

## APLICACIONES DE LA TELEDETECCIÓN A LA OCEANOGRAFÍA. EL ESTUDIO POR TÉCNICAS ALTIMÉTRICAS DE LA DIFUSIÓN DEL AGUA MEDITERRÁNEA EN EL OCÉANO ATLÁNTICO

Gómez-Enri J.(\*)-Camacho J.C.(\*)-Muñoz-Nieves S.(\*)-Villares P.(\*)-Rojas J.L.(\*\*) -Catalán M.(\*)-Catalán M.M.(\*)

(\*) Departamento de Física Aplicada, Universidad de Cádiz. Polígono Río S.Pedro s/n Puerto Real, CÁDIZ, España.

(\*\*) Departamento de Ingenierías de Sistemas y Automática, Universidad de Cádiz. c/Chile s/n, CÁDIZ, España.

**ABSTRACT:** *The outflow of mediterranean water into the Atlantic from the Strait of Gibraltar passes through the Gulf of Cadiz. The high salinity Mediterranean water spreads out from this Gulf towards the surroundings of the Portuguese coasts arising eventually as eddies, formed in instabilities arising in these undercurrent waters along the submarine bathymetry of the Atlantic Portuguese coasts. The Mediterranean outflow provides in these way a source of warm salt water to intermediate depths with influence in the north Atlantic water masses. Present accuracies of satellite Teledetection methods (altimetry, SAR and radiometer) open new possibilities for the study of MEDDIES formation and evolution. On these line present work propose a new method for studying the possibility to detect and track MEDDIES, using ERS and TOPEX-POSEIDON Satellites Altimetry, in connexion with classical oceanographic methods.*

### 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 al norte el cabo Finisterre y al sur las Islas Canarias [1, 2].

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 [3, 4].

Los estudios de la propagación del agua mediterránea en el Atlántico han permitido (mediante el seguimiento de flotadores a la deriva y el análisis con los medios oceanográficos tradicionales de las masas de agua) 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 termohalinas claramente diferenciadas de las aguas atlánticas que los rodean.

La dimensión típica de los MEDDIES oscila entre los 50 y 100 kms de diámetro, y los 600 a 800 m de dimensión vertical. Medidas efectuadas "in situ" de la velocidad de rotación de los MEDDIES indica que se encuentra en el orden de 30 cm/s [5] manteniendo su forma y características durante al menos dos años [6, 7] habiendo podido detectarse, por procedimientos de teledetección, utilizando técnicas altimétricas con el satélite GEOSAT [8].

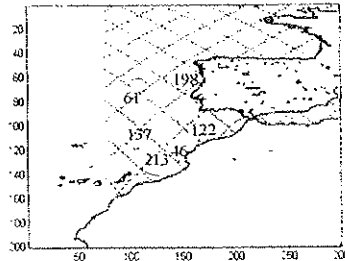
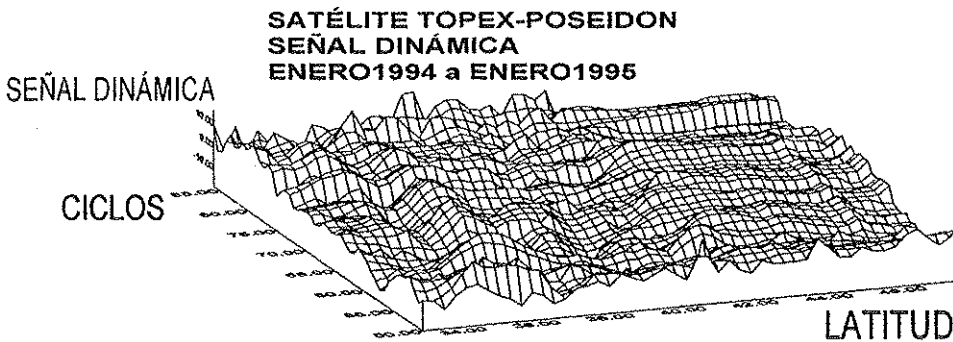


Figura 1: órbitas del SATÉLITE Topex-Poseidon que sobrevuelan la zona de estudio a poniente del Golfo de Cádiz.

### ESTUDIO ALTIMÉTRICO DE LOS REMOLINOS DE AGUA MEDITERRÁNEA EN EL ENTORNO ATLÁNTICO DE LA PENÍNSULA IBÉRICA.

En 1992 inició el satélite ERS-1 (ESA) su periodo de repetición de 35 días el TOPEX-POSEIDON (NASA-CNES) su ciclo de 10 días y en 1995 el ERS-2 (ESA) de características técnicas similares al ERS-1. Todos estos satélites se encuentran dotados, entre otros sensores, con altímetros de precisión sub-decimétrica y sistemas de seguimiento del mismo nivel de precisión (ERS1, ERS2: LASER, PRARE, TOPEX-POSEIDON: DORIS, LASER, GPS) [9].

