

## **ANÁLISIS DE DATOS ALTIMÉTRICOS EN EL MEDITERRANEO OCCIDENTAL MEDIANTE FUNCIONES ORTOGONALES EMPIRICAS COMPLEJAS**

C. Bouzinac

*Institut de Ciències del Mar CSIC, P. Joan de Borbó s/n 08039 Barcelona, tel: 93 2216416 fax: 93 2217340, e-mail: cath@masagran.icm.csic.es*

J. Vázquez

*Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, USA, e-mail: jv@pacific.jpl.nasa.gov*

J. Font Ferré

*Institut de Ciències del Mar CSIC, Barcelona, e-mail: jfont@masagran.icm.csic.es*

**RESUMEN.-** Datos altimétricos de los satélites ERS1 y TOPEX/POSEIDON han sido utilizados para estudiar la dinámica de mesoescala en dos regiones del sur del Mediterráneo. La descomposición en Funciones Ortogonales Empíricas Complejas (CEOF) permite describir un conjunto de series temporales de datos mediante modos de oscilación independientes entre sí, incluyendo información de propagación de señales en el dominio espacial. Se ha aplicado el análisis CEOF a mapas de anomalías del nivel del mar construidos a partir de dos años de datos del altímetro del ERS1 en el mar de Alborán y de un año de datos integrados ERS1 y TOPEX/POSEIDON en la cuenca Argelina. Los resultados permiten extraer las principales pautas de variabilidad de los fenómenos oceanográficos de escala regional y mesoescala en ambas zonas.

**ABSTRACT.-** Altimeter data from ERS1 and TOPEX/POSEIDON satellites have been analyzed to study mesoscale dynamics in two regions of the southern Mediterranean sea. Complex Empirical Orthogonal Functions (CEOF) decomposition allows a description of a set of time series by means of independent modes, including propagating features in the spatial domain. CEOF analysis has been applied to sea level anomalies maps generated from two years of ERS1 altimeter data in the Alboran sea, and one year of merged ERS1 plus TOPEX/POSEIDON data in the Algerian basin. The main variability patterns of oceanographic regional and mesoscale phenomena have been extracted in both areas.

### **1.- INTRODUCCION: ALTIMETRIA OCEANOGRAFICA**

Las variaciones de la superficie del mar están asociadas, entre otros factores, a las corrientes marinas. Las grandes corrientes oceánicas, que se encuentran prácticamente en equilibrio geostrofico, sufren variabilidad tanto temporal como espacial que genera meandros y remolinos. Dicha variabilidad de mesoescala se refleja en alteraciones de la superficie que, si son suficientemente intensas, pueden detectarse con un altímetro desde satélite. Durante los años 80, el altímetro del GEOSAT fué usado por diversos autores para estudiar la dinámica del Gulf Stream en el Atlántico norte (Fu et al., 1987; Le Traon et al., 1990; Zlotnicki, 1991), uno de los más importantes y más estudiados fenómenos del océano mundial. La aparición y propagación durante meses de remolinos de mesoescala (anillos de agua fría en el mar de los Sargazos o de agua caliente en el norte) tiene unas características

idóneas para ser seguida por altímetro.

Con el lanzamiento de los satélites ERS1 y TOPEX/POSEIDON a principios de los 90, se inició la posibilidad de realizar estudios altimétricos en el mar Mediterráneo. Las mejoras técnicas de estos altímetros respecto a instrumentos anteriores permiten una resolución horizontal y vertical ya suficientes para obtener resultados significativos en esta cuenca semicerrada y con variaciones del nivel del mar mucho menores que en los grandes océanos, ya que las corrientes marinas son en este caso mucho más débiles. Los primeros trabajos publicados (Vázquez et al., 1995; Larnicol et al., 1995) indican que es posible detectar la presencia de fenómenos de mesoescala, de dimensiones características del orden de decenas de kilómetros, que anteriormente se habían observado con medidas *in situ* o mediante imágenes infrarrojas.

