

CORRIENTES DE MAREA EN LA REGIÓN OCCIDENTAL DEL ESTRECHO DE GIBRALTAR

A. Sánchez-Román (1,2), J. García-Lafuente (1), J. Delgado (1), C. Naranjo (1), J. Soto-Navarro (1) y C. Calero (1)
 (1) Grupo de Oceanografía Física. Universidad de Málaga. España (antonio.sanchez@ctima.uma.es)
 (2) CNR-ISMAR (Istituto di Science Marine), La Spezia, Italia

INTRODUCCIÓN

El Estrecho de Gibraltar es la única conexión entre el Océano Atlántico nororiental, donde el rango de marea es superior a dos metros, y el Mar Mediterráneo occidental, donde no supera el medio metro. Como consecuencia, las mareas en el Estrecho desplazan enormes volúmenes de agua (en ambos sentidos) para acoplar dichos regímenes originándose intensas corrientes que, además, interactúan con la batimetría afectando de manera notable a los flujos intercambiados entre ambas cuencas. Estas corrientes de marea han sido objeto de estudio en el pasado gracias a los datos recopilados en el transcurso de numerosas campañas oceanográficas bajo el amparo de diversos Proyectos desarrollados durante las últimas décadas. La mayor parte de los trabajos publicados a partir de dichos datos se centran en el umbral principal de Camarinal (Figura 1), debido al papel que juega en el control hidráulico de los flujos intercambiados (Armi and Farmer, 1985), aunque existen otros puntos en el Estrecho que, debido a sus características hidrodinámicas, merecen cierta atención. Uno de ellos es el umbral secundario de Espartel, de cuyo estudio se viene ocupando el Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga desde hace algunos años (ver por ejemplo Sánchez-Roman, 2008).



Figura 1. Mapa del Estrecho de Gibraltar mostrando sus características principales. CS y ES representan los umbrales principal y secundario respectivamente.

Este trabajo trata de describir la dinámica de marea en este punto con el doble objetivo de analizar su estructura transversal a lo largo de la sección de Espartel y establecer un posible patrón estacional.

DATOS Y METODOLOGÍA

El conjunto de datos utilizado en este trabajo proviene de la estación de monitorización ES ubicada en el umbral secundario de Espartel (Figura 1) en las coordenadas 35° 51.71' N / 005° 58.60' W. La estación está compuesta por un ADCP fondeado a 345 metros de profundidad (15 m sobre el fondo marino) que resuelve 40 celdas, de 8 m de longitud cada una, a un intervalo de 30 minutos. Esta estación fue fondeada por primera vez en Septiembre de 2004 y aún continúa en funcionamiento, por lo que en la actualidad existen casi seis años de datos. Para este trabajo se han utilizado los datos registrados entre Octubre de 2004 y Diciembre de 2009. Además, se han usado los registros de velocidad obtenidos por dos estaciones auxiliares fondeadas en las proximidades de la pared norte (NES) y sur (SES) del canal principal de Espartel en las coordenadas 35° 52.65' N / 005° 58.46' W (Octubre - Diciembre 2008) y 35° 50.56' N / 005° 58.40' W (Noviembre 2007 - Febrero 2008), respectivamente, para analizar la estructura transversal del flujo. Ambas estaciones presentan la misma configuración que ES, con un ADCP situado a 322 (NES) y 308 (SES) metros de profundidad.

Los datos registrados en ES se han utilizado para investigar la variabilidad temporal en la frecuencia de marea. En un primer paso, las series de velocidad se dividieron en periodos de 3 meses y a continuación se realizó un análisis armónico clásico vectorial (Foreman, 1978; Pawlowicz et al., 2002) para obtener las elipses de marea de las principales constituyentes diurnas (O_1 , K_1) y semidiurnas (M_2 , S_2) de la marea (ver Figuras 3 y 5). De este modo es posible investigar los efectos de la estratificación sobre las corrientes de marea. Además, las series se superpusieron 20 días para minimizar los saltos entre los distintos segmentos.

