

Variabilidad del nivel del mar en el Golfo de Vizcaya a partir de medidas altimétricas

A. Caballero*, A. Pascual** y G. Larnicol***
 acaballero@pas.azti.es

* AZTI-Tecnalia. Unidad de Investigación Marina. Pasajes. Guipúzcoa

** Institut Mediterrani d'Estudis Avançats (IMEDEA/CSIC-UIB). Mallorca

*** Space Oceanography Division (CLS). Toulouse. Francia

RESUMEN

En este estudio se utilizan datos de diversos satélites altimétricos, para estudiar la variabilidad espacio-temporal del nivel del mar en el Golfo de Vizcaya. En primer lugar, se lleva a cabo un procesado específico de los datos a lo largo de la traza para incluir las mejores correcciones geofísicas disponibles en la actualidad. Posteriormente, se combinan varios altímetros y se someten a técnicas de interpolación óptima con el fin de producir mapas de anomalías del nivel del mar sobre una malla regular. El análisis estadístico durante el periodo comprendido entre enero de 1993 y mayo de 2005, muestra que la señal dominante es el ciclo anual, superpuesta a una tendencia lineal positiva de 2.7 mm/año y a una variabilidad interanual de largo periodo. Por otra parte, se observa que la plataforma y talud son las zonas de máxima variabilidad. También destacan algunas zonas de mar abierto caracterizadas por fenómenos de mesoescala.

PALABRAS CLAVE: altimetría, nivel del mar, Golfo de Vizcaya, remolinos.

ABSTRACT

In the present study, data from different satellite altimeters are used to study the spatio-temporal variability of sea level in the Bay of Biscay. First of all, a specific processing of the along-track data is carried out to include the best geophysical corrections available nowadays. Subsequently, data from different altimeters are interpolated onto a regular grid to obtain a set of Sea Level Anomaly maps. The statistical analysis performed between January 1993 and May 2005 shows that the annual cycle is the dominant signal, overlapped with a positive linear trend of 2.7 mm/year and with a long-period interannual variability. Moreover, the maximum variability is observed along the continental shelf and slope; together with some specific areas in the open sea characterized by a relatively intense mesoscale activity.

KEY WORDS: altimetry, sea level, Bay of Biscay, eddies..

INTRODUCCIÓN

El cambio del nivel del mar está sujeto a diferentes escalas espacio-temporales. A escala planetaria y a largo plazo, el cambio global supone un aumento del nivel del mar, como consecuencia de la expansión térmica de las masas de agua y de la fusión paulatina de la criosfera. A nivel de cuenca, la variabilidad interanual del nivel del mar viene también determinada por cambios en las corrientes marinas.

Existen diversos métodos para medir la altura del nivel del mar. Hasta el siglo pasado, el método más empleado eran los mareógrafos. Sin embargo los mareógrafos presentan dos inconvenientes. Por un lado, presentan una resolución espacial baja y por otro lado, miden la altura a partir de la corteza

terrestre, que describe movimientos verticales comparables a la señal real de altura (Nerem y Mitchum, 2001). Hoy en día se emplean otros métodos para complementar las medidas de estos instrumentos: sistemas de posicionamiento global, gravimetría y altimetría. En este estudio vamos a utilizar las medidas de distintos radares altimétricos para estimar la altura del nivel del mar en el Golfo de Vizcaya con una alta resolución espacial.

Estudios altimétricos realizados en el noreste subtropical del Océano Atlántico revelan un incremento anual del nivel del mar de 0.5 cm (Efthymiadis *et al.*, 2002). Por otro lado, se ha observado que la variabilidad del nivel del mar en el Océano Nortatlántico describe un ciclo anual (Ferry *et al.*, 2000). A nivel mesoesalar y dentro del Golfo de Vizcaya, se produce la entrada de una corriente de talud en

A. Caballero, A. Pascual y G. Larnicol

invierno (García-Soto, 2004) que, debido a irregularidades topográficas, genera una serie de remolinos. Estos remolinos se han observado por sensores IR y visibles y como anomalías positivas del nivel del mar en mapas altimétricos (García-Soto *et al.*, 2002).

El objetivo final de este estudio es estudiar la variabilidad del nivel del mar a diferentes escalas temporales en el Golfo de Vizcaya.