## 2.- FUNCIONES ORTOGONALES EMPIRICAS COMPLEJAS

La descomposición en Funciones Ortogonales Empíricas (EOF) es un método de análisis comunmente usado en oceanografía y meteorología (Preisendorfer, 1988) que permite describir un conjunto de series temporales de datos, registradas en puntos distintos pero unidas por una dinámica común, por diversos modos de oscilación independientes entre sí, que explican las pautas de variabilidad del conjunto de los datos analizados. Debido al ruido normalmente presente en los datos altimétricos, un método como éste permite extraer las señales dominantes en una serie temporal de medidas del nivel del mar. Pero mientras las EOF reales sólo pueden usarse para detectar ondas estacionarias, las Funciones Ortogonales Empíricas Complejas (CEOF) son capaces de proporcionar información sobre la propagación de las señales en el dominio espacial estudiado (Horel, 1984). El método de las CEOF ya fue aplicado con éxito en el estudio altimétrico del Gulf Stream con el GEOSAT (Vázquez, 1993). Para construir las CEOF a partir de un conjunto de series temporales medidas en distintos puntos de una malla bidimensional regular, se construye primero la matriz de covarianza espacial. La diferencia con las EOF estriba en que las series son complejas, con la parte real igual a los datos medidos y la parte imaginaria su transformada de Hilbert, calculada a partir de los coeficientes de Fourier. La matriz de covarianza resulta hermítica y en consecuencia los valores propios de la matriz son reales y expresan el porcentaje de variabilidad explicada por cada modo. Los vectores propios son complejos, entonces un modo propio puede representarse por una amplitud y una fase temporales y una amplitud y una fase espaciales. La pendiente de la fase temporal es una medida de la frecuencia instantánea, mientras que el gradiente bidimensional de la fase espacial es una medida de la longitud de onda en los dos ejes.

## 3.- APLICACION AL MAR DE ALBORAN

Como parte del proyecto EUROMODEL del programa MAST de la Unión Europea, se ha realizado un primer estudio en el mar de Alborán con datos del ERS1 de Febrero 1992 a Diciembre 1993, orbitando con un ciclo de 35 días (Vázquez et al., 1995). Se eligió esta cuenca por la alta variabilidad espacial de sus dos típicos giros anticiclónicos.

Para realizar el análisis se extrajo del conjunto de datos del satélite los fragmentos de trazas correspondientes al área de estudio (de 35°N a 38°N en latitud y de 6°W a 0° en longitud), aplicándoles las correcciones ambientales habituales. El geoid y la parte estacionaria del nivel del mar se eliminaron interpolando una superficie media a lo largo de cada traza (spline bi-cúbico) y restándola del valor de la elevación en cada punto. Para eliminar la señal de las mareas, se ha usado un modelo de simulación (Canceill et al., 1995). Para corregir el error

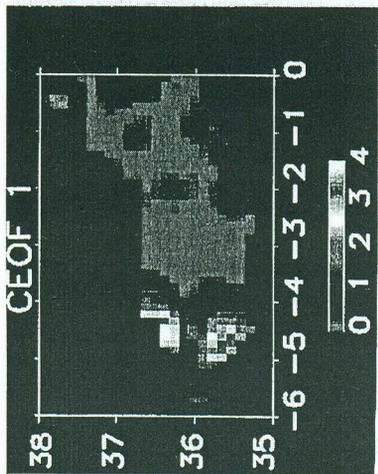


Figura 1a.- Amplitud (normalizada) y fases espaciales del primer modo en la cuenca de Alborán (C. 13)

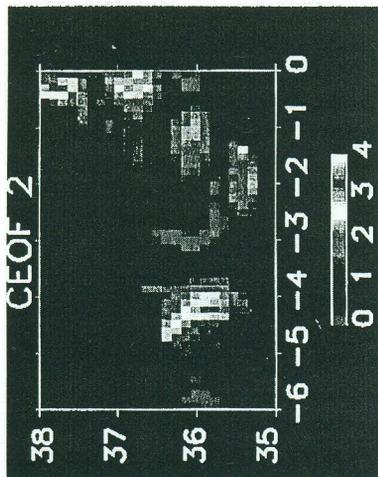


Figura 1b.- Amplitud (normalizada) y fases espaciales del segundo modo en la cuenca de Alborán