Tras cinco años de operatividad estos satélites han mostrado, prácticamente, el potencial de



*Figura 2.- En la órbita 122 del satélite Topex-Poseidon puede observarse la variación del nivel del mar entre las latitudes 35° a 38° entre los ciclos 52 a 60 y 65 a 75 y entre las latitudes 40° a 42° entre los ciclos 58 a 62 y 65 a 75. Con la utilización exclusiva de los altímetros no puede afirmarse que las variaciones del nivel del mar sean debidas a la presencia de MEDDIES. La confirmación requiere el estudio de las variaciones detectadas con imágenes de satélite en el infrarrojo térmico (AVHRR (NOAA), ATSR (ERS-1/2) y medidas "in situ" de temperatura, salinidad y seguimiento de RAFOS.*

la teledetección para el estudio de la dinámica y termodinámica del océano utilizando técnicas altimétricas, confirmando la necesidad de suplementar la información medida por los satélites, con medidas "in situ" por métodos oceanográficos clásicos. El conjunto de ambas medidas ha permitido confirmar el significado físico de la señal teledetectada y extrapolar la observación espacial, limitada a la superficie, hacia la profundidad del medio marino, permitiendo el desarrollo de los modelos dinámicos en tres dimensiones, necesarios para potenciar las posibilidades de las predicciones oceanográficas.

Los pasos fundamentales para la incorporación definitiva de estos procesos se encuentra, no sólo en los desarrollos instrumentales a bordo del satélite, sino en la capacidad de progresar en el proceso masivo de los datos, intercambio de la información, desarrollo de modelos numéricos con resolución global de mesoescala, modelos de fuerzas y la generación de bancos de datos que incorporen los resultados de todas estas técnicas.

#### **LA VARIACIÓN ESPACIO TEMPORAL DE LOS REGISTROS ALTIMÉTRICOS**

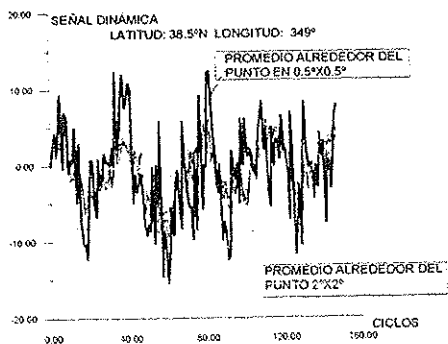
Con la finalidad de conocer las posibilidades de la utilización conjunta de los métodos espaciales (altimetría) y clásicos para la detección de la formación y trayectoria de los remolinos de agua mediterránea en el Atlántico el grupo IOCEANO, de la Universidad de Lisboa, ha facilitado a nuestro grupo la trayectoria de diversos flotadores a la deriva, seguidos frente a la costas portuguesas entre 1992 y 1994.

La metodología desarrollada se basa en la detección con los altímetros radar de los satélites de la variación en el nivel del mar producido por los posibles remolinos de agua mediterránea, respecto a la superficie del océano en equilibrio, considerando como tal el modelo de superficie media del océano OSU-MSS95 [10], obtenida al eliminar las variaciones anual, semianual, estacionales y espureas promediando la altimetría obtenida durante la misión TOPEX-POSEIDON, un año del ciclo de 35 días del ERS-1, el primer ciclo de 168 días del ERS-1 y un año del GEOSAT.

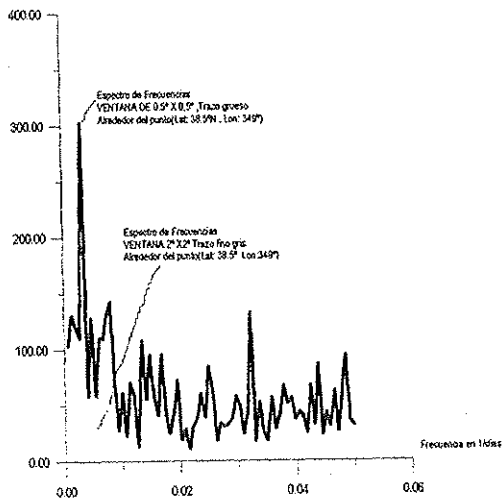
Para tratar de detectar por medios altimétricos la generación y evolución de los MEDDIES se han generado, para los perfiles de los satélites TOPEX-POSEIDON, ERS-1 Y ERS-2 las series temporales de la señal dinámica registrada entre Octubre de 1992 y Octubre de 1995, en el rectángulo comprendido entre las longitudes 340° a 353° y latitudes Norte 36° y 40° donde se han detectado MEDDIES utilizando métodos lagrangianos y confirmado su presencia por el análisis de sus masas de agua. En la *Figura 1* se representan las órbitas del Topex-Poseidon que sobrevuelan la zona.

