decamétricas en la observación del océano, analizando la radiación reflejada en la superficie del mar para deducir información de gran precisión sobre el oleaje, propagación de ondas internas, contaminación, batimetría en aguas someras...

Como es sabido el altímetro es un Radar que utiliza como observable el tiempo que un pulso emitido desde un satélite tarda en ser reflejado en la superficie del mar y registrado a bordo estimando, de esta manera con precisión centimétrica, la altura de la órbita del satélite sobre el océano deduciendo, además, del estudio de la forma del eco reflejado el oleaje lo que permite medir, en todas las condiciones atmosféricas, la altura de las olas junto a la velocidad y dirección del viento.

En las condiciones anteriores y caso de conocerse la órbita del satélite y el geoide, referidos con precisión centimétrica a un elipsoide internacionalmente aceptado, se podría conocer la topografía dinámica del océano y, por tanto, las corrientes geostroficas a un nivel global.

El Difusómetro es un Radar que permite observar, sobre grandes extensiones del océano, la intensidad media de las micro-ondas difundidas desde la superficie y recogidas en una antena oblicua, lo que permite medir el oleaje producido por la acción del viento deduciendo, de esta forma, los vientos superficiales sobre vastas extensiones con una precisión que no alcanzan los buques ni los satélites meteorológicos.

Como vemos el desarrollo de las técnicas relacionadas con los satélites permiten hoy detectar sobre el océano los vientos de superficie, la temperatura superficial, el oleaje, la producción primaria (fitoplacton por ejemplo), la extensión de las capas de hielo en zonas inaccesibles, la evolución de los remolinos de mesoescala, etc., información considerada hoy primordial para adquirir los conocimientos que exigen los modelos de intercambio térmico y dinámico entre la atmósfera y el océano relacionados con el estudio y la predicción del cambio climático a nivel mundial.

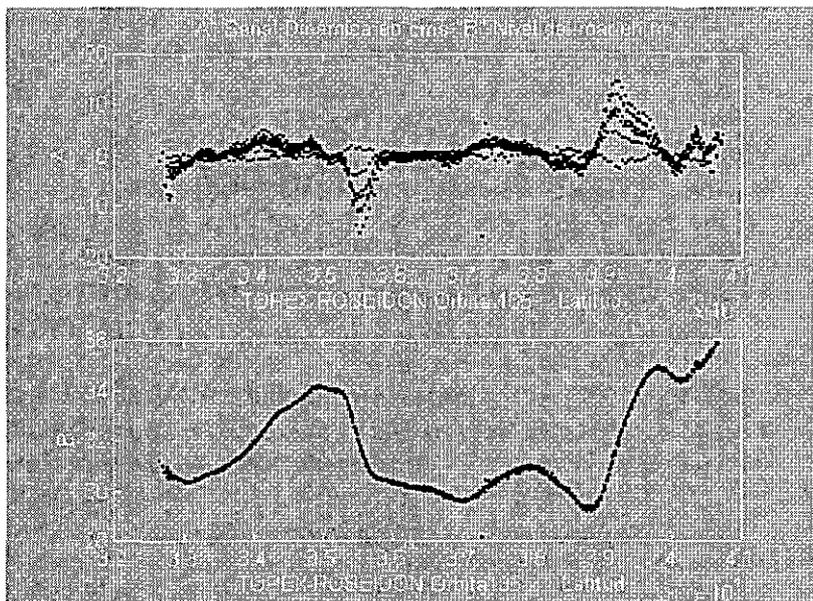


Figura 1. En la figura "B" puede observarse la variación del nivel medio del mar en el perfil n.º 135 de la órbita de TOPEX-POSEIDON que atraviesa la zona del sur de Italia hacia el Adriático (figura 4). Puede observarse la depresión que se registra en latitud 39°, relacionada con la variación del geode en el extremo de las zonas de subducción de la placa Egeo. En la figura "A" se presenta la variación de la superficie del mar, que alcanza -15 cm en latitud 35.5° N y +15 cm en latitud 39.5° N. Estas variaciones están probablemente relacionadas con la interacción de las corrientes profundas con los fuertes relieves en la batimetría del fondo marino, que se reflejan en los gradientes locales del Geode (figura B).

2. LA EVOLUCIÓN EN PRECISIÓN DE LOS SATÉLITES ALTIMÉTRICOS

Los fenómenos oceanográficos (corrientes, mareas, remolinos...) y geofísicos (zonas de fractura, traslados continentales...) afectan a la topografía de la superficie del océano en el espacio y en el tiempo no pudiendo efectuarse su detección por procedimientos altimétricos si las medidas realizadas no son exactas en el orden subdecimétrico. Todo lo anterior conlleva que sea necesario conocer el geode y la órbita del satélite, respecto al elipsoide de referencia, dentro del mismo orden de precisión.

