

PROPAGACIÓN DE LA ONDA DE MAREA EN CANALES ADYACENTES A CAMPOS DE HIELO SUR

TIDE WAVE PROPAGATION IN CHANNELS ADYACENT TO SOUTH ICE FIELDS

JUAN FIERRO C.,
MANUEL CASTILLO S.,
CLAUDIA VALENZUELA C.
Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile
Errázuriz 232 - Playa Ancha
Valparaíso - Chile
shoa@shoa.cl

RESUMEN

Durante el crucero de investigación Cimar-Fiordo 2, realizado a fines de 1996, se registró el nivel del mar en tres lugares a lo largo de los siguientes canales: canal Messier (puerto Edén), canal Wide (punta Beresford) y canal Concepción (caleta Patria). Las mediciones realizadas fueron de corto período y se extienden desde el 20 de octubre hasta el 13 de diciembre de 1996.

El nivel del mar de los registros anteriores, fue analizado en el dominio del tiempo y de la frecuencia, y se calcularon algunos valores no armónicos de la marea. Los resultados mostraron una evidente influencia de la marea en la señal del nivel del mar, con un claro comportamiento semidiurno mixto y una marcada desigualdad diaria en las alturas de las pleamares y bajamares.

El mayor rango de marea se presentó en puerto Edén, evidenciándose un efecto de la configuración orográfica local a medida que la onda de marea progresa hacia el interior del canal y experimenta modificación por efectos no lineales.

La señal de baja frecuencia en el nivel del mar es perceptible, aunque de baja amplitud. Sin embargo, debido a la corta longitud de las series, no fue posible resolver adecuadamente el espectro de energía de bajas frecuencias.

Del análisis espectral, se observó claramente que la marea es el fenómeno que se presenta con mayor energía en el nivel del mar, donde destaca principalmente la componente semidiurna en todas las estaciones.

Palabras claves: Mareas, armónicos, análisis espectral.

ABSTRACT

During the research cruise Cimar-Fiordo 2, carried out in late 1996, sea level was recorded in three stations located in channels, Messier (Puerto Edén), Wide (Punta Beresford) and Concepción (Caleta Patria). The measurements were of short term, starting in October 20th and finishing in December 13th, 1996.

The sea level in those stations, was analyzed in the time and frequency dominion, and some tide non armonic values were calculated. Results showed that tides evident influence in sea level signal, with a clear mixt semidiurnal behavior, and a daily inequality between high and low waters.

The highest tide range was observed in puerto Edén, showing the effect of the local orography configuration while the wave propagates into the channel, and experiences non linear effects modification.

The low frequency sea level signal is perceptible even it has very small amplitude. However, due to the series short length it was not possible a proper resolution of the low frequency energy spectrum.

From the spectral analysis, was clearly advisable that tides is the most energetic phenomenon that shows its biggest expression particularly in the semidiurnal frequency in all stations.

Key words: Tides, armonic, spectral analysis.

INTRODUCCIÓN

Entre el Golfo de Penas y la boca sur del canal Concepción se extiende una importante ruta de navegación, conformada mayoritariamente por canales navegables conocidos como canales patagónicos.

Esta vía interior de navegación de altas y escarpadas riberas se extiende aproximadamente 180 millas náuticas por canales cuyo ancho medio es de 1,5 millas náuticas. De esta manera, los buques que navegan estos resguardados canales que se extienden paralelos a los Campos de Hielo Sur logran evitar los frentes de mal tiempo y mar gruesa que pudieran experimentar durante su eventual travesía por el Pacífico.

La marea presente en el área de estudio es producto de la transición que experimenta la onda de marea oceánica al ingresar a canales y fiordos interiores donde las condiciones morfológicas, la presencia de aguas someras y la acción de fenómenos meteorológicos, distorsionan sus características iniciales, regulando la velocidad y altura que la onda de marea alcanza durante su propagación en los canales patagónicos.

Mediante el empleo de análisis estadístico, armónico y espectral, se estudia la información del nivel del mar registrada en puerto Edén, canal Wide y canal Concepción.