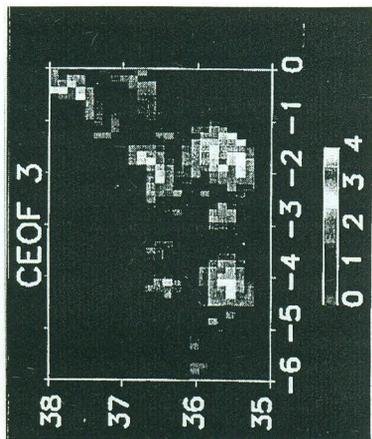


Figura 1c.- Amplitud (normalizada) y fases espaciales del tercer modo en la cuenca de Alborán

orbital, los mejores resultados se obtuvieron mediante una aproximación lineal. Después se confeccionaron los mapas del nivel residual del mar sobre una malla regular de 8 puntos por grado de latitud y de longitud, con una interpolación espacio-temporal y unos pesos en función de un análisis de escalas de la dinámica de la región objeto de estudio. Así se han creado 70 mapas, cada 10 días, que constituyen el conjunto de series temporales analizadas por CEOF en este caso concreto. El estudio, por tanto, se ha realizado sobre anomalías del nivel del mar (variabilidad) y no sobre niveles absolutos, al no poder disponer de valores precisos del geoides que hubieran permitido dejar la señal correspondiente a fenómenos oceanográficos estacionarios.

El resultado del análisis muestra que los tres primeros modos explican el 70% de la variabilidad total. El primer modo (45%) está asociado a cambios en la entrada de agua atlántica por el estrecho de Gibraltar, indicando la formación de una onda estacionaria en el área del giro occidental de Alborán y una diferencia de fase entre dos máximos de amplitud, lo que puede significar la presencia de un remolino ciclónico en su borde norte (fig. 1a). El segundo (18%) aparece asociado a un máximo estacionario en dicho giro y muestra áreas de distinta vorticidad a ambos lados del frente Almería-Orán (fig. 1b). El tercer modo (7%) indica una señal propagándose hacia el oeste en la zona de formación de la corriente Argelina (fig. 1c). Todos estos rasgos son perfectamente coherentes con los conocimientos previos sobre la dinámica de la cuenca de Alborán (Viúdez et al., 1995). Pero el intervalo de tiempo de repetición de órbita de ERS1 de 35 días no permite un seguimiento de la evolución temporal de ambos giros, aspecto muy importante de dicha dinámica regional.

#### 4.- APLICACION A LA CUENCA ARGELINA

El nivel del mar Mediterráneo ha sido estudiado con los datos altimétricos del satélite TOPEX/Poseidon (Larnicol et al., 1995) pero la distancia entre dos trazas en estas latitudes es de 225 km, demasiado grande para observar la circulación marina en las pequeñas cuencas mediterráneas. Los remolinos Argelinos han sido claramente detectados pero no se han podido ver sus evoluciones espaciales. Entonces, para una mejor resolución temporal y espacial, se han juntado los datos de ERS1 (con un ciclo de repetición de 35 días y una distancia intertraza de 50 km) y de TOPEX/POSEIDON (con un ciclo de repetición de 10 días y una distancia intertraza de 225 km) para estudiar la dinámica del nivel del mar en la cuenca Argelina donde los remolinos de mesoescala son de gran importancia en la circulación de las diferentes masas de agua (Millot et al., 1990). El conjunto de datos ha sido procesado y distribuido por CLS (Collection Localisation Satellites) en Toulouse (Francia). Los datos de ambos satélites han sido juntados sobre un período común que empieza en octubre de 1992 y acaba en diciembre de 1993. La mayor precisión orbital del TOPEX/POSEIDON permite, aprovechando los solapamientos, una corrección de los datos ERS1 mucho mejor que cuando se usan datos solamente de este satélite. Los niveles residuales del mar están calculados como diferencias con el nivel medio anual. Se han construido mapas sobre una malla regular de 0.2° (entre las latitudes 35°N y 40°N y entre las longitudes 0° y 15°E) y cada 10 días mediante un análisis objetivo espacio-temporal.