El satélite TOPEX-POSEIDON fue lanzado por un cohete Ariane en agosto de 1992 y puesto en una órbita inclinada 66° con respecto al ecuador a una

altitud de 1.336 km en una misión cuya duración prevista era de 3 a 5 años. Para la determinación de su posición precisa el satélite cuenta con reflectores Láser y sistemas de posicionamiento radioeléctrico DORIS y GPS incorporando a su equipamiento científico dos radares altímetros: TOPEX de la NASA y el POSEIDON del Centro Nacional de Estudios Espaciales francés (CNES).

El elipsoide de referencia en la misión TOPEX-POSEIDON es el GRS80 con un semieje de 6378137 m y aplanamiento de 1/298.2572236 (Barlier et al., 1982). El posicionamiento de las estaciones Láser de seguimiento del satélite es el determinado por la Universidad Tecnológica de Delft (DUT), formando parte del Sistema Internacional de Referencia Terrestre (ITRF-92) (Boucher et al., 1993, Menard et al 1994).

El período de repetición de su órbita es de 10 días con el doble objetivo de establecer una cartografía de alta precisión de la superficie media de los océanos y estudiar la variación a largo y corto período de su superficie instantánea. La misión se inscribe en el marco de los estudios de la evolución global del clima y de su interacción con las corrientes oceánicas.

Para poder abordar estos objetivos y sus aplicaciones oceanográficas y geofísicas, que afectan a la superficie del mar, diversos investigadores han abordado la mejora local de la órbita del satélite para alcanzar una precisión en el orden de 5 a 10 cm en posición radial, desarrollándose paralelamente nuevos modelos dinámicos y numéricos de aplicación a su cálculo (Bonfond et al., 1992).

El CNES y el Goddar Space Fligh Center (GSGF-NASA) han desarrollado programas, a partir de los años 90, para mejorar la definición de los parámetros del campo gravitatorio terrestre y del modelo de fuerzas debidas al frenado atmosférico y a la presión de radiación solar sobre la plataforma concreta del satélite. La modelización de estos efectos es básica para poder determinar la dinámica del movimiento orbital del satélite y presenta características de alta complejidad técnica, en el caso del TOPEX-POSEIDON, al venir afectadas por los consumos de combustibles y los movimientos de los paneles solares que, eventualmente, se efectúan con la finalidad de proporcionar un máximo de energía a los sistemas del satélite.

Con independencia de la determinación precisa de la órbita ha sido necesario efectuar campañas para calibrar los radares altímetros del satélite. Estas campañas se han desarrollado utilizando las instalaciones de la plataforma petrolífera Harvest (California) y de Lampedusa, pequeña isla próxima a Sicilia (Christensen et al., 1994; Menard et al., 1994, Fu et al., 1994; Tapley et al., 1994; Yunk et al., 1994; Bonfond, 1994).

En mares regionales como el Mediterráneo, con una buena cobertura de estaciones Láser, es posible la utilización de técnicas de arco corto que permi-

ten situar al satélite con exactitud en el orden de los 2 cm en períodos de 10 a 20 minutos por procedimientos exclusivamente geométricos, en base a la posición de las estaciones Láser de la red de seguimiento y las distancias medidas por las estaciones de seguimiento (SLR).

El método de arco corto se basa en generar arcos de órbita de 2.000 a 4.000 km ajustando las observaciones telemétricas Láser por mínimos cuadrados y partiendo de la órbita de referencia facilitada por las Agencias (Sinclair, 1989; Bonnefond et al., 1992).

La órbita generada permite disminuir las dispersiones observadas en el nivel del mar registrado por las medidas altimétricas y facilitar, como se ha indicado, la calibración de los altímetros de las misiones TOPEX-POSEIDON y ERS-1, ERS-2.