Los resultados obtenidos en el presente estudio permitirán conocer el desarrollo y propagación de la onda de marea en la ruta de navegación. Así también los parámetros más relevantes extraídos de las observaciones y asociados a las variaciones del nivel del mar en los puntos específicos

detallados previamente, permitirán reforzar y mejorar la información contenida en publicaciones de vital apoyo para la seguridad de la navegación en dicho canal, como lo son el "Derrotero de la Costa de Chile" y las "Tablas de Marea de la Costa de Chile".

MATERIALES Y MÉTODOS

Dada la especial configuración del área de estudio se diseñó una red de monitoreo de las variaciones del nivel del mar, tal como se muestra en la figura 1.

La instalación del instrumental se realizó durante la primera etapa del crucero Cimar-Fiordo 2, siendo la plataforma de trabajo el AGOR "Vidal Gormaz", en tanto que la recuperación de los equipos se efectuó con el apoyo de la LPC "Villarrica", unidad naval basada en Puerto Natales.

Se utilizaron fundamentalmente series de tiempo de nivel del mar, recolectadas mediante el empleo de un mareógrafo inscriptor de operación neumática (puerto Edén) y sondas de presión digitales instaladas en punta Beresford (canal Wide) y caleta Patria (canal Concepción), respectivamente.

Las series fueron inicialmente corregidas por presión (efecto barómetro invertido), utilizando para ello los datos de presión de canal Wide. Así también, para efectos de análisis se utilizó el período común de las series (Tabla I).

Para caracterizar los regímenes de marea presentes en el área, las observaciones del nivel del mar fueron sometidas a un análisis armónico

Tabla I. Instrumental, localización y período de las observaciones.
Table I. Instruments, location and time period of the study.

Instrumental	Sensores	Ubicación	Período Registro
Mareógrafo Inscriptor Metercraft	Nivel del Mar	Puerto Edén Latitud Longitud 49° 08' S 74° 27' W	20/Oct - 13/Dic 1996
Plataforma Colectora de Datos Aanderaa	Nivel del Mar Presión Atmosférica	Punta Beresford Canal Wide Latitud Longitud 49° 47' S 74° 22' W	23/Oct - 13/Dic 1996
Sonda de Presión OTT	Nivel del Mar Temperatura Agua	Caleta Patria Canal Concepción Latitud Longitud 50° 48' S 75° 16' W	25/Oct - 11/Dic 1996

en base al método de mínimos cuadrados (Foreman, 1977). Además, siguiendo la metodología descrita en la Publicación SHOA "Instrucciones Oceanográficas N° 2, 1999", y mediante análisis estadístico de las series de pleamar y bajamar se calcularon los parámetros más significativos de la marea en los lugares de interés.

La importancia relativa de los constituyentes de marea diurnos y semidiurnos se determinó utilizando el coeficiente de Courtier (SHOA, 1992).

Para analizar las fluctuaciones de baja frecuencia presentes en los registros, se procedió a filtrar las series de nivel del mar de las diferentes estaciones de marea, utilizando para ello un filtro Coseno-Lanczos de 121 pesos, con poder medio de 40 horas, el cual es eficiente para eliminar las fluctuaciones de marea diurna y semidiurna.

Finalmente, para realizar un análisis en el dominio de la frecuencia de las series de nivel del mar, se efectuó un análisis espectral y de coherencia y fase, según la metodología expuesta por Emery & Thomson (1997), la cual implicó el suavizamiento de las series, separándolas en trozos de igual largo y con una distribución χ^2 .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El comportamiento en el tiempo del nivel del mar en las estaciones de marea de puerto Edén, canal Wide y caleta Patria se muestra en la figura 2. En ella se apreció que los mayores rangos de marea se presentaron en puerto Edén. Por su parte, el desarrollo de las series en canal Wide y

caleta Patria fue muy similar, con rangos de marea menores al observado en la estación de más al norte (puerto Edén).

Dada la longitud de la serie se presentaron tres períodos de cuadratura, visualizándose en todas las localidades, diferencias en los rangos de marea con respecto a los registrados en períodos de sicigia.

Del análisis de armónicos de las series de alturas horarias de nivel del mar y corregidas por presión (Fig. 2), se obtuvo un total de 36 constituyentes, siendo los de mayor importancia O1, K1, N2, M2 y S2, los cuales en conjunto contienen porcentajes mayores al 78% de la energía total de la onda de marea en todas las series analizadas (Tabla II). Además se estableció el valor del coeficiente de Courtier (SHOA, 1992), para cada una de las series de nivel del mar como se aprecia en la Tabla II.