METODOLOGÍA

Procesado de datos a lo largo de la traza

Con la finalidad de contar con una serie de datos lo suficientemente larga que sea representativa de la variabilidad interanual del nivel del mar, se han tomado más de 12 años de datos altimétricos (enero 1993-mayo 2005). Para cubrir este periodo de tiempo se han considerado datos medidos por distintos satélites (ERS-1/2, TOPEX/Poseidon (T/P), Jason-1 y ENVISAT) durante diferentes períodos de tiempo (Figura 1).

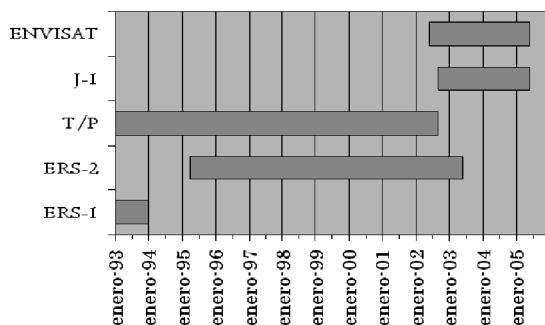


Figura 1. Cobertura temporal de los datos de los satélites considerados en este estudio.

En cuanto al procesado de las medidas altimétricas, en primer lugar, se han aplicado las últimas correcciones geofísicas disponibles (troposfera húmeda y seca, efecto de la presión y el viento, ionosfera, marea...). Después, se han remuestreado los datos cada 7 km a lo largo de la traza, utilizando splines cúbicos. Por otra parte, el altímetro toma la altura del nivel del mar a partir del geoide. Teniendo en cuenta que en la actualidad no se conoce con exactitud la altura del geoide, se ha calculado la Anomalía del Nivel del Mar (ANM) restandole a la altura un promedio de 7 años de altura del

nivel del mar. Finalmente, el ruido de medida se ha reducido con filtros Lanczos y de mediana. A la hora de aplicar las correcciones estándar, se ha prestado una atención especial a los errores de los datos altimétricos cerca de costa.

Obtención de mapas sobre una malla regular

Las medidas a lo largo de la traza han sido interpoladas para crear mallas regulares o mapas de altura. Los mapas permiten una visión sinóptica de la superficie oceánica, y por tanto, una mejor interpretación de las señales a mesoescala.

Por otro lado, los datos de un solo satélite no son suficientes para muestrear la actividad a mesoescala (Pascual *et al.*, 2005) y se recomienda combinar el máximo número de misiones para conseguir una mayor resolución espacio-temporal.

Los datos multisatélite se han interpolado en mallas regulares semanales de $0.125^\circ \times 0.125^\circ$, utilizando un análisis objetivo subóptimo (Ducet *et al.*, 2000). Los parámetros del análisis (correlación espacial, correlación temporal, ruido de medida y error de onda larga) se han establecido en base a estudios previos de altimetría realizados en el Océano Noratlántico (Brachet *et al.*, 2004).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variabilidad interanual

La Figura 2 representa la media cuadrática de la ANM estimada a partir de los mapas semanales comprendidos entre enero de 1993 y mayo de 2005. En este mapa se puede observar la distribución espacial de las ANM en el área de estudio. La media cuadrática oscila entre 4 y 7.37 cm y su promedio espacial es de 5.75 cm. Esta variabilidad del nivel del mar es baja comparando con el resto del Atlántico Norte y con otras regiones como el Mar Mediterráneo donde la ANM oscila entre 4 y 16 cm (Larnicol *et al.*, 2002). Esto pone de manifiesto la importancia del procesado de datos ya que la magnitud de la señal que se quiere estudiar está muy cerca del error de los altímetros (~2 cm rms).

A lo largo de la plataforma y del talud continental se observa una variabilidad del nivel del mar mayor (> 7 cm) que en mar abierto. Sin embargo, existen zonas concretas en mar abierto con un valor de la media cuadrática de la ANM relativamente alto (> 5 cm). En algunas de estas zonas se obser-

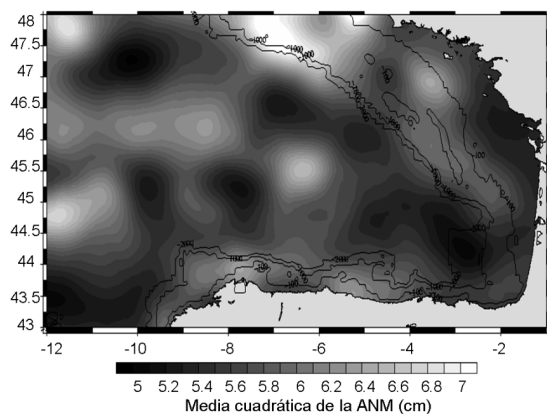


Figura 2. Media cuadrática de la ANM observada en el Golfo de Vizcaya a partir de más de doce años de datos.

van en determinadas épocas del año remolinos anticiclónicos que dan lugar a una elevación del nivel del mar.