En la *Figura 2* se presenta la serie temporal de la órbita 122 del TOPEX-POSEIDON, que atraviesa la zona donde se ha detectado la presencia de MEDDIES pudiendo observarse la variación, entre los ciclos 50 y 90 de la señal dinámica calculada restando la superficie de equilibrio OSUMSS95 a las medidas altimétricas corregidas de marea oceánica incluyendo el efecto de su peso, marea terrestre, barómetro invertido, efecto de las olas, marea polar y correcciones troposférica e ionosférica [11, 12, 13].

En la *Figura 3* se presenta la variación del nivel medio del mar entre Octubre de 1992 (ciclo 2) y Octubre de 1996 (ciclo 148) obtenidos en una serie de cuadrados de dimensión creciente ( $0.5^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $3^\circ$ ,  $4^\circ$ ), alrededor del punto donde se han detectado frecuentes MEDDIES (latitud:  $38.5^\circ$  N y longitud:  $349^\circ$  W). Puede observarse la gran variación que se registra en la señal dinámica cuando el promedio se efectúa abarcando  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  alrededor del punto seleccionado. Las distintas ventanas actúan como filtros de paso bajo, dejando pasar aquella información que por su extensión abarca o supera el tamaño de la ventana. El hecho de que la variación disminuya al extender la zona que abarca la ventana sugiere una posible correlación entre la variación del nivel medio detectado y la presencia de remolinos de extensión en el orden de  $0.5^\circ$ , alrededor del punto de estudio. Lo anterior se manifiesta al estudiar la variación del espectro de frecuencias del nivel del mar al ir extendiendo la zona de análisis alrededor del punto de latitud:  $36^\circ$  y longitud:  $348^\circ$ . La aparición en el espectro de más altas frecuencias en la variación del promedio obtenida en el entorno de  $0.5^\circ$ , alrededor del punto de estudio sugiere la existencia de remolinos que aparecen y desaparecen con periodicidad más alta, que pudieran estar relacionados con la presencia de MEDDIES.



*Figura 3.- La Figura presenta el promedio de la variación de la señal dinámica en dos cuadrados, uno de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  y otro de  $2^\circ \times 2^\circ$ , alrededor del punto  $38.5^\circ$  N y  $349^\circ$  W en que se ha detectado la presencia de MEDDIES, por procedimientos clásicos. Puede observarse la altavariación de  $\pm 15$  cms. que se detecta en la señal dinámica cuando el promedio se efectúa en un cuadrado de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  y la disminución que aparece, en los términos de corto periodo, al extender el promedio a  $2^\circ \times 2^\circ$ , que deja visible la variación estacional de la señal dinámica.*



*Figura 4.- El espectro de frecuencia evaluado a lo largo de los 148 primeros ciclos del TOPEX-POSEIDON en el punto de latitud:  $38.5^\circ$  N y longitud:  $349^\circ$ , muestra que al aplicar una ventana de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  aparece como componente principal, la frecuencia de periodo anual, con picos semianuales, trimestral y un pico claro de periodo próximo al mensual, posiblemente relacionado con fenómenos asociados a remolinos de extensión próxima al grado, pues no se encuentran presentes al aplicar el filtro que introduce la ventana de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ .*

Del estudio realizado se puede deducir que es posible el seguimiento de la generación, y evolución por medios altimétricos de los remolinos que se forman por la interacción del agua mediterránea profunda con la batimetría de los cañones submarinos en las salidas atlánticas del Golfo de Cadiz. Se considera, sin embargo, que la alta complejidad de los fenómenos relacionados con estos remolinos de dimensión inferior a los fenómenos de mesoescala, exige, para su confirmación el apoyo de otros medios adicionales, tanto espaciales (altimetría, radiómetro, SAR) como medidas "in situ" (RAFOS, identificación de las características físico-químicas, biológicas de las masas de agua) para comprobar que, estos remolinos se deben al afloramiento de agua mediterránea y la posibilidad de su progreso hacia el Atlántico, si evitan en su trayectoria la colisión directa con las montañas submarinas que bordean las proximidades del Cabo San Vicente y causan su difusión, aumentando la salinidad y temperatura de las aguas en esas zonas [14, 15, 16, 17].