Según la definición de este coeficiente (SHOA, 1992), se indica que si F se encuentra entre 0,25 y 1,50 (el caso para estas series), el régimen de marea es mixto semidiurno con una marcada desigualdad diaria en las alturas de las pleamares, y bajamares, aspecto que se presentó más notoriamente en el caso de las pleamares como se puede apreciar en la figura 2. Además, se observó un aumento hacia el sur de este coeficiente (entre 0,53 en puerto Edén a 0,65 en caleta Patria), lo que equivale a un aumento de 0,12 en el valor del índice hacia el sur. Este aumento evidencia la creciente importancia de las ondas de marea diurnas con respecto a las ondas de marea semidiurnas, a medida que dichas ondas recorren la zona de estudio de norte a sur.

Tabla II. Principales constituyentes armónicos de las mareas registradas.
Table II. Principal armonic constituents for measurements tides.

Constituyente	Periodo (h)	Puerto Edén (cm)	Canal Wide (cm)	Caleta Patria (cm)
O1	25,82	15,05	13,98	13,68
K1	23,93	23,73	22,42	24,40
N2	12,66	14,17	12,41	11,36
M2	12,42	54,80	47,79	44,50
S2	12,00	18,11	15,69	14,10
% del Total		81,3	82,4	78,5
Coef. Courtier (F)		0,53	0,57	0,65

Puerto Edén presentó los máximos para todos los casos de la tabla precedente, lo cual indicó un incremento en los rangos de marea en el canal interior (puerto Edén), respecto a los rangos registrados en la estación expuesta a la influencia oceánica (caleta Patria). Así también, se apreció que los rangos de las estaciones mareográficas de canal Wide y caleta Patria fueron muy similares, lo que indica que la onda de marea al interior del canal no presenta mayores distorsiones en el sector correspondiente a canal Concepción.

En la Tabla III, se ha incluido para fines de comparación algunos valores no-armónicos de la marea, correspondientes a la estación permanente de marea que el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico mantiene en isla San Pedro, situada en el acceso norte del canal Messier. Se aprecia el incremento en los rangos de marea en las estaciones interiores con respecto al rango de marea propio de sectores costeros más abiertos.

El análisis del Establecimiento del Puerto (SHOA, 1999) determinó que la onda de marea progresa de norte a sur con una diferencia temporal de aproximadamente 1 hora, entre la ocurrencia de la pleamar en el acceso norte del canal Messier (isla San Pedro) y la presencia de la pleamar en el acceso sur de canal Concepción (caleta Patria).

Las series de nivel filtradas, sin tendencia y sin media se presentan en la figura 3. El análisis de la estadística básica de las series filtradas, indica que tanto en puerto Edén como en caleta Patria se presentaron fluctuaciones de baja frecuencia de mayor amplitud 33,63 cm y 35,47 cm con desviación estándar asociada de 6,73 cm y 6,33 cm respectivamente; mientras que en canal Wide estas fluctuaciones tuvieron una menor amplitud máxima (19,71 cm) y desviación estándar (4,53 cm). Esta señal de baja frecuencia podría ser generada como respuesta a la in-

fluencia de factores topográficos locales (fricción lateral o de fondo), factores atmosféricos de largo periodo, u otros factores que modulan la señal de baja frecuencia. En este caso particular dividen la zona de estudio en zona de influencia oceánica, y una zona intermedia o de transición (donde la amplitud de la señal de baja frecuencia es menor).

Para establecer el rezago (tiempo de respuesta) de la señal de baja frecuencia y su propagación se procedió a realizar un análisis de correlación cruzada entre las series filtradas, considerando los resultados obtenidos en la Tabla III, se efectuó una correlación cruzada entre la serie de nivel del mar de puerto Edén y las otras estaciones, de esta forma los rezagos que se obtuvieron representan el tiempo que demora la señal de baja frecuencia en desplazarse desde puerto Edén hacia el sur.