Tal y como se ha comentado en la sección anterior, antes de realizar la interpolación de los medidas tomadas a lo largo de la traza, se realiza una serie de correcciones geofísicas sobre éstas. Entre las correcciones geofísicas que se aplican, se encuentra la corrección de marea y del efecto del viento y de la presión (Carrère y Lyard, 2003). Una vez eliminados estos efectos, los principales agentes que dan lugar a cambios del nivel del mar son el efecto estérico, variaciones de masa (fusión criosfera...) y corrientes marinas a distintas escalas.

En la Figura 3, se muestra la evolución del promedio espacial de la ANM en el Golfo de Vizcaya, a lo largo del periodo de estudio. En primer lugar, se observa un ciclo anual con una amplitud de unos 5 cm. Cabe destacar también una variabilidad interanual importante; en particular, se puede estimar una tendencia de la ANM. Entre enero de 1994 y marzo de 1995 (tramo discontinuo de las curvas de ANM) el satélite ERS-1 realizó una misión geodética durante la cual no se dispuso de datos de ANM. Por tanto, para estimar la tendencia lineal de la ANM no se ha tenido en cuenta este período. Desde abril de 1995 a abril de 2005 se observa un incremento de la ANM de 2.69 cm, es decir, un incremento de 2.69 mm/año. Este incremento es ligeramente inferior al observado por Efthimiadis *et al.* (2002), aunque corresponde a las estimas de tendencias obtenidas por autores previos a nivel global (Church *et al.*, 2004).

El espectro de frecuencias de la ANM (Figura 4) permite clasificar la influencia de distintas escalas

temporales en la variabilidad del nivel del mar. En la figura se observa un pico de energía cercano a la frecuencia 0.003. Esta frecuencia, que corresponde a aproximadamente a un periodo anual, confirma que la escala temporal dominante en la variabilidad de la ANM, en la zona de estudio, es la anual.

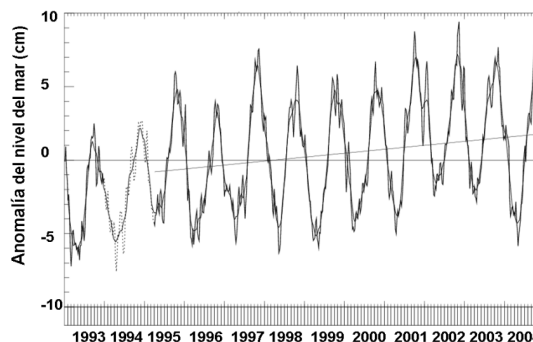


Figura 3. Variabilidad temporal del promedio espacial y ajuste lineal de la ANM en el Golfo de Vizcaya.

Superpuesto al ciclo anual y al incremento lineal, existe una variabilidad interanual no lineal con un periodo aproximado de 5 a 7 años (Figura 3) que también se observa como un pico de alta energía en el espectro de frecuencias (Figura 4). Esta variabilidad interanual indicada con una flecha en la Figura 4, podría estar relacionada con la Oscilación Nortatlántica (NAO).

Ciclo estacional

Mediante un ajuste armónico de los datos de la ANM se ha obtenido la amplitud y la fase del ciclo anual. La amplitud oscila entre 2.5 y 6.5 cm (Figura 5), siendo máxima en la plataforma y en el talud continental. Por otro lado, la fase del ajuste es muy homogénea en toda la zona de estudio (Figura no mostrada), obteniéndose las máximas amplitudes de la ANM en octubre y las mínimas en abril. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Ferry *et al.* (2000). Estos autores también observaron que el efecto estérico es el factor que más influye en la variabilidad estacional del nivel del mar en el Océano N Atlántico. Existe un desfase de ~2 meses entre las máximas y mínimas temperaturas atmosféricas y las máximas y mínimas amplitudes respectivamente del nivel del mar. Este desfase es debido a la inercia termal oceánica.