Por otro lado, las estaciones auxiliares NES y SES no se fondearon simultáneamente, aunque sí con la estación central ES de manera que se han podido inferir las velocidades en la zona norte a partir de las medidas en las zonas central y sur para obtener registros simultáneos en los tres fondeos. Para ello se seleccionaron los periodos de medida simultáneos entre ES-SES y ES-NES y se realizó un análisis armónico para comparar amplitudes y fases. Las diferencias encontradas entre ambos puntos para ES se utilizaron para obtener los datos en NES para el periodo en la que registró la estación SES.

VARIABILIDAD ESTACIONAL DE LA MAREA

Las mareas son la principal fuente de variabilidad para los flujos intercambiados a través del Estrecho de Gibraltar, siendo capaces de eliminar el carácter bicapa típico del intercambio medio durante ciertos momentos del ciclo de marea (Candela et al., 1990; Bryden et al., 1994; García-Lafuente et al., 2000). En el umbral de Espartel (Figura 1), este fenómeno se observa durante la vaciante, cuando las corrientes de marea se dirigen hacia el Océano Atlántico, afectando solamente a la capa superior (Sánchez-Roman, 2008; Sánchez-Roman et al., 2009). La Figura 2 muestra la energía contenida en la marea para el periodo observado en ES.

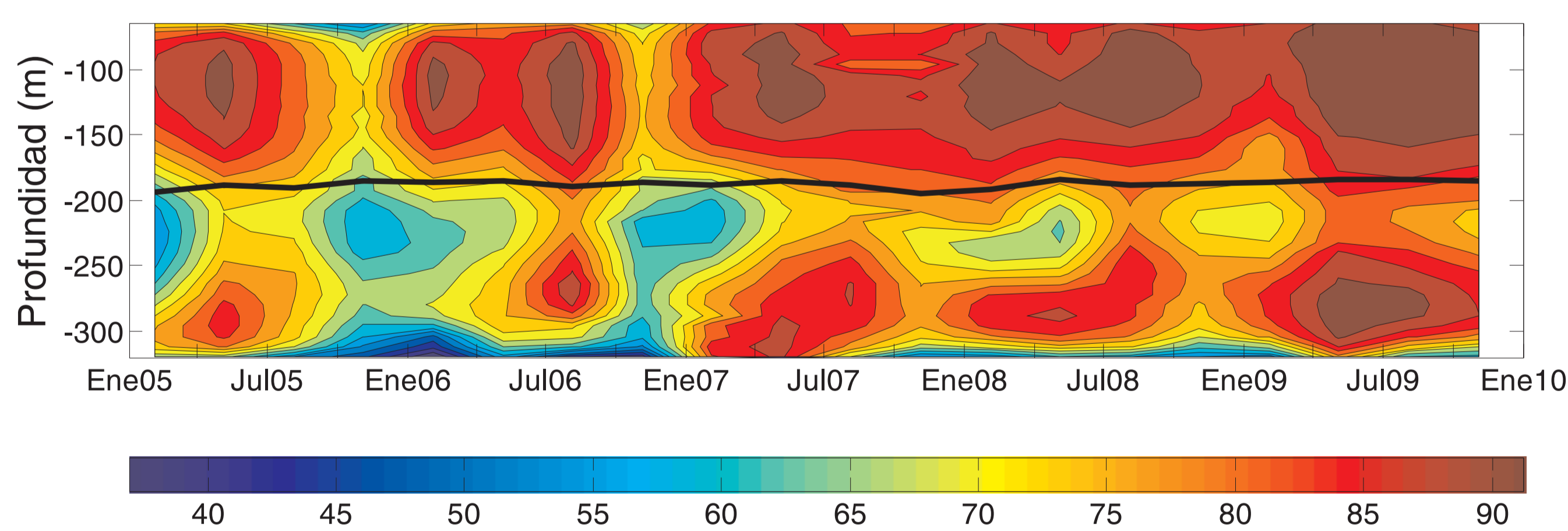


Figura 2. Porcentaje de energía total asociada a la marea en las subseries de velocidad muestreadas en ES. La línea blanca representa la superficie de máxima cizalla vertical de la velocidad horizontal calculada en la frecuencia de la marea y corregida por la profundidad media de la superficie de velocidad nula obtenida para los flujos subinerciales (cálculo explicado en Sánchez-Roman et al., 2009)