Se obtuvo para la correlación máxima 0,92 un rezago de 3 horas entre puerto Edén y canal Wide; en tanto que entre puerto Edén y caleta Patria, se observó un rezago de 4 horas. Teniendo en cuenta estos rezagos máximos y la distancia entre las estaciones, se calculó la velocidad, para la fluctuación de baja frecuencia (9 m s^{-1}), esto indica que la fluctuación de baja frecuencia avanza encubierta en la señal de alta frecuencia, desde el norte hacia el sur (Fig. 4).

Con la finalidad de realizar un análisis de las oscilaciones en el dominio de la frecuencia, se efectuó el cálculo de los autoespectros de energía del nivel del mar, utilizando 10 grados de libertad, entregando una resolución temporal de aproximadamente 10 días.

En la figura 5, se presentan los espectros de energía de las series de nivel del mar de las estaciones mareográficas en estudio. En tanto que, para el análisis se ha graficado la energía expli-

Tabla III. Promedio de valores no armónicos de los registros de nivel del mar.
Table III. Average of not armonic tidal constituents.

Lugar	Rango Máx. Sicigia (m)	Rango Mín. Cuadratura (m)	Media (m)	Máx. (m)	Mín. (m)	NRS bajo NMM (m)	Estab. del Puerto (hh mm)
I. San Pedro	1,58	0,16	—	—	—	1,07	11 45
Edén	2,05	0,29	1,73	2,86	0,68	1,26	00 22
Wide	1,66	0,24	1,23	2,24	0,38	1,12	00 28
Patria	1,77	0,25	1,25	2,28	0,38	1,08	00 21

cada por la serie sin filtrar, sin tendencia y sin media, pues la energía de las componentes de baja frecuencia representaron una mínima parte de la energía total. Esto puede estar relacionado a la resolución temporal del espectro. En series de mayor extensión es posible resolver la energía asociada a propagación de eventos ondulatorios de largo período.

Los espectros de energía presentan un comportamiento acorde con lo señalado anteriormente, se observa la existencia de una atenuación de la señal en su avance hacia el sur, probablemente producto de efectos de reducción de fondo o friccionales, mientras avanza hacia el interior del canal (Fierro *et al.*, 2000). La serie de puerto Edén registró la mayor cantidad de energía asociada tanto a la banda semidiurna como a la banda diurna, mientras que la diferencia de energía entre ambas bandas decrece linealmente hacia el sur, llegando a presentar en caleta Patria una diferencia de 60% de la diferencia de energía entre bandas registrada en puerto Edén. En tanto que, en frecuencias mayores a 0,1 ciclos por hora (cph) (menores a 10 horas), se apreciaron influencias de factores topográficos locales, fricción u otros factores que tienen distinto efecto en los registros. El decaimiento de la energía para frecuencias mayores a 0,1 cph es evidente en canal Wide, un tanto menor en puerto Edén y prácticamente imperceptible en caleta Patria (Fig. 5).

Junto al análisis espectral se realizaron los cálculos de coherencia y fase de las series de nivel del mar. Este análisis indica en qué frecuencias se establecen las similitudes de las series, así como también los desfases en que estos fenómenos se establecen.

La figura 6, muestra la coherencia y la fase entre las series. En forma general, se estableció que un 38,9% del total de las series (ambas a la vez) fueron coherentes por sobre el 80%, en tanto que 23,5% se situó por sobre el 95% de coherencia. En las bandas de frecuencias de importancia (más energéticas) de marea diurna y

semidiurna, las series fueron perfectamente coherentes y sin desfases, indicando que la onda de marea ocurre casi simultáneamente en todas las estaciones de marea (desfase máximo de 13 minutos), entre puerto Edén y caleta Patria. Además se apreció que entre frecuencias de 0,2 cph (5 h) a 0,3 cph (3,3 h) las series de puerto Edén y caleta Wide fueron coherentes por sobre el 95%, lo cual no ocurrió con las series de puerto Edén y caleta Patria indicando diferencias en las fases del par de series de puerto Edén y caleta Patria, respecto del par de series de puerto Edén y caleta Wide.

En general, se observó un comportamiento similar en las bandas de frecuencia de mayor contenido energético (bandas diurna y semidiurna de marea), presentándose en todos los casos la banda semidiurna más energética que la banda diurna, esto concuerda con los coeficientes F calculados previamente en las estaciones de marea. Además, se obtuvo que las series de nivel del mar interiores (puerto Edén y canal Wide) presentaron diferencias respecto a las series de caleta Patria. Primeramente esta diferencia se apreció en el coeficiente F (mayor en caleta Patria), mientras que en el análisis espectral esta diferencia fundamentalmente se presentó asociada a altas frecuencias (decaimiento en series interiores; más constante en serie expuesta a la influencia oceánica); las fluctuaciones de esta alta frecuencia (período menor a 10 horas) podría estar asociada a factores locales generadores de ruido como fricción y viento.