A. Caballero, A. Pascual y G. Larnicol

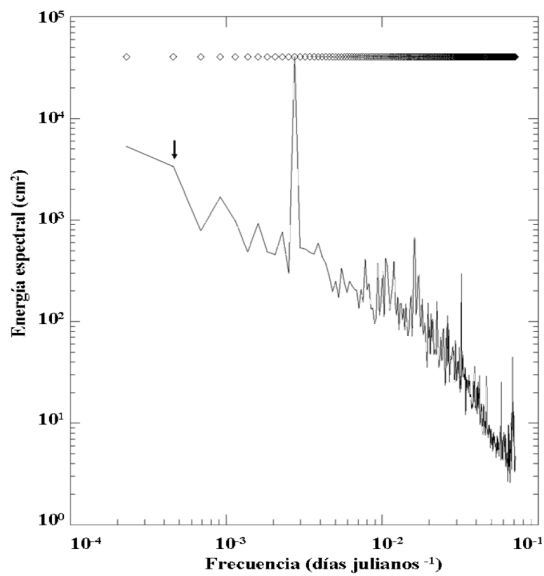


Figura 4. Espectro de frecuencias en escala log de la ANM.

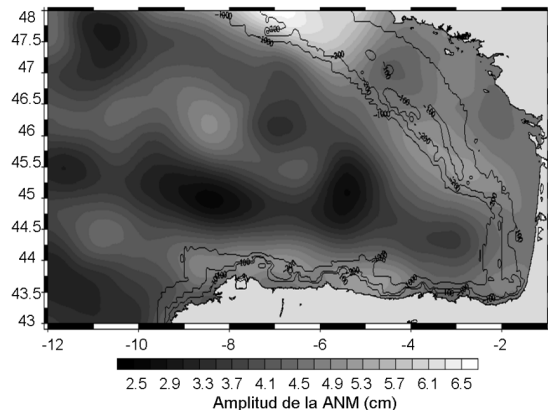


Figura 5. Amplitud del ciclo anual de la ANM.

Variabilidad de mesoescala

A partir de los mapas altimétricos, se han localizado una serie de giros anticiclónicos en posiciones cercanas a las observadas en la bibliografía. Estas observaciones complementan la serie de giros anticiclónicos observados en imágenes de temperatura superficial del mar entre 1979 y 2000 (García-Soto *et al.*, 2002). La Tabla 1 muestra los años y meses en los que se han detectado; parte de estos giros no han sido descritos anteriormente. El nombre de los giros indica la inicial de la irregularidad topográfica en la que se han podido generar (Cabo Ortegal

(O) y Cañón del Cabo Ferret (F)) o la posición longitudinal en la que permanecen estacionarios (Pingree y Le Cann, 1992).

Por otro lado, una serie de mapas semanales y mensuales (Figura no mostrada) ha permitido observar la formación, a partir de la corriente estacional de talud y la posterior desaparición de tres giros anticiclónicos observados en 1998 (García-Soto *et al.*, 2002; Fernández *et al.*, 2004; Sánchez y Gil, 2004).

Nombre	Posición	Mes	Año		
O	45°N	Junio	1993	1994	1995
	9°W	Julio	1996	1997	1998
F	6.5°W	Julio	1993	1994	1995
		Agosto	1996	1997	1998
			2001	2002	
4°W	44.5°N	Junio	1993	1994	1995
	3.5°W	Julio	1998	2000	2002
			2004		

Tabla 1. Esquema de los giros anticiclónicos observados a lo largo del período de estudio.

CONCLUSIONES

Del estudio de la variabilidad espacio-temporal del nivel mar en el Golfo de Vizcaya se obtienen las siguientes conclusiones:

- Las zonas de mayor variabilidad se concentran al Norte de la plataforma/talud francés y en ciertas zonas en mar abierto.
- El ciclo anual es la señal dominante en la variabilidad del nivel del mar en la zona de estudio. El mínimo ocurre en abril y el máximo en octubre.
- Se observa un incremento lineal de la ANM de 2.7 cm desde abril de 1995 a abril de 2005 y una variabilidad interanual no lineal de largo período, que podría estar relacionada con la NAO. El incremento lineal parece estar ligado con el cambio climático global y está de acuerdo con estimas previas realizadas por otros autores a nivel global. En cuanto a la variabilidad no lineal podría estar relacionada con la NAO, pero es necesario confirmar esta hipótesis.
- Los mapas altimétricos permiten llevar a cabo un seguimiento de distintos remolinos anticiclónicos descritos en la bibliografía y detectados mediante otras técnicas.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido financiado por la beca doctoral *Fundación Centros Tecnológicos Iñaki Goena-ga*; durante una estancia en el centro CLS, donde se realizó el procesado de los datos.