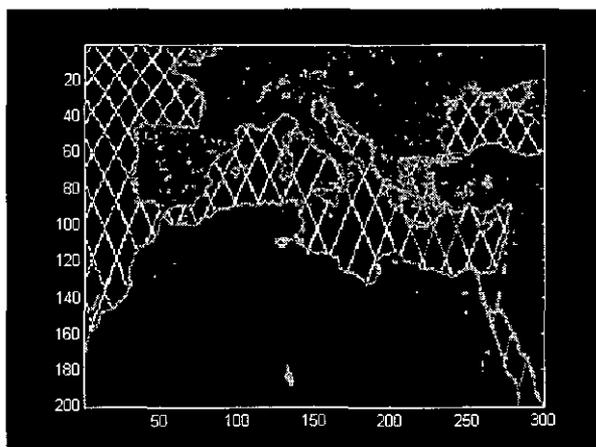


Figura 2. En la figura pueden observarse los puntos de corte de las órbitas del satélite TOPEX-POSEIDON sobre el Mediterráneo, Golfo de Cádiz y sus aperturas hacia el Atlántico Norte. El período de repetición de la órbita de 10 días, no permite una resolución espacial mejor que la separación entre sus órbitas y que en la latitud del Mediterráneo está en el orden de 300 km.

3. LA CUENCA MEDITERRÁNEA OCCIDENTAL

Es un hecho conocido la existencia en el Atlántico Norte de una estructura de agua diferenciada, a profundidad intermedia y con una mayor temperatura y salinidad, que puede eventualmente detectarse al oeste de la cordillera centro-atlántica, sobrepasando el norte del cabo Finisterre y al sur las Islas Canarias (Richardson et al., 1989; Reid, 1991).

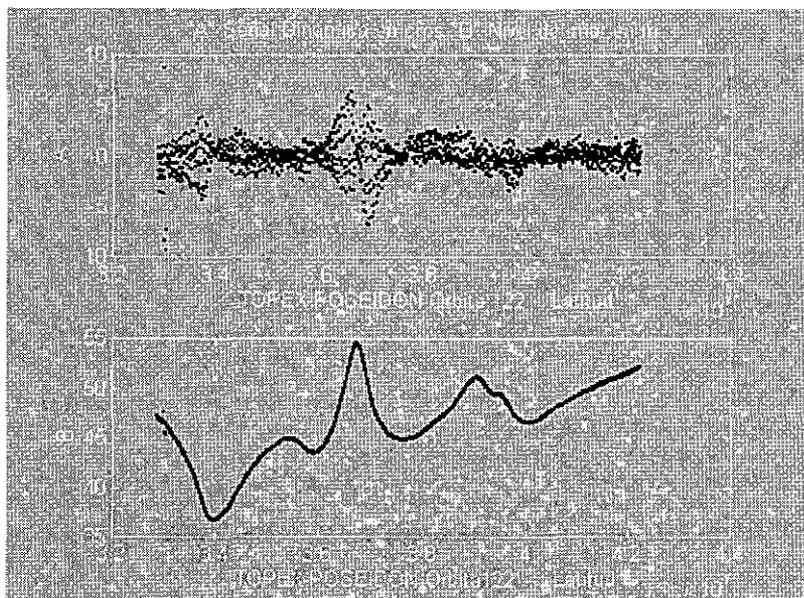


Figura 3. En la figura se presenta la variación del nivel del mar en el perfil nº122 (Figura 4) del satélite TOPEX-POSEIDON entre 21 de junio de 1993 y 21 de septiembre de 1993. Puede observarse la variación de la superficie del océano en el orden de 10 cm que se registra en esas fechas en latitud 37° N. Esta variación es probablemente debida a la formación de remolinos en la zona debido a la interacción de las corrientes profundas con los cañones y montañas submarinas en el entorno de los bajos de Gorringe, que se refleja en los fuertes gradientes que se registran en el Geoide marino. Para determinar la posible procedencia e identificación como agua mediterránea serían necesarios análisis “in situ” de la composición y características termo-halinas de estas masas de agua .

Estas aguas se originan en el Mediterráneo, cuenca marginal caracterizada en invierno por vientos fríos y secos predominantes del NW. La alta insolación de la zona facilita unas condiciones de vaporización que sobrepasan las aportaciones por lluvia y ríos haciendo que la cuenca mediterránea actúe de zona de concentración que transforma las aportaciones de agua atlántica, relativamente fría, en aguas cálidas y salinas que nuevamente penetran en el Atlántico a través del Estrecho de Gibraltar (Lacombe et al., 1982; Bryden et al., 1994; Candela et al., 1989).

Los estudios de la propagación del agua mediterránea en el Atlántico han permitido detectar la presencia de remolinos con dimensión de submesoescala identificados como agua mediterránea que se separan de los flujos principales, formando remolinos (MEDDIES), de alta salinidad y temperatura, con características termo-halinas claramente diferenciadas de las aguas atlánticas que los rodean.