En la Figura 2 se observa que la energía contenida en la marea no se distribuye de forma homogénea en la columna de agua, mostrando un claro comportamiento baroclino como consecuencia de su interacción con la batimetría del Estrecho. La energía máxima se localiza en la capa atlántica superior, donde las corrientes de marea son más intensas que el flujo medio (Sánchez-Roman, 2008). En consecuencia, el flujo de agua atlántica que accede al Mar Mediterráneo se invierte cada ciclo de marea en este punto; no siendo válido el concepto de superficie de velocidad nula como elemento de separación de las aguas atlánticas y mediterráneas en frecuencias de marea.

Por otro lado, los valores mínimos de energía se observan en las proximidades del fondo, debido a fenómenos de fricción, y justo debajo de la profundidad de la interfase media, en la zona de transición entre las aguas atlánticas y mediterráneas. Esta región se extiende verticalmente en ES desde 160 m hasta 250 m aproximadamente (Sánchez-Roman, 2008) y en ella ocurren intensos fenómenos de mezclas verticales y otros procesos energéticos que provocan una reducción considerable (de hasta el 35%) en la fracción de energía explicada por la marea, que es transferida a otros procesos cinemáticos relacionados con los desplazamientos verticales de la interfase. Esta distribución de energía en la columna de agua se observa para todo el periodo analizado, aunque el porcentaje de energía explicada no es uniforme a lo largo de todo el año debido a cambios en la estratificación de la columna de agua. Como resultado se observan valores máximos en verano para todos los años investigados que se extienden hasta principios de otoño. Estos cambios de estratificación son el resultado de las alteraciones que sobre la columna de agua provocan el paso de los frentes atmosféricos que se dirigen hacia el mediterráneo durante el otoño-invierno. Estos centros de bajas presiones permiten una mayor mezcla vertical de los diferentes estratos de la columna de agua favoreciendo, de esa forma, un trasvase de parte de la energía cinética contenida en la marea a dichos movimientos verticales (ver Figura 4).