Los resultados del análisis CEOF en esta región dan dos modos dominantes que representan respectivamente el 80% y el 5% de la varianza total. La fase temporal del primer modo (fig. 2a) tiene una frecuencia constante de un ciclo por año y corresponde a las variaciones estacionales observadas en todo el mar Mediterráneo. Su amplitud máxima se localiza en la parte sur del canal de Cerdeña y al sur del estrecho de Sicilia (fig. 3a). La fase y la amplitud temporal del segundo modo (fig. 2b) se caracterizan por un periodo de seis meses. Este modo parece asociado a la variabilidad de la corriente Argelina, por las isoclinas de la fase espacial

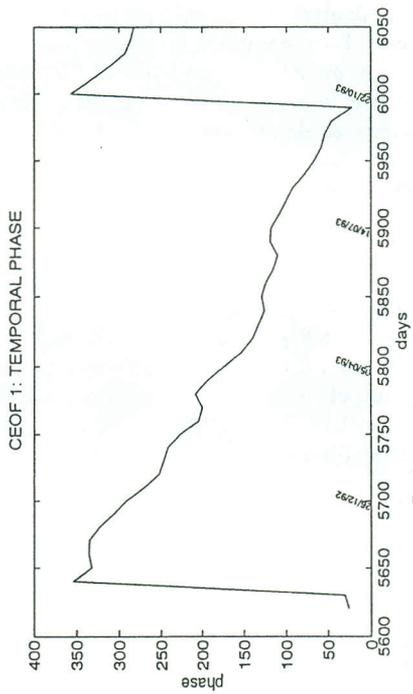
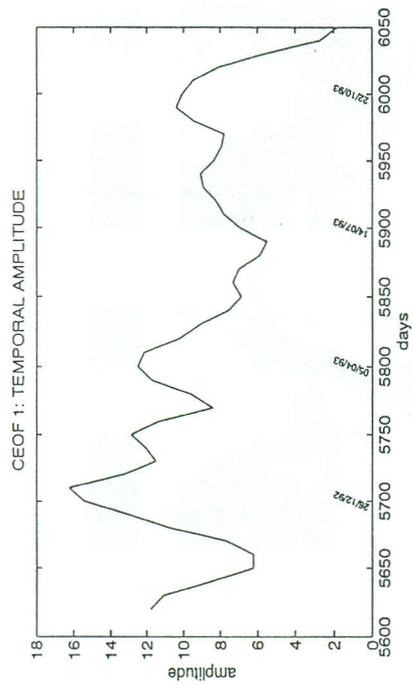


Figura 2a.- Amplitud (normalizada) y fases temporales del primer modo en la cuenca Argentina

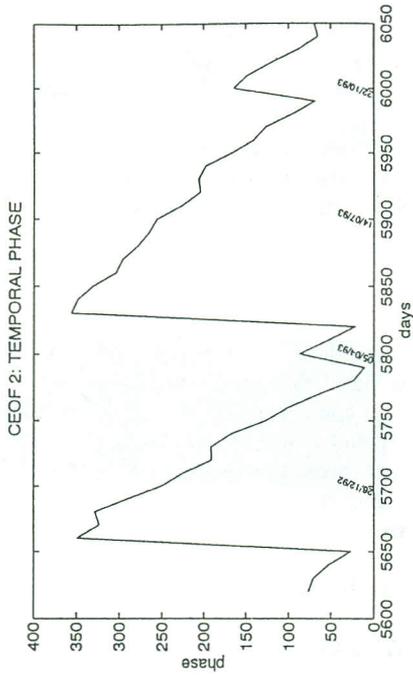
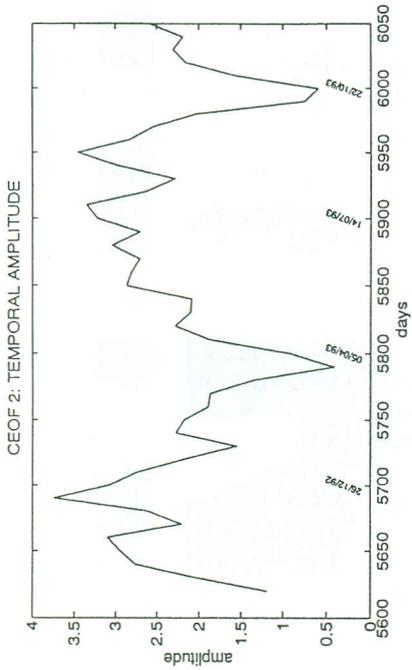