La dimensión típica de los MEDDIES es de 50 km de diámetro, 600 a 800 m de dimensión vertical. Medidas efectuadas de la velocidad de rotación de los MEDDIES se encuentra en el orden de 30 cm/s (Armi et al., 1984) manteniendo su forma y características durante al menos dos años (Armi et al., 1989; Kase et al., 1989) y habiendo podido ser detectadas por técnicas altimétricas con el satélite GEOSAT (Stammer et al., 1991).

Actualmente se considera que los MEDDIES se forman por la interacción del agua mediterránea profunda con la batimetría de los cañones submarinos en el Golfo de Cádiz, debido a las inestabilidades que se originan en la corriente de agua mediterránea. Los MEDDIES pueden progresar hacia el Atlántico si evitan en su trayectoria la colisión con las montañas submarinas e islas que bordean las proximidades del Cabo San Vicente, que causan su difusión, aumentando la salinidad y temperatura de las aguas en esas zonas (Fiuza et al., 1990; Ambar et al., 1991; Tokos et al., 1994).

Hasta la fecha la misión TOPEX-POSEIDON ha permitido detectar la topografía del Mediterráneo, Golfo de Cádiz, Atlántico Norte durante tres años y registrar con precisión centimétrica su variación espacio-temporal apareciendo como un procedimiento altamente adecuado para detectar la dinámica marina en la cuenca mediterránea y la formación y evolución de variaciones espacio-temporales en la topografía de la superficie del océano, en la zona del Golfo de Cádiz y sus aperturas hacia el Atlántico.

4. ESTUDIO ALTIMÉTRICO DE LA CUENCA MEDITERRÁNEA

El estudio altimétrico se ha efectuado partiendo de la información facilitada por la Agencia francesa AVISO en CD-ROMs utilizando un "software" propio desarrollado por los autores.

El organigrama de tratamiento seguido lee la información del CD-ROM aplicando criterios de filtrado de datos y las correcciones geofísicas y ambientales al observable altimétrico (refracción, mareas, oleaje, meteorológicas...), ajustando la órbita con un polinomio para corregir de error radial y producir un fichero con la siguiente información:

– Latitud, longitud, Nivel del Mar corregido de error radial, Señal Dinámica del océano, Geoide, Batimetría.

Con los ficheros obtenidos se han desarrollado los programas para la generación de las imágenes que se presentan en las figuras de este trabajo, interpolando los valores entre los perfiles observados a lo largo de la proyección sobre el océano de la trayectoria de las órbitas.

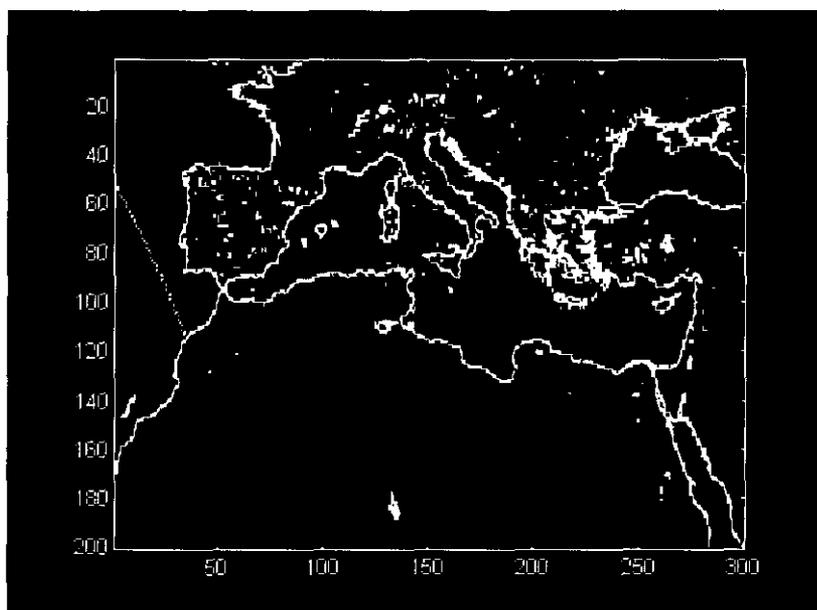


Figura 4. La figura presenta la situación geográfica de los perfiles 122 y 135, que se han analizado en las figuras 1 y 2. El perfil 122 atraviesa desde la costa de África hacia las proximidades del Cabo San Vicente sobrevolando la zona de los bajos de Gorringe, punto triple sobre la falla Azores-Gibraltar donde se produce la interacción de las placas africana, euroasiática y bloque ibérico, zona en la que se han registrado sismos de magnitud (8.4).