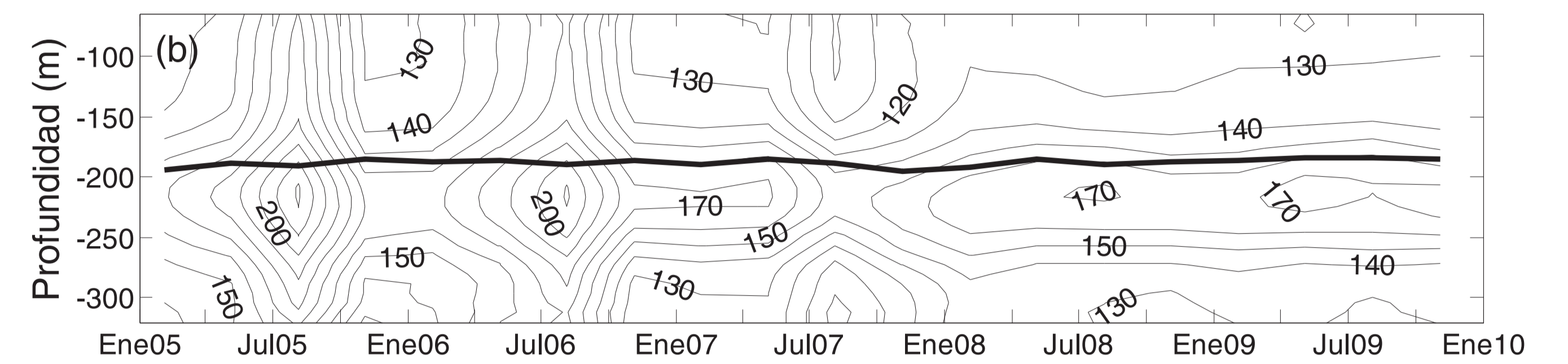
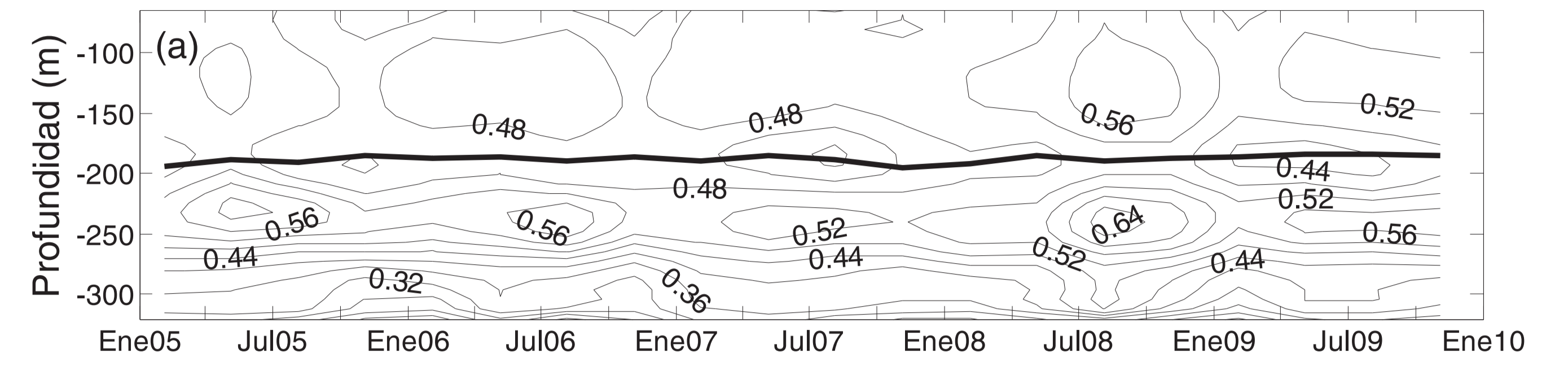


Figura 3. Variabilidad temporal de la constituyente de marea M_2 en el umbral de Espartel. (a) semeje mayor (m/s). (b) fase (grados). La línea negra representa la profundidad media de la interfase (ver figura 2).

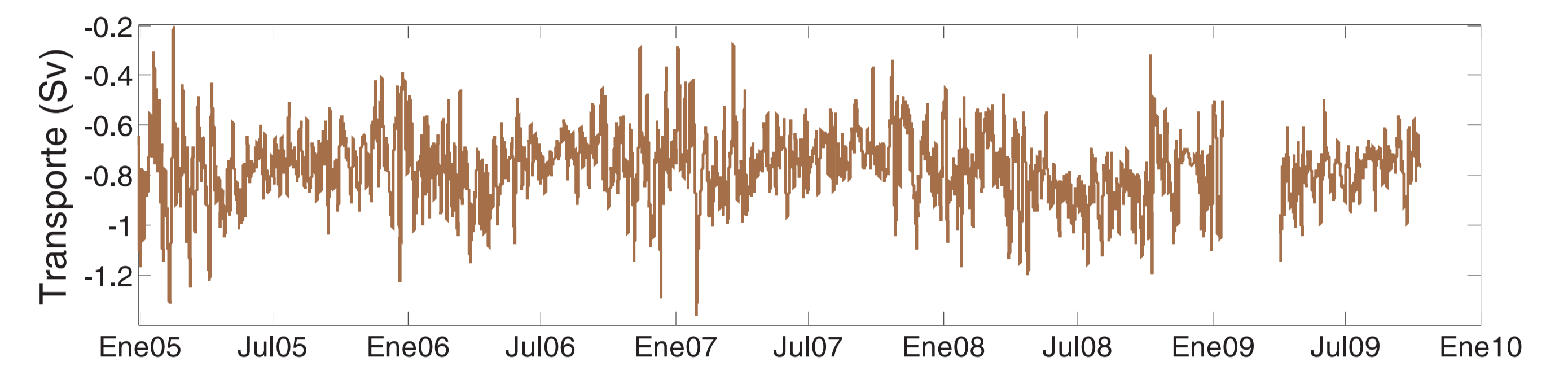


Figura 4. Transporte subinercial del flujo de salida en Espartel (ver procedimiento de cálculo en Sánchez-Roman, 2008).