CONCLUSIONES

La zona de estudio es un área de cuerpos de agua longitudinalmente constreñidos por accidentes geográficos que determinan importantes características de la circulación.

Los resultados previamente mostrados, revelaron que el mayor rango de mareas se presentó en puerto Edén, y a medida que la onda de ma-

rea progresa hacia el sur por los canales interiores, ésta es modificada, probablemente por efectos topográficos locales, disminuyendo su expresión en las variaciones del nivel del mar.

La modificación de la onda de marea a lo largo del canal, se refleja en una disminución de la energía asociada a la componente diurna, realizándose con ello la contribución en la frecuencia de la componente semidiurna, comprobado a través del cálculo del coeficiente de Courtier.

El largo de las series de tiempo, no permitió realizar una acabada resolución de la composición de energía en las bajas frecuencias, y sólo fue posible descomponer la varianza para períodos menores a 10 días. A pesar de lo anterior, las fluctuaciones de baja frecuencia presentaron su mayor amplitud hacia fines de noviembre en los registros de puerto Edén y caleta Patria, evidenciándose nuevamente una modulación del nivel del mar por forzante topográfico, que se traduce al igual que con las frecuencias de marea, en una disminución de la amplitud de los eventos ondulatorios en la región media del canal Concepción.

Sin duda alguna, la señal más importante en el nivel del mar en la zona de estudio, fue la propagación de la onda de marea, reflejado en términos de energía en los autospectros. Dentro de esta característica, la componente semidiurna fue evidentemente más energética que la componente diurna, coincidente con lo encontrado con el coeficiente de Courtier.

La red de estaciones mareográficas en el canal, mostró un sistema acoplado que responde rápidamente a fluctuaciones del nivel del mar, con tiempos de 1 hora para el desfase en la ocurrencia de pleamar entre las estaciones más exteriores.

REFERENCIAS

- Emery, W. J. & R. E. Thompson. 1997. Data Analysis Methods in Physical Oceanography. Institute of Ocean Sciences, Sidney, British Columbia, Canada, 632 pp.
- Fierro, J., M. Bravo & M. Castillo. 2000. Caracterización del régimen de mareas y corrientes a lo largo del canal Moraleda (43° 54' S - 45° 17' S). *Cienc. Tecnol. Mar.* 23: 3-14.
- Foreman, M.G.G. 1977. Manual for Tidal Heights Analysis and Prediction. Pacific Marine Science, Report 77-10, Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Victoria, B. C. Canada, 101 pp.
- Pugh, D. T. 1987. Tides, Surges and Mean Sea-Level. John Wiley and Sons, LTD. U.K., 472 pp.
- SHOA 1992. Glosario de Mareas y Corrientes, 2ª Edición. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, Valparaíso, 60 pp.
- SHOA 1999. Método oficial para el cálculo de los valores no-armónicos de la marea. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, Valparaíso, 24 pp.