Con las precisiones alcanzadas por las técnicas espaciales, y en especial por el satélite TOPEX-POSEIDON, las medidas altimétricas pueden representar una posibilidad equivalente a la de mantener mareógrafos en océano abierto y cobertura global en las zonas sobrevoladas por el satélite. La limitación viene evidentemente impuesta por el hecho de que cuanto mayor es la cobertura espacial peor es la cobertura temporal, que como se ha indicado y para el caso del TOPEX-POSEIDON se ha limitado a una medida cada diez días.

Tabla 1. *Correspondencia entre los ciclos orbitales del satélite TOPEX-POSEIDON y las fechas en que se efectuaron. (Figura 4)*

MGB012	21 DICIEMBRE 1992
MGB021	21 MARZO 1993
MGB030	21 JUNIO 1993
MGB039	21 SEPTIEMBRE 1993

MGB048	21 DICIEMBRE 1993
MGB057	21 MARZO 1994
MGB066	21 JUNIO 1994
MGB075	21 SEPTIEMBRE 1994
MGB084	21 DICIEMBRE 1994
MGB093	21 MARZO 1995

BIBLIOGRAFÍA

- AMBAR I, FIUZA A., COSTA P. (1991). Time series of currents off Algarbe: Evidence of the formation of Meddies? Proceedings "International workshop on Outflows and Inflows in the Atlantic and their role in the Eastern boundary current system", Lisbon.
- ARMI L., FARMER. (1989). The flow of Mediterranean water through the Strait of Gibraltar. *Prog. Ocenogr.*, 21, 1-105.
- BONNEFOND P, EXERTIER P., BARLIER F., BOUDON Y. (1992). Regional orbit precision in the Mediterranean area. Proceedings of the first ERS-1 Symposium: Space at the Service of our environment, ESA SP-359, Volume II, 889-891, Cannes.
- BONNEFOND P, EXERTIER P. (1994). Cross analysis of TOPEX-POSEIDON and ERS-1 data in the Mediterranean. Proceedings of the Astrodynamics Symposium, Tokyo.
- BOUCHER C., ALTAMIMI Z., DUHEM L. (1993). ITRF92 and its associated velocity field. IERS Technical note 15, Observatoire de Paris.
- BRYDEN H., KINDER T. (1991). Recent Progress in Strait Dynamic *Rev. Geophy., Suppl.*, 617-631.
- CANDELA J., WINANT C., BRYDEN H. (1989). Meteorologically forced subinertial flow through the Stait of Gibraltar. *J. Phys. Oceanog.*, 94, 12667-12674.
- CHRISTENSEN, E., HAINES B. (1994). Calibration of TOPEX-POSEIDON at Harvest platform. *J. Geophysical Research (Oceans)*, Topex-Poseidon Special issue.
- FIUZA A., AMBAR Y., DIAS J. (1990). Variability on slope currents off Sothern Portugal and the formation of Meddies. *Proc. XV ENERAL assembly of the European Geophysical Society*. Copenhagen.
- FU L., CHRISTENSEN M., LEFEBRE M., MENARD Y. (1994). TOPEX-POSEIDON Mission overview. *J. Geophysical Res. (Oceans)* Topex-Poseidon Special issue.
- LACOMBE H., RICHEZ C. (1982). The regime of the Strait of Gibraltar. *Hdrodynamic of semi-enclosed seas*. Elsevier, 13-73.

- MÉNARD Y., JEANSOU E., VINCENT P. (1994). Calibration of the TOPEX-POSEIDON altimeters. Additional results at Harvest. *J. Geophysical Res. (Oceans) Topcx-Poseidon special issue.*
- RICHARDSON P., WALSH D., ARMI, SHRODER, PRICE J. (1989). Tracking three Meddies with SOFAR floats. *J. Phys. OCEAN.*, 19, 371-383.
- SINCLAIR A. (1989). The determination of orbit corrections by the short arc techniques, with application to ERS-1. *Manuscripta Geodetica*, 14, 238-246.
- TAPLEY B., RIES J., EANES B. (1994). Precision orbit determination for Topex-Poseidon. *J. Geophysical Res. (Ocean) Spetial issue.*
- TOKOS K., HINRICHEN, ZENK. (1994). Merging and migration of two Meddies. *J. Geoph. Ocean.*, 24, 2129-2141.
- YUNK T., BERTIGER W. (1994). First assesment of GPS based reduced dynamic orbit determination on Topex-Poseidon. *Geophysical Res. letters*, Vol. 21, N.º 7, 541-544.