El semeje mayor de las elipses de marea (Figuras 3,a y 5,a) presentan una clara estacionalidad acorde con el patrón de energía encontrado con máximos sobre Julio para todos los años analizados. Este incremento en la velocidad se acompaña de un aumento de la fase en torno a 30 grados para las constituyentes semidiurnas y de 15 para las diurnas, lo que implica un retraso de una hora en todas las constituyentes durante los periodos más energéticos. Este incremento de fase es más evidente en 2005 y 2006 respecto al resto de años observados, indicando una clara variabilidad interanual.

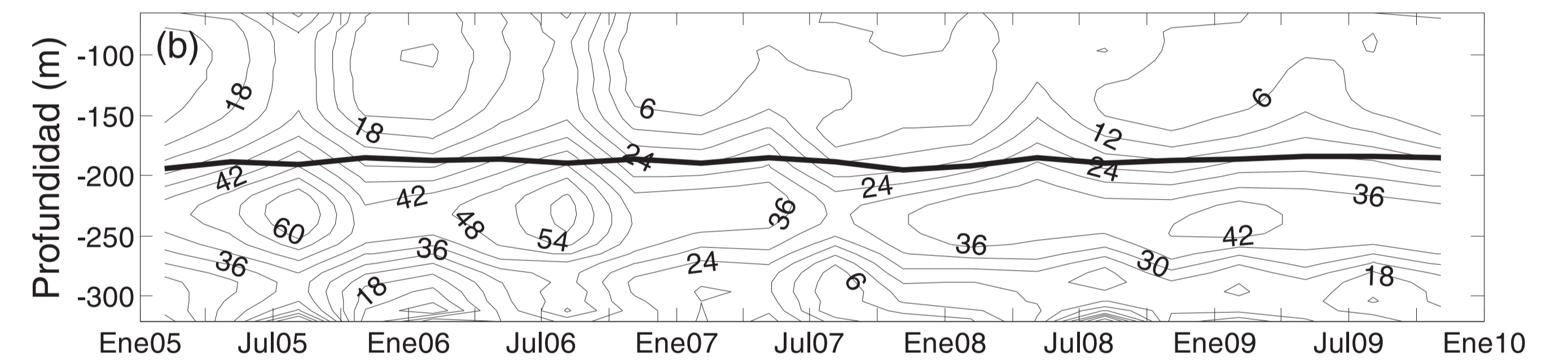
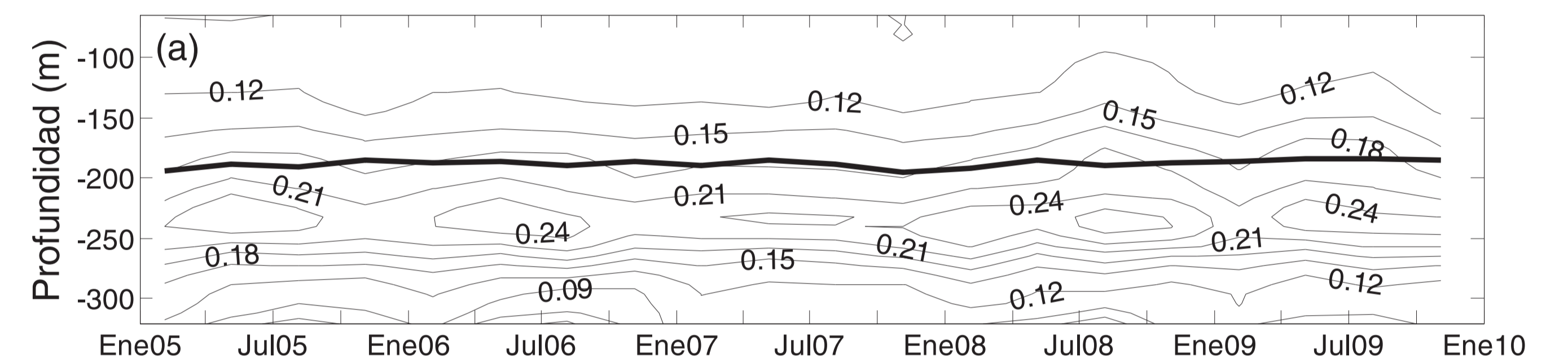