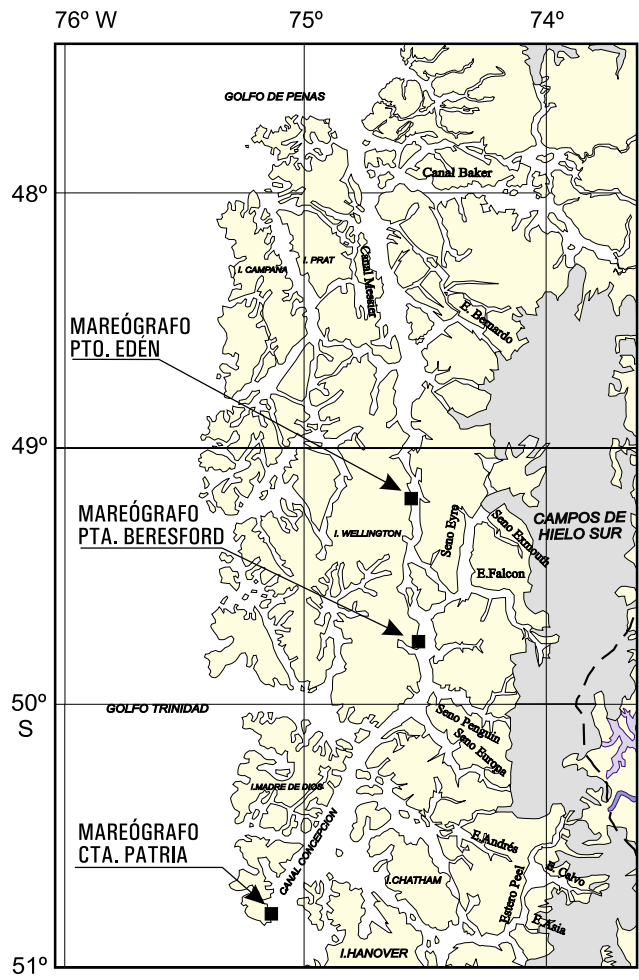


Fig. 1: Área de estudio y ubicación del instrumental.
Fig. 1: Area of study and instrumental locations.

CIMAR-FIORDO 2 Alturas del Nivel del Mar

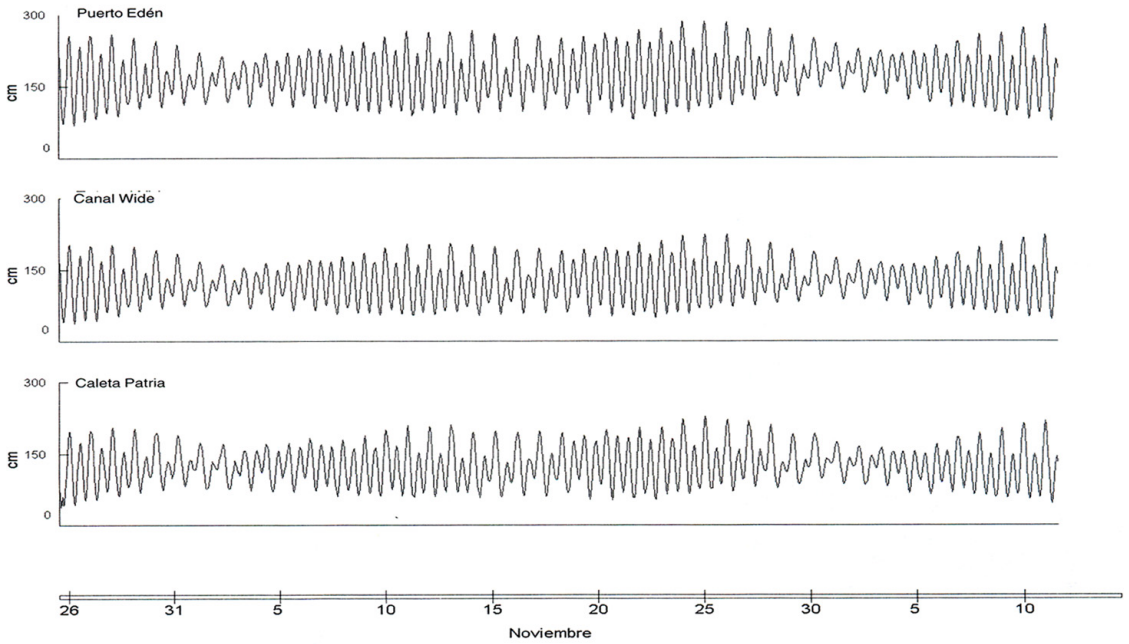


Fig. 2: Alturas del nivel del mar registrado.
Fig. 2: Observed sea level heights.