BIBLIOGRAFÍA

- BRACHET, S., LE TRAON, P-Y. y LE PROVOST, C. 2004. Mesoscale variability from a high-resolution model and from altimeter data in the North Atlantic Ocean. *J. Geophys. Res.* 109: C12025.
- CARRÈRE, L. y LYARD, F. 2003. Modelling the barotropic response of the global Ocean to atmospheric wind and pressure forcing - comparisons with observations. *Geophys. Res. Lett.* 30, 1275, doi: 10.1029/2002GL016473.
- CHURCH, J. A., WHITE, N. J., COLEMAN, R., LABECK, K. y MITROVICA, J. X. 2004. Estimates of the Regional Distribution of Sea Level Rise over the 1950–2000 Period. *J. Clim.* 17: 2609–2625.
- DUCET, N., LE TRAON, P-Y. y REVERDIN, G. 2000. Global high-resolution mapping of Ocean circulation from TOPEX/Poseidon and ERS-1 and -2. *J. Geophys. Res.* 105: 19477-19498.
- EFTHYMIADIS, D., HERNANDEZ, F. y LE TRAON, P-Y. 2002. Large-scale sea-level variations and associated atmospheric forcing in the subtropical north-east Atlantic Ocean. *Deep-Sea Res. Part II* 49: 3957-3981.
- FERNÁNDEZ, E., ÁLVAREZ, F., ANADÓN, R., BARQUERO, S., BODE, A., GARCÍA-SOTO, C., GIL, J., GONZÁLEZ, N., IRIARTE, A., MOURIÑO, B., RODRÍGUEZ, F., SÁNCHEZ, R., TEIRA, E., TORRES, S., VALDÉS, L., VARELA, M., VARELA, R. y ZAPATA, M. 2004. The spatial distribution of plankton communities in a Slope Water Anticyclonic Oceanic eDDY (SWOODY) in the southern Bay of Biscay. *J. Mar. Biol. Ass. UK* 84: 501-517.
- FERRY, N., REVERDIN, G. y OSCHLIES, A. 2000. Seasonal sea surface height variability in the North Atlantic Ocean. *J. Geophys. Res.* 105: 6307-6326.
- GARCÍA-SOTO, C., PINGREE, R. D. y VALDÉS, L. 2002. Navidad development in the southern Bay of Biscay: Climate Change and swoddy structure from Remote Sensing and *in situ* measurements. *J. Geophys. Res.* 107, 3118, doi: 10.1029/2001JC001012.
- GARCÍA-SOTO, C. 2004. 'Prestige' oil spill and Navidad flow. *J. Mar. Biol. Ass. UK* 84: 297-300.
- LARNICOL, G., AYOUB, N. y LE TRAON, P-Y. 2002. Major changes in Mediterranean Sea level variability from 7 years of TOPEX/Poseidon and ERS-1/2 data. *J. Mar. Sys.* 33-34: 63-89.
- NEREM, R. S. y MITCHUM, T. 2001. *Satellite altimetry and earth sciences*. Academic Press, pp. 329-349.
- PASCUAL, A., PUJOL, M. I., LARNICOL, G., LE TRAON, P-Y. y RIO, M. H. 2005. Mesoscale Mapping Capabilities of Multisatellite Altimeter Missions: First Results with Real Data in the Mediterranean Sea. *J. Mar. Sys.* (en prensa).
- PINGREE, R. D. y LE CANN, B. 1992. Three anticyclonic Slope Water Oceanic eDDIES (SWODDIES) in the southern Bay of Biscay in 1990. *Deep-Sea Res. Part I* 39: 1147-1175.
- SÁNCHEZ, R. y GIL, J. 2004. 3D structure, mesoscale interactions and potential vorticity conservation in a swoddy in the Bay of Biscay. *J. Mar. Sys.* 46: 47.