Figura 5. Variabilidad temporal de la constituyente de marea O_1 en el umbral de Espartel. (a) semeje mayor (m/s). (b) fase (grados). La línea negra representa la profundidad media de la interfase (ver figura 2).

Las velocidades máximas se observan en una región de mínima energía asociada a la marea (Figura 2). Esta región coincide con la zona interfacial, de forma que se produce una interacción entre la dinámica de la interfase y la marea de la siguiente manera: durante la vaciante la marea favorece el flujo de salida elevando la interfase, lo que implica transferencia de energía de la marea a la dinámica interfacial. El aumento del desfase se explica de igual forma.

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL EN ESPARTEL

La Figura 6 muestra las amplitudes y fases obtenidas para la sección transversal del canal principal de Espartel. Las amplitudes máximas se dan en aguas intermedias para las dos constituyentes analizadas, justo bajo la posición media de la interfase (no representada) en concordancia con los resultados presentados en el apartado anterior. La disposición de energía observada en la pared norte del canal se explica por fenómenos de fricción, que conllevan además un aumento en la fase en esa zona por la ralentización a la que se ven sometidos los flujos. En consecuencia, los efectos de la topografía sobre los flujos intercambiados en Espartel se traducen en una estructura transversal con un marcado patrón baroclino que provoca una transferencia de energía hacia la pared sur del canal cuando se considera la frecuencia semidiurna. En la banda diurna, en cambio, este patrón no es observado.