CIMAR-FIORDO 2 Nivel del Mar Filtrado

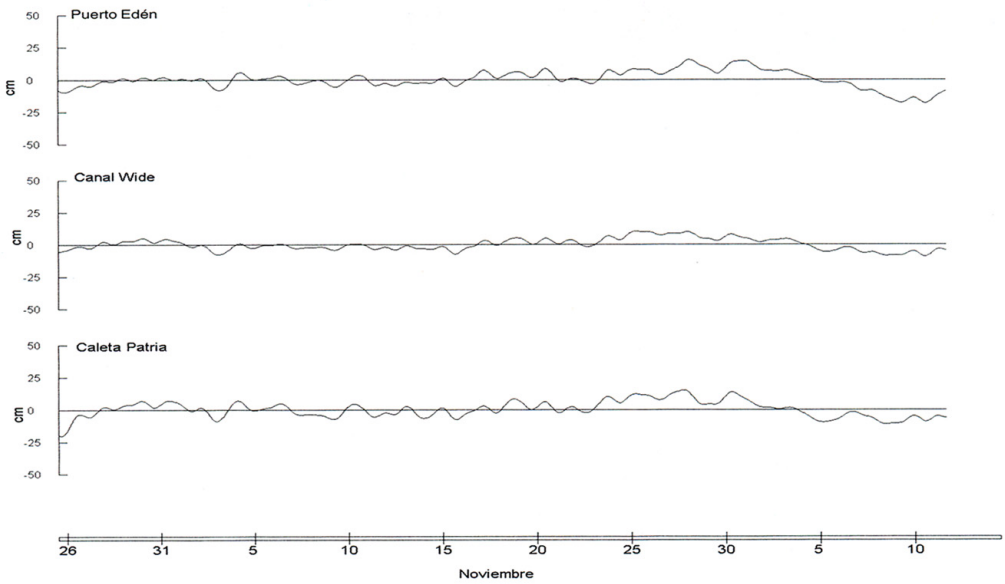


Fig. 3. Nivel del mar filtrado.
Fig. 3: Filtered sea level.

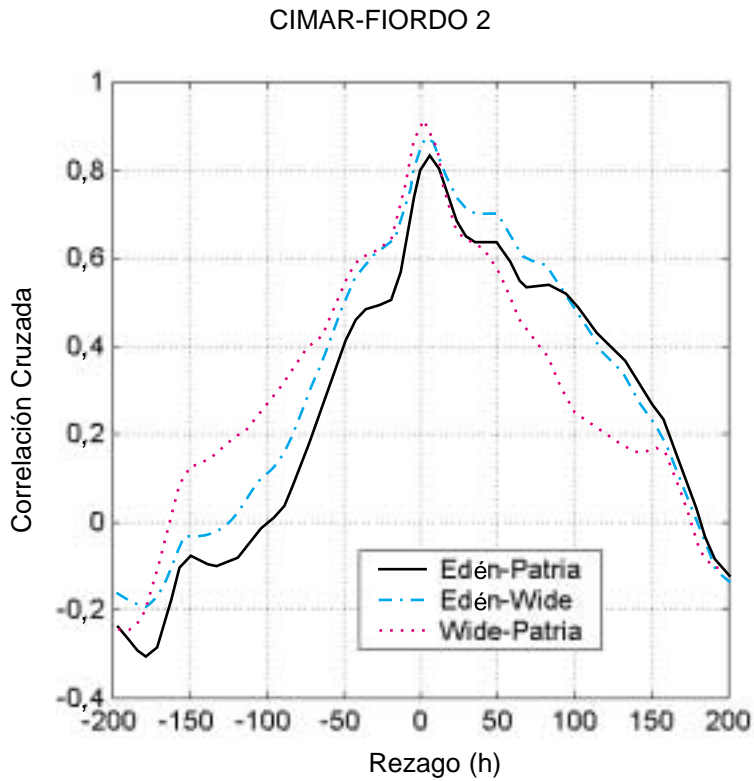


Fig. 4: Correlación cruzada de la señal de baja frecuencia.
 Fig. 4: Cross-correlation of low frequency signal.