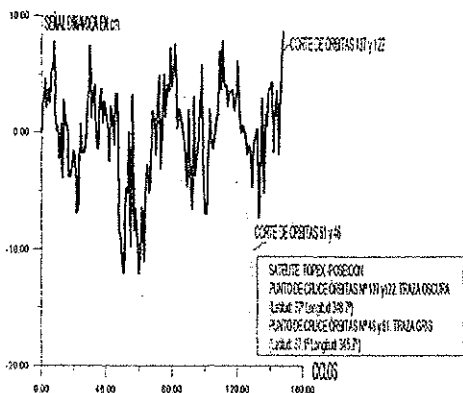


Figura 5: Se presenta el promedio de la variación de la señal dinámica del mar en los puntos de corte del Satélite Topex-Poseidon, en la zona donde se han detectado MEDDIES con RAFOS. Los puntos de corte de las órbitas seleccionadas se encuentran situados en ( lat: 37.1ºN lon: 348.7), correspondiente a las órbitas 122 y 137 y (lat: 37.1ºN y lon: 345.7º), correspondiente a las órbitas 46 y 61. Puede observarse la diferencia que se detecta entre los ciclos 42 y 59, en que se detecta una mayor depresión en el punto de corte de las órbitas 122 y 137. Entre los ciclos 110 y 130 se detecta una fuerte depresión en el punto de corte de las órbitas 46 y 61. Ambas variaciones pueden estar relacionadas con la presencia de remolinos con una extensión superior a la de la ventana de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  que se ha aplicado.

#### AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen al programa de acciones integradas su apoyo a través de la acción 182B, a la Agencia AVISO la información facilitada sobre las observaciones del satélite TOPEX, a la Agencia Espacial Europea la información sobre el satélite ERS1 y ERS2 dentro del programa A02.E101, y a IOCEANO de la Universidad de Lisboa el acceso a la información sobre los RAFOS en el entorno de las costas atlánticas portuguesas facilitados dentro del Proyecto Europeo CANIGO.

#### BIBLIOGRAFIA

[1] Richardson P., Walsh D., Armi L., Schroder M., Price JF., 1989 "Tracking three Meddies with SOFAR Floats" *J. Phys. Oceanography*, 19, 371-383  
 [2] Ambar I., 1983 "A shallow core of mediterranean water off western Portugal" *Deep Sea Res.*, 30(6A), 677-680  
 [3] Lacombe H., Richez C., 1982 "The regime of Gibraltar Strait" in "Hydrodynamic of Semienclosed Seas" (ed J. Nihoul), Elsevier 13-73.

[4] Candela J., Winant C., Bryden H.; 1989 "Meteorologically forced subinertial flow through the Strait of Gibraltar" *J. Phys. Oceanog.*, 9, 12667-12674.  
 [5] Armi L., Zenk W., 1984 "Large lenses of highly saline mediterranean water" *J. Phys. Ocean.* 14., 1560-1576.  
 [6] Armi L., Farmer D., 1989 "The flow of mediterranean water trough the Strait of Gibraltar" *Prog. Ocean.*, 21, 1-105.  
 [7] Kase R., Beckmann A., Hinrichsen H., 1989 "Observational evidences of salt lenses formation in the Iberian Basin" *J. Geoph. Res.* 94(C4), 4905-4912  
 [8] Stammer D., Hinrichsen H., Kase R., 1991 "Can Meddies be detected by satellite altimetry?" *J. Geoph. Res.* 96 (C4), 7005-7014.  
 [9] Tapley B., Ries J., Eanes B., 1994 "Precision orbit determination for Topex-Poseidon" *J. Geophysical Res. (Ocean) Special issue*.  
 [10] Rapp R.H., Nerem R., 1995 "Geoid undulations and mean sea level recommendations in minutes of TOPEX-POSEIDON Science working team minutes of may 1995" *Jet Propulsion Lab. JPL D-12817*, August 15.  
 [11] Catalán M. M., 1996 "Aplicaciones geofísicas de la altimetría espacial". *Avances en Geodesia y Geofísica Vol 1*, IGN, NIPO 162-96-011-X, pp 55-73.  
 [12] AVISO 1992 "AVISO Handbook: Merged TOPEX-POSEIDON Products" *AVI-NT-02-101-CN* Edition 2.1.  
 [13] CERSAT, 1993 "Altimeter products user manual" *CI-EX-MUT-A21-01-CN*.  
 [14] Fiuza A., Ambar I., Dias J., 1990 "Variability on slope currents off Southern Portugal and the formation of Meddies" *XV General Assembly of the European Geophysical Society*, Copenhagen.  
 [15] 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"*, Lisboa.  
 [16] Tokos K., Hinrichsen H., Zenk W., 1994 "Merging and migration of two Meddies" *J. Geoph. Res.*, 24, 2129-2141.  
 [17] Madelain F., 1970 "Influence de la topographie du fond sur l'écoulement Méditerranéen entre le détroit de Gibraltar et le Cap Saint Vincent" *Cahiers Oceanogr.*, 22(1), 43-61.