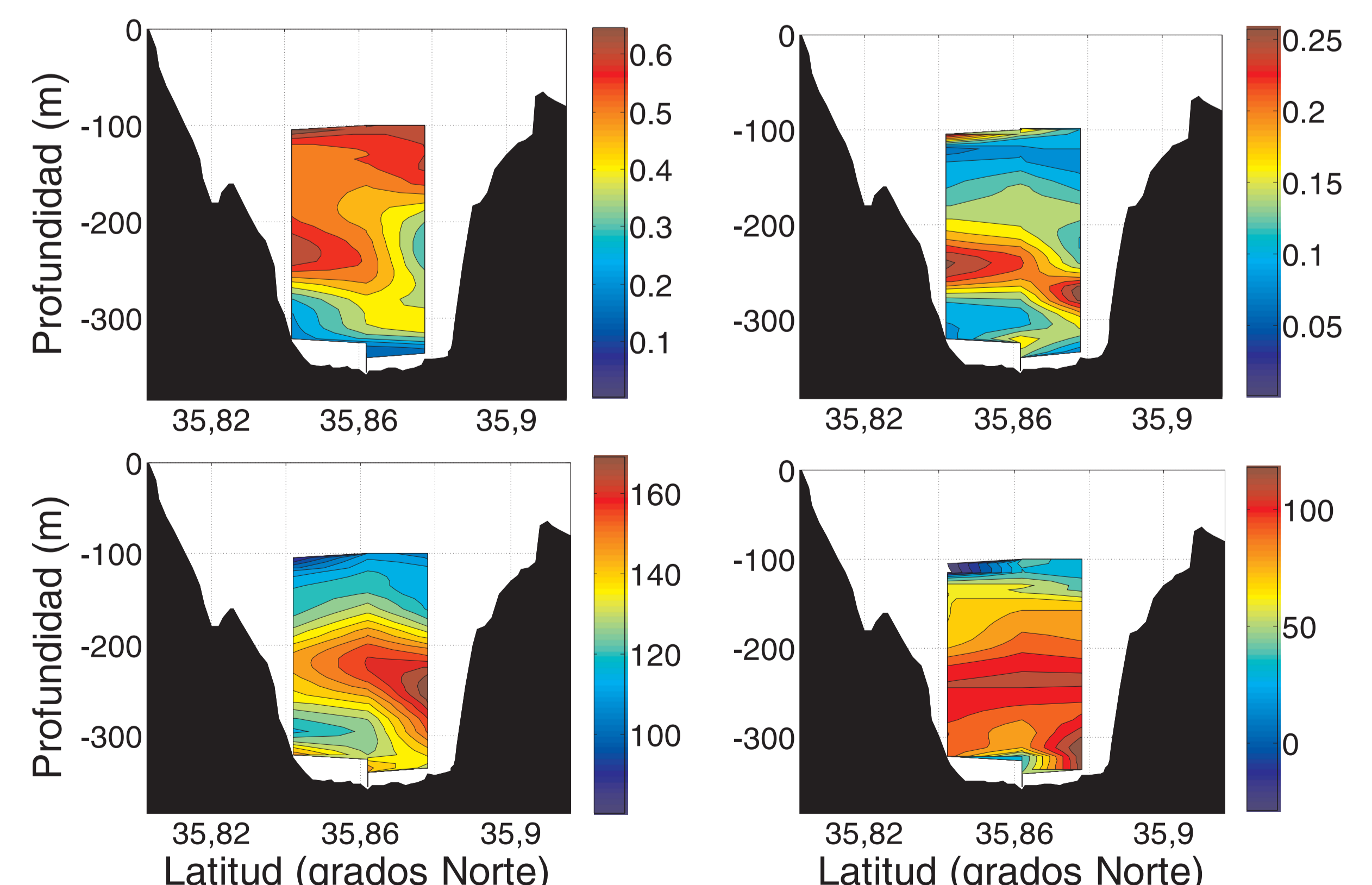


Figura 6. Distribución espacial de las corrientes de marea en el canal principal del umbral de Espartel. Los paneles superiores muestran la amplitud (m/s) para M_2 (izquierdo) y O_1 (derecho). Los paneles inferiores representan la fase (grados) para las mismas constituyentes.

BIBLIOGRAFÍA

Armi, L. and Farmer, D. M. (1985). The internal hydraulics of the Strait of Gibraltar and associated sills and narrows. *Oceanolog. Acta*, 8, 37-46.
 Bryden, H. L., J. Candela, and T. H. Kinder (1994). Exchange through the Strait of Gibraltar. *Prog. Oceanogr.*, 33, 201-248.
 Candela, J., Winant, C. and Ruiz, A. (1990). Tides in the Strait of Gibraltar. *Progress in Oceanography* 33, 7313-7335.
 Foreman, M. G. G. (1978, revised 2004). *Manual for tidal currents analysis and prediction*. Pacific Marine Science Report 78-6, Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, 57 pp.
 García-Lafuente, J., J. M. Vargas, F. Plaza, T. Sarhan, J. Candela, and B. Baschek (2000). Tide at the eastern section of the Strait of Gibraltar. *J. Geophys. Res.*, 105, 14197-14213.
 Pawlowicz, R., Beardley, B. and Lentz, S. (2002). Classical Tidal Harmonic Analysis Including Error Estimates in MATLAB using T_TIDE. *Computers and Geosciences*.
 Sánchez-Roman, A. (2008). Intercambios a través del Estrecho de Gibraltar y su respuesta a forzamientos de distintas escalas temporales. PhD Thesis. Univ. of Málaga.
 Sánchez-Roman, A., G. Sannino, J. García-Lafuente, A. Carrillo, and F. Criado-Aldeanueva (2009). Transport estimates at the western section of the Strait of Gibraltar: a combined experimental and numerical modelling study. *J. Geophys. Res.* 114, C06002, doi: 10.1029/2008JC005023.