Autoespectros Nivel del Mar

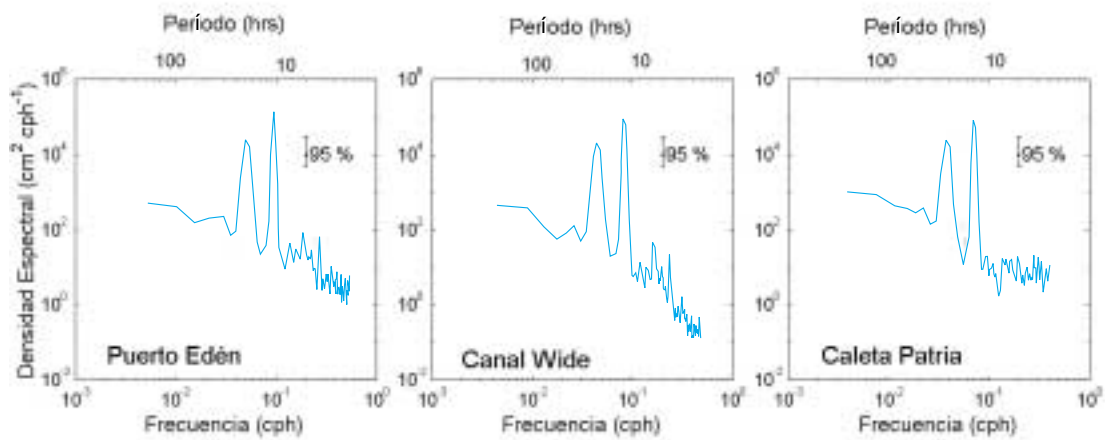


Fig. 5: Autoespectros del nivel del mar observado.
 Fig. 5: Tidal raw data spectral density.

Coherencia y Fase

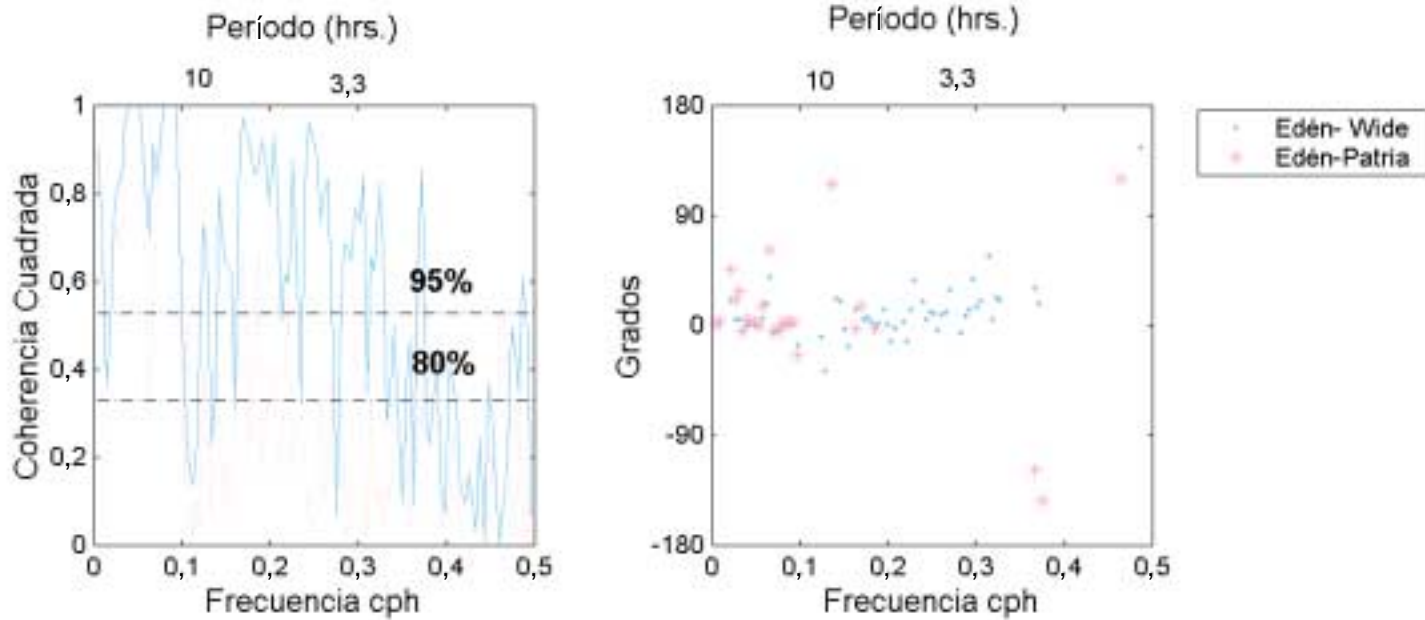


Fig. 6: Espectro de coherencia cuadrada y fase, solo la fase por sobre un 95% de coherencia ha sido graficada.

Fig. 6: Square coherence spectral density and phase, only phase above 95% was plotting.