Figura 2b.- Amplitud (normalizada) y fases temporales del segundo modo en la cuenca Argentina

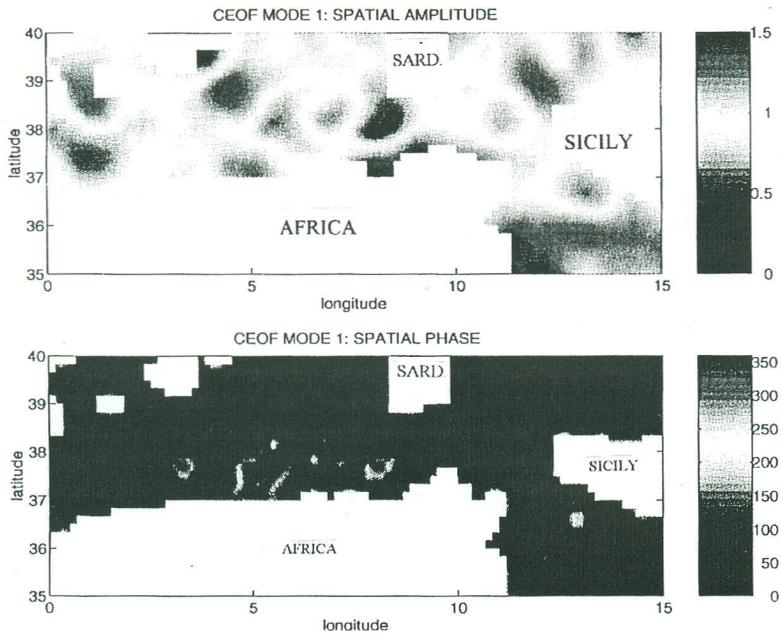


Figura 3a.- Amplitud (normalizada) y fases espaciales del primer modo en la cuenca Argelina

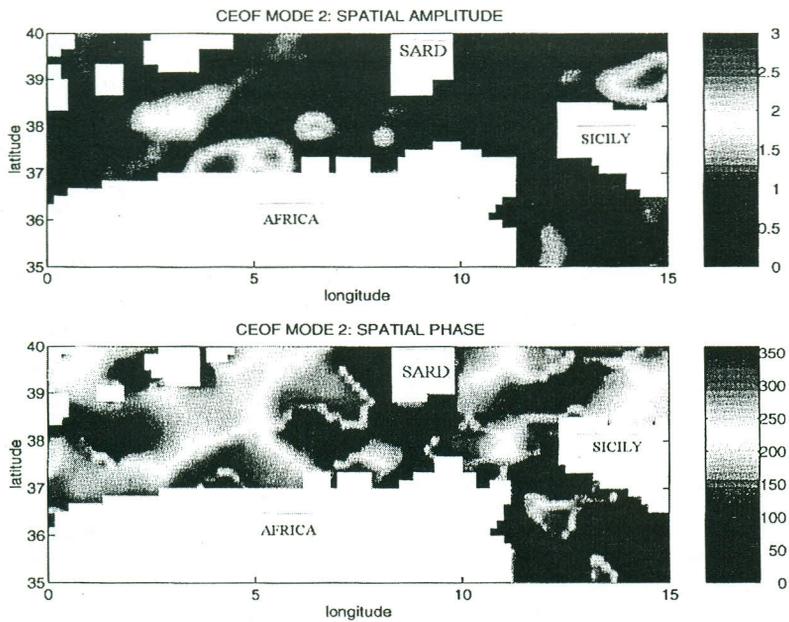


Figura 3b.- Amplitud (normalizada) y fases espaciales del segundo modo en la cuenca Argelina (C. 14)

que siguen el recorrido medio de la corriente a lo largo de la costa de Argelia (fig. 3b). La amplitud máxima de la señal se encuentra cerca de la costa africana entre 3°E y 5°E. Este modo tiene una amplitud máxima en enero y julio, mínima en abril y octubre.

## 5.- CONCLUSION

Estos resultados demuestran que la altimetría es capaz de contribuir al estudio de la evolución espacial y temporal de las estructuras de mesoescala en el mar Mediterráneo, ofreciendo un seguimiento con gran cobertura, algo imposible de obtener con medidas *in situ*. En un futuro próximo, la aplicación del análisis CEOF a datos de temperatura superficial del mar, así como la extensión del periodo de observación altimétrica, completarán estos resultados. Se esperan obtener datos especialmente relevantes en la cuenca Argelina, donde la circulación regional es altamente variable y dominada a menudo por los efectos de grandes giros de mesoescala que interaccionan con la corriente general hacia el este. La disponibilidad de modelos precisos del geoide, obtenidos por ejemplo a partir de información proporcionada por misiones espaciales específicamente geodéticas, permitiría trabajar con valores absolutos del nivel del mar y en consecuencia determinar sin ambigüedad el sentido de giro de los remolinos de mesoescala.

## 6.- AGRADECIMIENTOS

La integración de datos ERS1 y TOPEX/Poseidon ha sido realizada por Nadia Ayoub (CLS, Toulouse). Este trabajo presenta resultados de "EUROMODEL: Modelización hidrodinámica de la cuenca occidental del Mediterráneo" (MAS2-CT93-0066) y es una primera contribución a los proyectos "ALGERS: Uso de los sensores ERS para el estudio de la dinámica del agua atlántica modificada en la cuenca Argelina" (ERS AO-2 E102/0) y "Caracterización y dinámica de estructuras oceanográficas coherentes físicas y biológicas" (MAR95-1861). El primer estudio de Alborán se inició durante una estancia del Dr. Jorge Vázquez en Barcelona financiada por la DGICYT. Se han realizado cálculos en el CRAY YM-P del Centre de Supercomputació de Catalunya (CESCA) gracias a un proyecto de utilización de recursos concedido en 1993.

## 7.- REFERENCIAS

- Canceil, P., Agelou, P. and Vincent, P. 1995. Barotropic tides in the Mediterranean sea using a finite element numerical model. *J. Geophys. Res.* en prensa.
- Fu, L., Vázquez, J. and Parke, M.E. 1987. Seasonal variability of the Gulf Stream from satellite altimetry. *J. Geophys. Res.* **92**: 749-754.
- Horel, J.D., 1984. Complex principal component analysis: theory and examples. *J. Clim. Applied Meteorol.* **23**: 1660-1673.
- Larnicol, G., Le Traon, P.Y., Ayoub, N. and De Mey, P. 1995. Mean sea level and variable surface circulation of the Mediterranean sea from two years of TOPEX/Poseidon altimetry. *J. Geophys. Res.* en prensa.
- Le Traon, P.Y., Rouquet, M.C. and Boissier, C. 1990. Spatial scales of mesoscale variability in the north Atlantic as deduced from Geosat data. *J. Geophys. Res.* **95**: 20267-20285.
- Millot, C., Taupier Letage, I. and Benzhora, M. 1990. The Algerian eddies. *Earth Science Rev.* **27**: 203-219.
- Preisendorfer, R.W. 1988. *Principal component analysis in meteorology and oceanography*. Elsevier, Amsterdam. 425 p.
- Vázquez, J. 1993. Observations on the long period variability of the Gulf Stream downstream of Cape Hatteras. *J. Geophys. Res.* **98**: 20113-20147.
- Vázquez, J., Font, J. and Martínez Benjamín J.J. 1995. Observations of the circulation in the Alboran sea using ERS1 altimetry and sea surface temperature data. *J. Phys. Oceanogr.* en prensa.
- Viúdez, A., Tintoré, J. and Haney, R.L. 1995. Three-dimensional structure of the two anticyclonic gyres in

the Alboran sea. *J. Phys. Oceanogr.* en prensa.

Zlotnicki, V., 1991. Sea level differences across the Gulf Stream and Kuroshio extension. *J. Phys. Oceanogr.* 21: 599-609.